

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

NEUE SERIE  
Naturwissen-  
schaft im Dienst  
der Archäologie

NOVEMBER 2014

MEDIZIN

Isotope nach Maß  
gegen Krebs

UMWELT

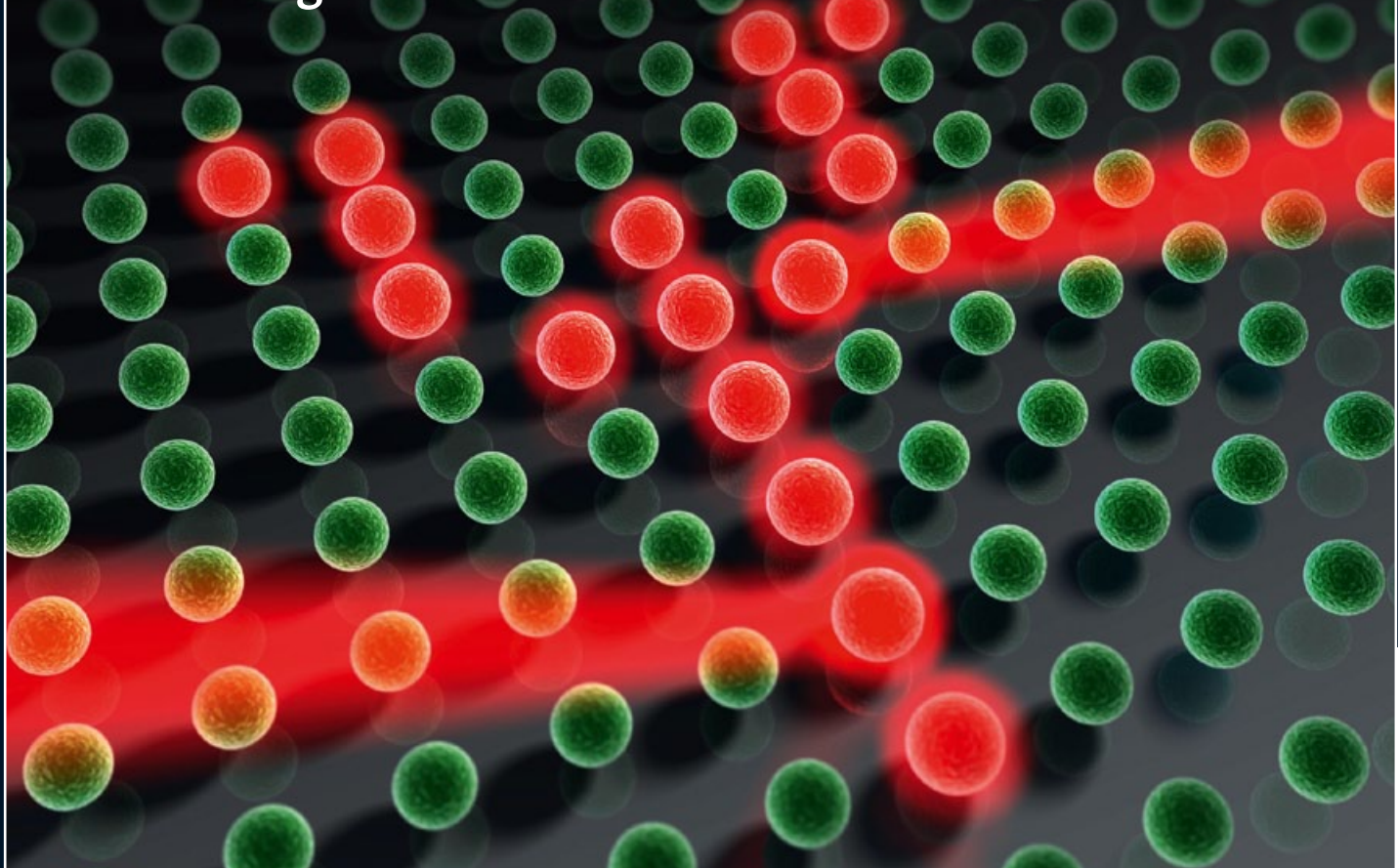
Ein Netz von Roboter-U-Booten  
erkundet die Ozeane

SUPERCOMPUTER

Biologische Forschung  
mit Hochleistungsrechnern

## Simulierte Quantenwelten

Mit trickreichen Experimenten  
ergründen Forscher das Unberechenbare



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



# ZUKUNFT FÜR ALLE. INNOVATIONEN FÜR ALLE.



**e-Mobilität von Volkswagen.**  
Der XL1, der e-Golf und der e-up!

**Think Blue.**





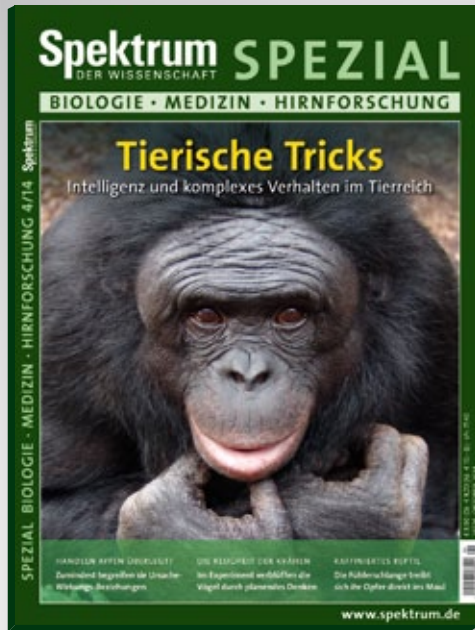
Innovationen sind erst dann wirkungsvoll, wenn sie allen Menschen zugänglich gemacht werden. Deshalb verbindet Volkswagen Qualität mit zukunftsweisender Technologie. Und lässt so eine völlig neue Generation von Auto entstehen. Angeführt von dem ersten 1-Liter-Auto der Welt, dem XL1, zeigen vollelektrische Modelle wie der e-Golf oder der e-up!, dass die Zukunft der Mobilität schon jetzt auf der Straße angekommen ist.



**Das Auto.**



# UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Handeln Affen überlegt? • Meerschweinchen als Sozialstrategen • Die Klugheit der Krähen • Die raffinierten Jagdtechniken der Fühlerschlange • Dschungel-Ameisen als Viehzüchter • € 8,90



Maya: Kakao und Kalter Krieg • Mesopotamien: Wissen für die Elite • Jäger und Sammler: Sehen, riechen, orientieren • Pfeifsprachen: Unterhaltung nach Vogelart • € 8,90



Computerspiele: Sucht nach virtueller Anerkennung • Messie-Syndrom: Warum manche Menschen nichts wegwerfen können • Medienopfer: Vorgeführt und bloßgestellt • € 8,90; ab 24.10.14



Das Magazin für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren: Alexander Gerst – Unser Mann fürs All • Jupiters großer roter Fleck • Reise zum Mars • € 4,90; überarbeitete Neuauflage

So einfach erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**

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

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

Hier QR-Code  
per Smartphone  
scannen!







Hartwig Hanser  
Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.de

## Archäologie auf Atomebene

»Ich dachte, Archäologen wären komische kleine Männer, die nicht von dieser Welt sind.« Der Ausspruch stammt aus dem Abenteuerfilm »Indiana Jones und der Tempel des Todes«, wobei die von Harrison Ford verkörperte Titelfigur allerdings gerade nicht diesem Klischee entspricht. Dennoch: Das Zitat spiegelt eine selbst heute noch weit verbreitete Sichtweise des Fachgebiets und seiner Experten wider – als verstaubt, rückständig und ein bisschen verschoben.

Mit diesem Bild räumt unsere neue dreiteilige Serie zum Thema Archäometrie gründlich auf. Hierbei handelt es sich um eine noch recht neue interdisziplinäre Fachrichtung, die mit modernen naturwissenschaftlichen Methoden Fundstücke aus alten Zeiten erforscht. Denn: Mangels Aufzeichnungen können Archäologen oft nur mit vergleichenden Untersuchungen beispielsweise verschiedene Funde ähnlichen Zeitphasen und Kulturen zuordnen. Eine naturwissenschaftliche Herangehensweise liefert hingegen absolute Zahlen für die Datierung und chronologische Einordnung – denen aber erst die Expertise von Archäologen den richtigen Sinn verleiht.

Die verwendeten Methoden stammen meist aus der Chemie und Physik, zunehmend jedoch auch aus der Molekularbiologie beziehungsweise Genetik. Einige davon wie die Altersbestimmung mit Hilfe des Kohlenstoffisotops  $^{14}\text{C}$  sind schon seit längerem im Einsatz und allgemein bekannt. Aber in den letzten Jahren fand auf dem Gebiet eine explosive Entwicklung statt, was heute sogar manche Untersuchungen erlaubt, ohne dass man den kostbaren Relikten Proben entnehmen muss. Ein Beispiel ist die Röntgenfluoreszenzanalyse, die Materialien und deren Herkunft bestimmt und so etwa hilft, verloren gegangene Farbschichten anhand einiger Restatome auf der Oberfläche von Objekten zu rekonstruieren (S. 60).

Mit einem Rasterelektronenmikroskop lässt sich wiederum das Mengenverhältnis verschiedener chemischer Spurenelemente in Materialien wie antikem Eisen analysieren. Der Vergleich mit Eisenerzen aus unterschiedlichen Quellen erlaubt es, die Herkunft der Metallstücke zu entschlüsseln und damit auch alte Handelsbeziehungen aufzudecken, wie Roland Schwab und Philippe Dillmann ab S. 66 erläutern. So stammen beispielsweise einige Nägel des Papstpalastes in Avignon aus den Nordpyrenäen.

Außerdem haben die beiden Forscher ein neues, sehr empfindliches Verfahren entwickelt, das verschiedene Osmiumisotope nutzt, um selbst in schwierigen Fällen den Ursprung von Eisenstücken zu eruieren. Auf diese Weise konnten sie Funde von dem keltischen Fürstensitz Hochdorf bis zum immerhin 40 Kilometer entfernten Neuenbürg im Nordschwarzwald zurückverfolgen. Unsere Vorfahren vor zweieinhalbtausend Jahren hatten demnach bereits eine recht komplizierte Eisenwirtschaft entwickelt.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihr

*Hartwig Hanser*

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



Wie sich Atome einfangen und manipulieren lassen, um komplexe Quantensysteme zu simulieren, erklären **Oliver Morsch** (links) von der Universität di Pisa und **Immanuel Bloch** vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching ab S. 40.



Antiken Pigmente auf der Spur: die Chemikerinnen **Ina Reiche** (links), Leiterin des Rathgen-Forschungslabors der Staatlichen Museen zu Berlin, und **Katharina Müller** vom Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale des CNRS in Paris (S. 60).



»Verborgene« Symmetrien können Aufschluss über die tiefere Struktur der Realität geben, berichtet ab S. 48 der britische Teilchenphysiker **Frank Close** von der University of Oxford.

5 Editorial

8 Leserbrief/Impressum

10 Spektrogramm

Nanopartikel gegen Blutvergiftung • Bäume wachsen schneller • Galaxienkollisionen bringen Scheiben hervor • Rekord-Dinosaurierfund • Roboter aus Gummi • Uralte Stütze im Rücken

13 Bild des Monats

Störenfried für die Ewigkeit

14 Forschung aktuell

Phantome im All

Fehlalarm: Nicht jeder Exoplanetenfund ist echt

Chancenreiche Folien

Bekanntes Material mit neuem Einsatz als Display

Riesenviren aus dem Eis

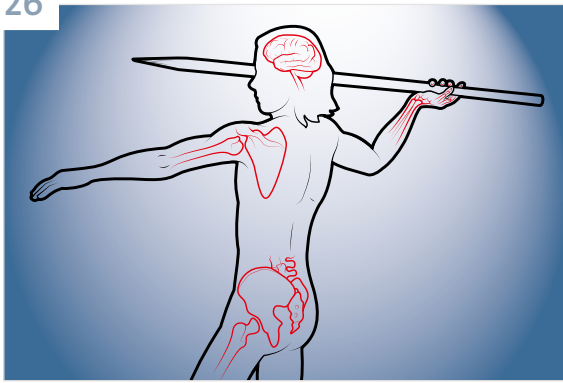
Ein neuer Typ überlebt im sibirischen Permafrost

**Bilder mit verlorenem Licht**  
Objekte fotografieren – mit Licht, das nie darauf traf

**Zerstörte Erinnerungen**  
Die Konsequenzen der »adulten Neurogenese«

SPRINGERS EINWÜRFE  
**Eigensinnige Hummeln**  
Individualisten sind nötig

26



BROWNBIRD DESIGN

48



SIMON DANÄHER

60



BADISCHES LANDESMUSEUM (INV.-NR. 70/522); UV-AUFNAHME: GIORGIO AFFANNI; MIT FRDL. GEN. VON INA REICHE

BIOLOGIE & MEDIZIN

26 Zum Jagen geboren

Kate Wong

Früher als gedacht erwarben unsere Vorfahren Merkmale, die sie zum Erlegen von Tieren benötigten.

32 Terbiumisotope gegen Krebs

Ulli Köster, Cristina Müller, Roger Schibli

Radioaktive Nuklide mit maßgeschneiderten Eigenschaften erlauben es, Tumoren gezielt zu bekämpfen.

PHYSIK & ASTRONOMIE

48 Verborgene Symmetrien

Frank Close

Physiker schätzen Symmetrien. Wahrhaft Erkenntnis fördernd kann aber deren – scheinbares – Fehlen sein.

SCHLICHTING!

54 Alles im Griff

H. Joachim Schlichting

Wie der Organismus verhindert, dass uns Dinge in feuchter Umgebung einfach aus der Hand rutschen.

MENSCH & KULTUR

SERIE »ARCHÄOMETRIE« TEIL 1

60 Antike Farbenspiele

Ina Reiche und Katharina Müller

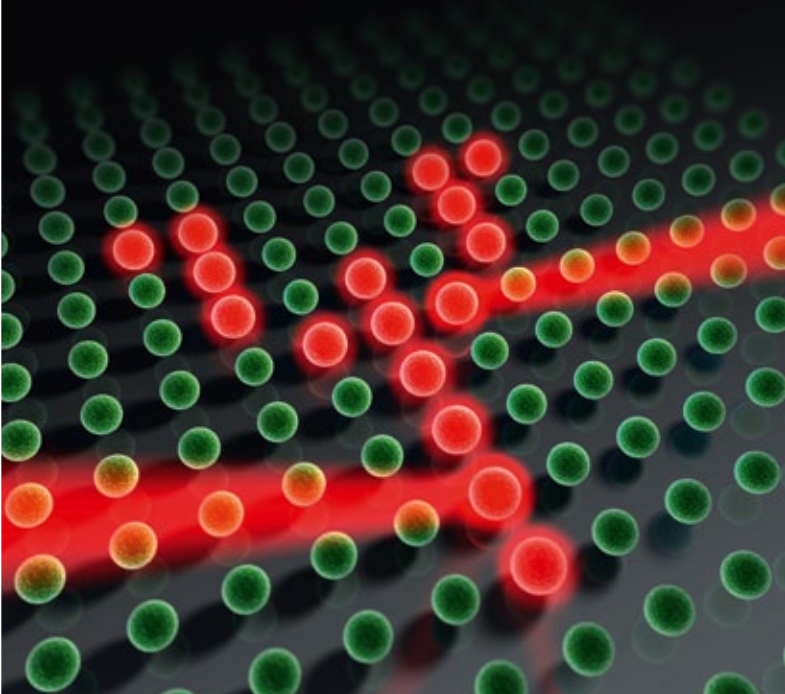
Röntgenspektren verraten, wie jahrtausendealte Elfenbeinschnitzereien einst bemalt waren.

66 Dem Eisen auf der Spur

Philippe Dillmann und Roland Schwab

Mit Spurenelementen und seltenen Isotopen lassen sich die Handelsbeziehungen im Mittelalter besser verfolgen.





► TITELTHEMA

VIELTEILCHENSYSTEME

## 40 Simulierte Quantenwelten

*Oliver Morsch und Immanuel Bloch*

Quantenmechanische Systeme sind oft zu komplex, um sich berechnen oder direkt untersuchen zu lassen. Trotzdem entlocken Forscher ihnen immer mehr Geheimnisse – indem sie die Phänomene mit anderen Mitteln trickreich nachbauen.

76



RUTGERS UNIVERSITY COASTAL OCEAN OBSERVATION LAB

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### 71 Kartenspielen in vier Dimensionen

*Christoph Pöppe*

Bei dem Spiel »Set« kommt es darauf an, Geraden auf einem endlichen vierdimensionalen Torus zu finden.

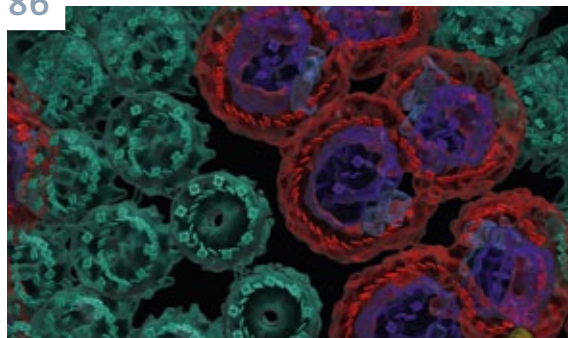
ERDE & UMWELT

### ► 76 Tauchroboter erkunden die Meere

*Oscar Schofield, Scott Glenn und Mark Moline*

Autonome Unterwasserfahrzeuge sammeln in den Weiten der Ozeane sonst kaum erhältliche Daten über Stürme, bedrohte Ökosysteme und den Klimawandel.

86



MELIH SENAR, TCBG, UIUC

TECHNIK & COMPUTER

### ► 86 Die Geheimnisse des Lebens berechnen

*Till Rudack, Juan Perilla und Klaus Schulten*

Mit einem Hochleistungsrechner lassen sich Millionen von Atomen über Milliarden von Zeitschritten verfolgen. Dabei gewinnt man detaillierte Einblicke in die Photosynthese, die Wirkungsweise eines Antibiotikums, die Infektion durch das Aidsvirus und vieles mehr.

### 56 Wissenschaft im Rückblick

Von der Kriegsbrieftaube zum Herzschrittmacher

### 96 Rezensionen

*Dave Goulson: Und sie fliegt doch* • *Lee Smolin: Im Universum der Zeit* • *Michael Tomasello: Eine Naturgeschichte des menschlichen Denkens* • *Paul Borgard: Die Nacht* • *Nicholas*

*Evans: Wenn Sprachen sterben* • *Wolfgang Tschirk: Statistik: Klassisch oder Bayes u. a.*

### 104 Futur III

*Alex Shvartsman: Zu einem Gespräch gehören zwei*

### 106 Vorschau

Titelmotiv: Immanuel Bloch, MPQ  
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

## Supersymmetrie eventuell überflüssig

*Die beiden Physiker Joseph Lykken und Maria Spiropulu erörtern, ob die für die Quantenwelt angenommene Supersymmetrie experimentell bestätigt werden wird oder ob Wissenschaftler sich von diesem Modell verabschieden müssen. (»Supersymmetrie in der Krise«, September 2014, S. 36)*

**Werner Preuß, Bremen:** Joseph Lykken und Maria Spiropulu diskutieren in ihrem Beitrag die mangelnde experimentelle Evidenz für Supersymmetrie und schlagen drei spekulative Alternativen vor: das Multiversum, Extradimensionen und dimensionale Transmutation. Leider lassen die Autoren die wohl interessanteste Alternative unerwähnt, nämlich die Möglichkeit, dass Quarks, Leptonen und Boso-

nen aus noch kleineren Konstituenten (so genannten Preonen) aufgebaut sein könnten (siehe den Artikel »Das Innenleben der Quarks« von Don Lincoln in Spektrum der Wissenschaft 12/2013, S. 46). Derartige Theorien besitzen einen großen Charme: Sie machen die Supersymmetrie überflüssig und bieten eine Erklärung für die Dunkle Materie und die Massen der Elementarteilchen, indem sie nur einen in der Natur realisierten Ursprung der Masse postulieren (Masse ist Bindungsenergie) und nicht zwei (Bindungsenergie und Higgs-Feld). Das vom LHC beobachtete Higgs-Ereignis wäre im Rahmen von Preonentheorien anders zu interpretieren. Möglicherweise wird die nächste Ausbaustufe des LHC zeigen, ob der letzte Nobelpreis vielleicht voreilig vergeben wurde.

**Mit dem CMS-Experiment – hier der gewaltige Teilchendetektor beim Zusammenbau im Jahr 2008 – hoffen Physiker, Hinweise auf die postulierte Supersymmetrie zu finden. Aber vielleicht erweist sich das theoretische Konstrukt ja als überflüssig?**



ANNA PANTEUA, CERN

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

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

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

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

**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

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

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

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

**Referentin des Chefredakteurs:** Kirsten Baumbusch

**Redaktionsassistent:** Barbara Kuhn

**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck

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

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

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

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit:

Andrea Jungbauer, Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda,

Dr. Michael Springer.

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

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:**

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80,

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

E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90; Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE5260010700022706708, BIC: PBNKDEFF

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

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Annette Freistühler, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1322

**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk:

Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67,

40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 35 vom 1.1.2014.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2014 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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



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







## Kurzsichtige Maßnahmen

*Erstmals gibt es definitive Belege dafür, dass der Mensch das Wetter beeinflussen kann, so Dan Baum. (»Regenmacher im Aufwind«, September 2014, S. 70)*

**Leyla Cimen, Bremen:** Der Artikel hat mir die Augen darüber geöffnet, wie unverantwortlich und gefährlich mit unserer Natur umgegangen wird. Statt den Ursachen für zunehmende Dürren und Hitzewellen auf den Grund zu gehen (Ausstoß von Treibhausgasen, Veränderungen der globalen Strömungssysteme der Luft und der Meere durch die Erderwärmung und so fort), werden kurzsichtige Maßnahmen ergriffen, die sicher zu neuen und schlimmeren Problemen führen werden.

Beispielsweise könnte die vorzeitige Auflösung der Wolken vielleicht zur Folge haben, dass es im Amazonasgebiet weniger regnet. Auf jeden Fall senkt es aber ihr Reflexionsvermögen von Sonnenstrahlen.

## Die Spiralmetapher der Zeit

*Selbstwahrnehmung und Zeiterleben scheinen untrennbar miteinander verbunden zu sein, konstatierte der Psychologe Marc Wittmann. (»Wie unser Gefühl für die Zeit entsteht«, Oktober 2014, S. 24)*

**Wolfgang Hinderer, Karlsruhe:** Auch wenn der Artikel von Marc Wittmann nicht direkt auf die Spiralmetapher zurückgreift, möchte ich doch angesichts

des Titelbilds der Ausgabe daran erinnern: Der österreichische Künstler Friedensreich Hundertwasser (1928–2000) schrieb 1991: »Die Spirale ist das Symbol des Lebens und des Todes. Die Spirale liegt genau dort, wo die leblose Materie sich in Leben umwandelt. Ich bin davon überzeugt, dass der Schöpfungsakt sich in Spiralform vollzogen hat. Unsere Erde beschreibt den Lauf der Spirale. Wir gehen im Kreis, aber wir kommen nie wieder an den Punkt zurück, der Kreis schließt sich nicht, wir kommen nur in die Nähe des Punkts, wo wir gewesen sind. Das ist typisch für eine Spirale, dass sie ein scheinbarer Kreis ist, der sich nicht schließt.«



STOCKPHOTO / DIMITRIS M. STEPHANIDES (W)

**Der Verlauf der Zeit und ihr subjektives Erleben stellen uns immer noch vor Rätsel.**

## Zusammenhang mit der Evolution?

*Laut der Quantenfeldtheorie besteht die Welt aus Strukturen oder Bündeln von Eigenschaften, schrieb der Bielefelder Physiker und Philosoph Meinard Kuhlmann. (»Was ist real?«, Juli 2014, S. 46)*

**Michael Beeck, Ebenhausen:** Sehr interessanter Artikel, herzlichen Dank! Mich fasziniert insbesondere, welche Konsequenzen die Quantenfeldtheorie für die Evolutionstheorie hat. Die »synthetische Theorie« teilt ja die Evolution in Mutation und Selektion ein. Der erste Schritt, die Mutation, ist dabei doch nichts anderes als ein Lösen und Neuverknüpfen von chemischen Bindun-

**FOLGEN SIE UNS IM INTERNET**

**facebook**  
www.spektrum.de/facebook

**YouTube**  
www.spektrum.de/youtube

**Google+**  
www.spektrum.de/googleplus

**twitter**  
www.spektrum.de/twitter

gen. Diese Neuverknüpfungen laufen natürlich nach den Gesetzen der Quantenmechanik ab. Daraus ergibt sich, dass Überlegungen zur Quantentheorie auch Auswirkungen auf die Evolutionstheorie haben werden. Ich denke da vor allem an den dortigen Zufallsbegriff.

## Erratum

*»Risse im Periodensystem«, August 2014, S. 78*

Eric Scerri ist auf S. 83, Spalte 2, Zeile 13 ein kleiner Fehler unterlaufen: Statt Flerovium-189 muss es Flerovium-289 heißen. Richard B. Wernig aus Strassburg (Kärnten) machte uns darauf aufmerksam.

**BRIEFE AN DIE REDAKTION**

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

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

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

MEDIZIN

# Nanopartikel gegen Blutvergiftung

**B**ioingenieure haben ein Gerät entwickelt, das schnelle Hilfe bei Blutvergiftung (Sepsis) bieten soll. An dieser massiven Entzündungsreaktion, die nach Infektionen auftritt, sterben allein in Deutschland mehrere zehntausend Menschen pro Jahr. Die neue Maschine filtert Gifte und Krankheitserreger rasch und unspezifisch aus dem Blut. Hierfür wird es über magnetische Nanopartikel geleitet, die mit einer künstlich erzeugten Variante des mannosebindenden Lektins umhüllt sind. Diesen Eiweißstoff schüttet der Organismus bei Infektionen ins Blut aus, wo er sich an Zuckermoleküle auf Bakterien, Viren und Pilzen heftet – sowie an Toxine, die eine Blutvergiftung auslösen können.

Auch die künstliche Variante des Lektins bindet krankmachende Erreger und Giftstoffe, schreiben die Forscher um Donald Ingber vom Wyss

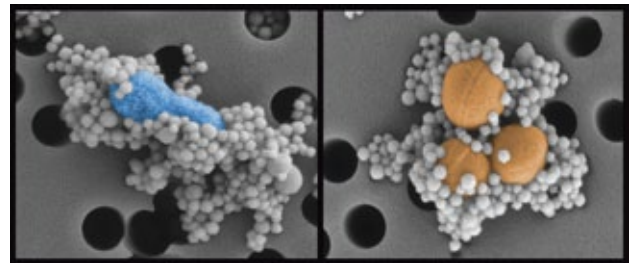
Institute for Biologically Inspired Engineering in Boston (USA). Die schädlichen Bestandteile bleiben somit hängen, während das Blut über die beschichteten Nanopartikel strömt. Mit Magneten entfernt das Team die Kügelchen mitsamt ihrer Fracht anschließend aus dem Serum. Der Filtermechanismus holte im Tierversuch binnen einer Stunde mehr als 90 Prozent der Keime aus dem Blut von bakteriell infizierten Ratten.

Im zweiten Schritt testeten die Wissenschaftler, ob die neu entwickelte

Maschine das Blut eines erwachsenen Menschen in medizinisch sinnvoller Zeit reinigen kann. Tatsächlich säuberte sie Spenderblut bei einer Durchflussrate von einem Liter pro Stunde verlässlich von vorher zugesetzten Bakterien und Pilzsporen. Das könnte beim Behandeln einer Sepsis viele Leben retten. Denn dort brauchen die Mediziner oft Tage, um die Infektionsquelle zu identifizieren, bevor sie gezielt Gegenmaßnahmen ergreifen können.

*Nat. Med. 10.1038/nm.3640,2014*

**Nanopartikel, die mit mannosebindendem Lektin beschichtet sind (grau), heften sich an E.-coli- (links) sowie an S.-aureus-Bakterien (rechts).**



WYSS INSTITUTE, HARVARD UNIVERSITY

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE



**Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin**

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

[www.spektrum.de/die-woche](http://www.spektrum.de/die-woche)

ÖKOLOGIE

# Bäume wachsen immer schneller

**I**m Vergleich zu den 1960er Jahren wachsen Bäume heute wesentlich schneller. Das lesen Forscher der Technischen Universität München aus Langzeitdaten von Versuchsflächen, die seit 1870 unter wissenschaftlicher Beobachtung stehen. Die Wissenschaftler um Hans Pretzsch widmeten sich dabei Waldflächen, die typisch sind für Vegetationszonen in Mitteleuropa.

Buchen, die zu den wichtigsten Laubbäumen in unseren Breiten zählen, wachsen inzwischen um bis zu 70 Prozent schneller als noch vor 50 Jahren, Fichten um bis zu 30 Prozent. Als Mittelwert für große Baumbestände ergibt sich eine um 30 Prozent (Buchen) beziehungsweise 10 Prozent (Fichten) höhere Wachstumsrate. Die Forscher führen das auf längere Vegetationsperioden zurück, bedingt durch höhere Durchschnittstemperaturen

infolge des Klimawandels, sowie auf den steigenden Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre.

Das raschere Wachstum verändere aber nicht das Erscheinungsbild des Waldes, schreiben Pretzsch und Kollegen. Dieselben Baum- und Bestandsgrößen würden einfach nur in kürzerer Zeit erreicht, als das früher der Fall war. Davon könne die Forstwirtschaft profitieren: Dem Wald ließe sich pro Zeitintervall mehr Holz entnehmen, ohne die Nachhaltigkeit zu gefährden. Allerdings bedeute das schnellere Baumwachstum eine Umstellung für Tiere, die ihre Lebensweise auf bestimmte Waldentwicklungsphasen ausgerichtet haben, beispielsweise nur in Junggehölzen leben. Sie müssten künftig vermutlich mobiler werden.

*Nat. Comm. 5, 4967, 2014*



## Galaxienkollisionen bringen Scheiben hervor

Wenn Galaxien miteinander verschmelzen, bilden sich häufig scheibenähnliche Strukturen, berichten Astronomen um Junko Ueda vom National Astronomical Observatory of Japan. Ihr Ergebnis widerspricht der gängigen Annahme, die Kollision zweier vergleichbarer Sterninseln führe in aller Regel zu einem Gebilde, das wie ein Ellipsoid geformt ist.

Die Forscher untersuchten 37 Galaxien, die klare Anzeichen dafür aufwiesen, vor relativ kurzer Zeit aus der Verschmelzung kleinerer Vorgänger entstanden zu sein. Mit Hilfe verschiedener Radioteleskope sowie anhand von Archivdaten gelang es bei 30 dieser Sterninseln, die räumliche Verteilung und die Bewegungseigenschaften des molekularen Gases in ihnen zu ermitteln. Wie die Analyse ergab, besitzen 24 Galaxien (ein Anteil von 80 Prozent) rotierende Gasscheiben mit Größen zwischen 3300 und 29000 Lichtjahren. Bei elf dieser Galaxien erstrecken sich die Scheiben jeweils über die zentrale Ansammlung von Sternen hinaus.

Bemerkenswert ist die Entdeckung deshalb, weil die meisten Astronomen seit den 1970er Jahren davon ausgehen, dass bei Verschmelzungsprozessen überwiegend elliptische Galaxien entstehen. Im Gegensatz zu Scheibengalaxien, zu denen die Milchstraße gehört, sind elliptische Galaxien kaum strukturiert und enthalten vorwiegend alte Sterne. Wie jedoch Computersimulationen kürzlich ergaben, können Galaxienkollisionen auch spiralförmige Gebilde hervorbringen.

Dafür muss der Gasanteil der beteiligten Galaxien groß sein und ausreichend Drehimpuls besitzen. Die Beobachtungen von Ueda und seinen Kollegen scheinen diese Modellrechnungen nun zu bestätigen.

*Astrophys. J. Suppl. S. 214, 1, 2014*



Im Sternbild Haar der Berenike lassen sich zwei verschmelzende Spiralgalaxien beobachten, genannt »Die Mäuse«.

## Neuer Rekord-Dinosaurierfund

Paläontologen um Kenneth Lacovara von der Drexel University (USA) haben in Argentinien die Reste eines riesigen Dinosauriers entdeckt. Der Fund stellt gleich in zweierlei Hinsicht einen Rekord dar. Erstens handelt es sich um das am besten erhaltene fossile Skelett eines Titanosauriers, das bislang zum Vorschein kam. Zweitens stammt es von einem Tier, das alle bekannten Dinosaurier an Größe übertraf.

Etwa 70 Prozent der Knochen haben die Jahrmillionen überdauert – ein fantastischer Fund, denn beim nächstbesten erhaltenen Titanosaurier-Fossil (es stammt vom Sauropoden *Futalognkosaurus dukei*) sind es nur 27 Prozent. Generell werden Fossilien von Sauro-

poden meist unvollständig geborgen. Forscher führen das darauf zurück, dass die gigantischen Körper dieser Tiere nach dem Tod kaum je komplett von Sediment bedeckt wurden, was aber eine wesentliche Voraussetzung für erfolgreiche Fossilierung darstellt. Deshalb erlaubt die neue Entdeckung bislang einmalige Einblicke in die Anatomie der größten Lebewesen, die je auf der Erdoberfläche wandelten.

Die Wissenschaftler verliehen dem Tier die Artbezeichnung *Dreadnoughtus schrani*. »Dreadnought« bedeutet »Fürchtenichts«, und in der Tat dürfte das Tier kaum Feinde gehabt haben, die ihm gefährlich werden konnten. Das gefundene Exemplar war 25 Meter



Die fossilien Überreste von *Dreadnoughtus schrani* lassen die enorme Größe des Tiers erahnen.

lang und wohl 65 Tonnen schwer, womit es selbst den gewaltigen Brachiosaurus in den Schatten stellte. Und vermutlich handelte es sich noch nicht einmal um ein ausgewachsenes Individuum, wie die Forscher schreiben.

*Sci. Rep. 4, 6196, 2014*

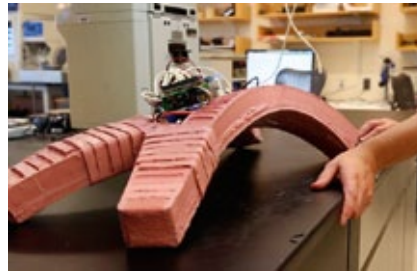
TECHNIK

## Weicher Roboter aus Gummi und Luft

Beim Begriff »Roboter« denken die meisten an eine Konstruktion aus Metall und Plastik. Dass es auch anders geht, haben jetzt Ingenieure von der Harvard University demonstriert. Das Team um George M. Whitesides konstruierte einen Roboter aus Silikonkautschukschläuchen, der seine Form durch Einblasen von Druckluft verändert. Die Maschine hat vier weiche Beine, die durch lokales Aufpumpen und Luftablassen angetrieben werden. Das erlaubt ihr, sich fortzubewegen. Mit etwa einem halben Meter Standbreite ist der Roboter mehr als doppelt so groß wie vergleichbare Vorläufer und kann Lasten mit einer Masse von etwa vier Kilogramm tragen. Wie das Team berichtet, ist die Konstruktion

gerade wegen ihrer Flexibilität äußerst robust: Sie kann sowohl durch Flammen laufen als auch von einem Auto überfahren werden, ohne Schaden zu nehmen.

Technisch anspruchsvoll sei vor allem der hohe Luftdruck gewesen, den



MED BROWN, HARVARD UNIVERSITY

**Durch und durch ein Weichling ist der neue Roboter aus Silikonkautschuk – und eben darum hart im Nehmen.**

die batteriebetriebene Maschine aufbringen müsse, um ihre Extremitäten zu bewegen, berichten die Forscher. Bis zu einem Bar (etwa 100 Kilopascal) sei erforderlich. Die Wissenschaftler verwendeten als Material für den Roboter Silikonkautschuk, das mit winzigen hohlen Glaskügelchen versehen war, um Gewicht zu sparen. Die Unterseite der Füße war mit Kevlar verstärkt.

Die Experten hoffen künftig auf zahlreiche Anwendungen für ihren weichen Roboter. Nicht nur habe er sich als sehr widerstandsfähig erwiesen – anders als seine Gegenstücke aus Metall stelle er nur eine geringere Verletzungsgefahr für Menschen dar.

*Soft Robotics 1, S. 213–223, 2014*

BIOLOGIE

## Uralte Stütze im Rücken

Wir Menschen gehören zum Stamm der Chordatiere, benannt nach einem stabförmigen Stützapparat im Körper, der im Embryonalstadium angelegt wird. Bei den Wirbeltieren ersetzt ihn im Lauf der Embryonalentwicklung die Wirbelsäule. Die Chorda tritt nur bei Chordatieren auf – glaubte man zumindest bisher. Untersuchungen am Europäischen Laboratorium

für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg deuten nun in eine andere Richtung: Forscher um Detlev Arendt sind dort zu dem Schluss gekommen, dass die Stützstruktur im Rücken evolutionsgeschichtlich viel weiter zurückreicht.

Demnach ist sie ursprünglich nicht nur bei den Chordatieren angelegt gewesen, sondern ebenso bei anderen

Tierstämmen, beispielsweise den Ringelwürmern. Diese haben den stützenden Stab aber später wieder verloren. In den Larven des Ringelwurms *Platynereis dumerilii* fanden die Forscher Zellverbände, in denen die gleichen Gene aktiv sind, die bei den Chordatieren die Ausbildung der Chorda steuern. Diese Zellen bringen beim Ringelwurm aber stattdessen einen Rückenmuskel hervor.

Daraus schließen Arendt und sein Team, dass schon der letzte gemeinsame Vorfahr von *Platynereis dumerilii* und den Chordatieren eine Art muskuläre Urchorda besaß. Tatsächlich fanden die Wissenschaftler ähnliche Strukturen auch bei Vertretern weiterer Tierstämme, etwa den Weichtieren und den Armfüßern. Bei den Chordatieren habe sich der Muskel in einen stützenden Knorpelstab umgewandelt, während er sich bei anderen Tieren wieder zurückbildete, schreiben die Forscher.

*Science 345, S. 1365–1368, 2014*



ANKE FISCHER / EMBL HEIDELBERG

***Platynereis dumerilii* ist ein Borstenwurm aus dem Stamm der Ringelwürmer. In seinen Larven sind bereits Gene aktiv, die bei Chordatieren den namensgebenden Stützapparat hervorbringen.**



## STÖRENFRIED FÜR DIE EWIGKEIT

Raubmilben machen bereits seit Jahrmillionen Hautflüglern wie Ameisen und Bienen das Leben schwer. Den ältesten Beleg dafür fand ein Forscherteam in einem etwa 49 Millionen Jahre alten Bernstein. Umhüllt vom versteinerten Baumharz sitzt auf dem Kopf einer Ameise eine kaum millimetergroße Milbe. Aus deren Familie war den Wissenschaftlern zufolge noch kein fossiles Exemplar dokumentiert. Der einzigartige Fund beweise die lange gemeinsame Geschichte beider Tierordnungen.

*Biol. Lett.* 10, 20140531, 2014



EXTRASOLARE PLANETEN

# Phantome im All

Immer wieder verkünden Forscher die Entdeckung einer neuen »zweiten Erde«, die um eine fremde Sonne kreist. Eine Studie an dem Zwergstern Gliese 581 zeigt aber: Manche der vermeintlichen Planeten existieren in Wirklichkeit gar nicht.

VON FELICITAS MOKLER

Eigentlich ist Gliese 581 recht unscheinbar. Der rote Zwergstern besitzt etwa ein Drittel der Sonnenmasse und gerade einmal ein Prozent der Sonnenleuchtkraft, außerdem ist er deutlich kühler als unser Tagesgestirn. Doch angesichts seiner Entfernung von nur 20 Lichtjahren nehmen Forscher ihn gerne ins Visier, um in seiner Umgebung nach extrasolaren Planeten zu fahnden. Den ersten Begleiter von Gliese 581 entdeckte ein Team um Xavier Bonfils, der heute an der Université Joseph Fourier in Grenoble arbeitet, als es 2005 eine Messserie an der Europäischen Südsternwarte (ESO) im chilenischen La Silla durchführte. Gliese 581 b mit einer geschätzten Mindestmasse von etwa 17 Erdmassen, rund einer Neptunmasse, galt damals als einer der leichtesten Exoplaneten überhaupt.

Bereits zwei Jahre später fanden Wissenschaftler um Stéphane Udry von der Université de Genève, der schon zu Bonfils' Team gehört hatte, weitere Planeten in dem System: zwei so genannte Supererden, die eine mit dem Fünffachen, die andere mit dem Achtfachen der Erdmasse. Auch Bonfils zählte erneut zu den Entdeckern. Gliese 581 c und d, so glaubten die Forscher damals, umrun-

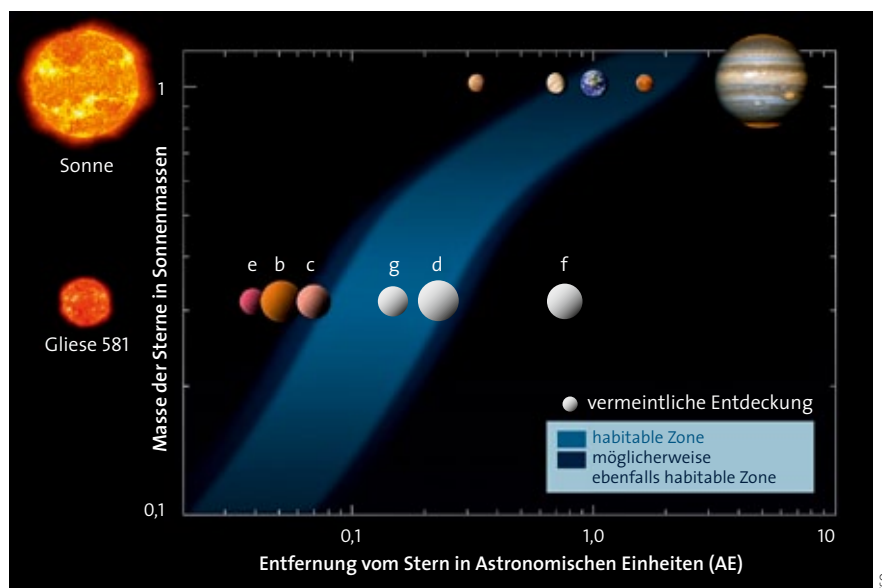
den ihr Zentralgestirn sogar innerhalb der lebensfreundlichen Zone an deren innerem beziehungsweise äußerem Rand. Hält sich ein Planet in dieser Zone auf, herrschen auf seiner Oberfläche solche Temperaturen, dass dort vermutlich Wasser in flüssiger Form existieren kann; eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung von Leben. 2009 kam noch Planet e auf die Liste, wieder ein Jahr später folgten f und g.

Als gesichert galten jedoch nur vier, nämlich Gliese 581 b, c, d und e. Gliese 581 f hatte sich bald als Phantom erwiesen, während über die Existenz von g weiter debattiert wurde. Nun aber untersuchte ein Team um Paul Robertson von der Pennsylvania State University

(*Science* 345, S. 440–444, 2014) das System Gliese 581 noch einmal genauer. Das Ergebnis: Den umstrittenen Planeten g gibt es tatsächlich nicht. Vor allem aber gibt es nicht einmal Gliese 581 d!

Aufgespürt hatten die Forscher diesen wie auch die übrigen Planeten um Gliese 581 mit der Radialgeschwindigkeitsmethode. Dabei macht man sich die Pendelbewegung zu Nutze, die ein Stern um den gemeinsamen Schwerpunkt mit seinem planetaren Begleiter ausführt. Aus der Perspektive eines Beobachters, der von der Seite auf die Bahnebene des Planetensystems blickt, bewegt sich der Zentralstern bei seinem Tanz um den Schwerpunkt periodisch auf ihn zu und von ihm weg. Die Ge-

Zwei Sternsysteme im Vergleich. Der rote Zwergstern Gliese 581 musste jetzt zurückstecken: Seine vermeintlichen Planeten d, f und g existieren gar nicht.







Gibt es da draußen erdähnliche Planeten? Bis vor Kurzem glaubten Forscher, beim roten Zwergstern Gliese 581 (rechts) planetare Begleiter gefunden zu haben, die sich in der lebensfreundlichen Zone aufhalten.

ESG

schwindigkeit des Sterns entlang der Verbindungslinie zwischen ihm und der Erde ist also abwechselnd positiv und negativ, was das von ihm ausgesandte Licht staucht oder streckt. Gemessen wird schließlich die durch diesen Dopplereffekt ausgelöste Verschiebung der Linien im Sternspektrum, die in den kurzwelligeren beziehungsweise langwelligeren Bereich rücken. Anhand der so erhaltenen Pendelperiode und -geschwindigkeit lassen sich für den planetaren Begleiter eine untere Massengrenze und seine Umlaufbahn bestimmen.

Weil der Zentralstern umso stärker pendelt, je kleiner seine Masse ist und in je größerer Nähe ein Begleiter ihn umkreist, eignet sich die Radialgeschwindigkeitsmethode für die Suche nach Exoplaneten bei Zwergsternen wie Gliese 581 besonders gut. Zudem liegt die lebensfreundliche Zone bei diesen Objekten recht nah am Stern – scheinbar perfekte Voraussetzungen also für die Suche nach einer zweiten Erde. Allerdings ruft bisweilen auch die Aktivität des Sterns ein periodisches Signal in den Sternspektren hervor, das jenem einer Pendelbewegung zum Verwechseln ähnelt. Durch lokale Veränderungen im stellaren Magnetfeld können auf der Sternoberfläche nämlich großräumige, langlebige Sternflecken entstehen, die dunkler als ihre Umgebung sind. Bewegen sie sich auf Grund der Eigenrotation des Sterns auf den Beobachter zu und wieder von ihm weg, erzeugen sie

im Spektrum des Sternlichts ebenfalls eine sich periodisch verändernde Radialgeschwindigkeitskomponente.

Woher weiß man nun, ob ein solches periodisches Signal seinen Ursprung in stellarer Aktivität oder in einem planetaren Begleiter hat? Ist die Aktivität des Sterns sehr ausgeprägt und ihr Grundmuster bekannt, gibt ein Blick auf das Profil der Spektrallinien Aufschluss. Denn bestimmte Spektrallinien werden von der Sternaktivität auf charakteristische, asymmetrische Weise verformt. Stoßen die Forscher auf eine solche Verformung, stammt das Dopplersignal vermutlich nicht von einem Planeten.

### Von stellaren Signalen verwirrt?

Diesen Effekt und die damit verbundenen Helligkeitsschwankungen hatten auch Udry und seine Kollegen bei ihrer Analyse der Sternspektren von Gliese 581 berücksichtigt, bevor sie die Entdeckung der Planeten c und d verkündeten. Nennenswerte Auffälligkeiten hatten sie dabei nicht gefunden, was aber auch nicht ungewöhnlich war, da der Zwergstern als einer der inaktivsten ihrer Stichprobe bekannt ist.

Allerdings weiß man gerade über die Aktivität von besonders massearmen Sternen bislang noch nicht sehr viel. In der Regel verhalten sie sich umso ruhiger, je masseärmer und kühler sie sind. Die Flecken, die dennoch auf ihrer Oberfläche zu sehen sind, unterscheiden sich deutlich von jenen Mustern und

Helligkeiten, die Forscher von sonnenähnlichen Sternen kennen. Außerdem treten gerade bei Sternen mit niedrigerer Oberflächentemperatur viele eng beieinanderliegende, häufig von Molekülen in der stellaren Atmosphäre stammende Spektrallinien auf, die sich nur schwer unterscheiden lassen.

Genau diesen Problemen widmeten sich die Forscher um Paul Robertson schon 2012, indem sie die Aktivitätszyklen von 93 roten Zwergsternen untersuchten. Mit Erfolg: Unter anderem zeigte sich, dass die Aktivität des Zwergsterns GJ 1170 das Signal eines Riesenplaneten nur vortäuschte. Außerdem erkannten die Forscher, dass auch die Aktivität von Gliese 581 zu Fehldeutungen führen könnte.

In der nun erschienenen »Science«-Publikation nahmen sie Gliese 581 dann noch einmal unter die Lupe. Aus dem Zusammenhang zwischen periodischer Schwankung der Radialgeschwindigkeit und Sternaktivität ermittelten die Forscher die Zeit, binnen derer sich der Stern einmal um sich selbst dreht. Die Periodendauer dieser Eigenrotation beträgt 130 Tage – das ist fast genau doppelt so lang wie die Bahnperiode von rund 66 Tagen, die für Gliese 581 d bestimmt worden war. Das Signal des vermeintlichen Planeten schien also einfach die Oberschwingung der Rotationsfrequenz des Sterns zu sein. Und mehr noch: Berücksichtigten die Forscher die Sternaktivität nicht im

richtigen Umfang, zeigte sich in den Daten auch der Planet Gliese 581 g besonders deutlich: Rechneten sie die stellare Aktivität jedoch korrekt heraus, erwiesen sich beide Planeten als Phantome, während sich die übrigen – b, c, und e – umso prägnanter abzeichneten!

So verschwinden mit Gliese 581 d und g also ausgerechnet zwei derjenigen Planeten wieder von der Bildfläche, die als erste überhaupt für erdähnliche Exemplare in einer lebensfreundlichen Zone gehalten wurden. Ob auch weitere Begleiter von Zwergsternen nur Phantome sind, müssen nun zusätzliche Studien klären. Stéphane Udry, der vermeintliche Entdecker von Gliese 581 d, erkennt an, dass »die Kollegen durchaus gute Gründe für ihre Annahme (ha-

ben), dass es den Planeten gar nicht gibt«. Zugleich erinnert er an einen Fall, bei dem die Existenz eines umstrittenen Planeten, HD192263 b, am Ende doch wieder bestätigt wurde. Jedoch räumt er ein, dass sein eigenes Team die stellare Aktivität möglicherweise nicht detailliert genug untersucht hatte. Zudem schlägt er vor, Gliese 581 auch im Infraroten genauer zu untersuchen. Dieser Spektralbereich ist weniger sensibel für stellare Aktivität und erlaubt trotzdem, die planetare Radialgeschwindigkeitskomponente zu messen.

Robertson hält es für wichtig, jetzt die stellare Aktivität gerade von solchen Zwergsternen unter die Lupe zu nehmen, in deren Umgebung Planeten entdeckt wurden. Derzeit arbeitet der

US-Forscher daran, die Methoden weiter zu verbessern, mit denen sich Effekte der stellaren Aktivität aus den Spektren herausfiltern lassen. Überprüfen kann man sie natürlich am besten an Sternen mit bereits nachgewiesenen Exoplaneten. Eine wichtige Arbeit, die er durchaus zwiespältig sieht: »Mein Ziel ist es schließlich, im Datenrauschen stellarer Aktivität echte Planeten aufzuspüren, nicht aber, frühere Entdeckungen in Frage zu stellen!«

Die meisten der bisher entdeckten und bestätigten Exoplaneten – bald sind es etwa 2000 – dürften allerdings echt sein.

---

**Felicitas Mokler** ist Astrophysikerin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

## MATERIALFORSCHUNG

# Minidisplays mit guten Aussichten

Substanzen, die nach Bedarf zwischen amorphem und kristallinem Zustand wechseln, entpuppen sich als viel versprechende Kandidaten für höchstauflösende Bildschirmtechnologie.

VON DIRK J. BROER

Displays sind allgegenwärtig. In den reichen Industrienationen ist der Alltag ohne sie – beispielsweise in Flachbildschirmfernsehern und Smartphones – kaum mehr denkbar. Während einige davon dem Trend zu immer größeren Diagonalen folgen, werden andererseits viele Monitore zunehmend kompakter, bei gleichzeitig enormer Auflösung und schneller Reaktionszeit (das bedeutet, dass ein Bildpunkt rasch seinen Zustand ändern kann). Erste derartige Mikrodisplays finden sich in handlichen Projektoren oder so genannten Wearables, die ihre Nutzer wie Kleidungsstücke oder als Accessoires wie Brillen oder Uhren am Körper tragen. Eine Forschergruppe um Peiman Hosseini von der University of Oxford entwickelte nun ein optoelektronisches Bauteil, das ultradünne Displays mit extremer Auflösung ermöglichen könnte (*Nature* 511, S. 206–211, 2014).

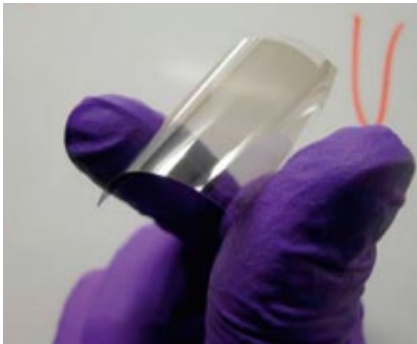
Das Herzstück dieser Erfindung ist ein dünner Film einer Legierung aus Germanium, Antimon und Tellur ( $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ , »GST«), ein so genanntes Phasenwechselmaterial. Das bedeutet, dass es schnell von einer metastabilen amorphen Phase, in der die Atome ungeordnet sind, in einen stabilen kristallinen Zustand und umgekehrt umschlagen kann. Beide Phasen halten sich bei Raumtemperatur lange. Der jeweilige Übergang erfolgt erst als Reaktion auf einen äußeren Einfluss wie Wärme, Licht oder elektrischen Strom. Letzterer eignet sich für Anwendungen in Displays. Bisher sind derartige Materialien vor allem als »Latentwärmespeicher« zur Temperaturregulierung bekannt, weil sie große Mengen thermischer Energie einlagern oder freigeben können, während sie ihren Zustand ändern. Weil sich die physikalischen Eigenschaften beider Phasen radikal unterscheiden, sind sie außerdem ein

bewährtes Speichermedium in wiederbeschreibbaren optischen Datenträgern und könnten sich auch als nichtflüchtige elektronische Speicher bei anderen Anwendungen eignen.

## Phase bringt Farbe

Um aus GST ein optoelektronisches Bauteil herzustellen, umhüllten die Forscher eine nur wenige Nanometer dicke Schicht des Materials mit zwei Lagen Indiumzinnoxid, das als transparente Elektrode dient. Dabei war ihre erste Erkenntnis, dass diese Sandwichstruktur Licht in sehr unterschiedlichem Maß hindurchlässt und reflektiert, abhängig davon, wie dick und lichtbrechend die verschiedenen Lagen sind. Bei einem präzise eingestellten elektrischen Impuls zwischen den Elektroden schaltet der Film aus GST zwischen amorphem und kristallinem Zustand um und ändert seinen Brechungsindex sowie seine Farbe. Indem





OXFORD UNIVERSITY NEWS

Die Displayfolie ist flexibel und transparent (oben) oder farbig. Je nachdem, wie die Forscher die Schichtdicken bei der Sandwichkonstruktion aus Elektroden- und Phasenwechselmaterial wählten, erzeugten sie verschiedene Farben im amorphen und kristallinen Zustand (rechts).



HOSSEINI, P. ET AL.: AN OPTOELECTRONIC FRAMEWORK ENABLED BY LOW-DIMENSIONAL PHASE-CHANGE FILMS. IN: NATURE 511, S. 206-211, 2014. FIG. 1D

sie die Dicke der transparenten Elektroden-schichten veränderten, können die Forscher steuern, in welcher Farbe die Folie unter weißem Licht erscheint.

Solche Farbbänderungen sind grundsätzlich nötig für eine Displaytechnologie. Für einen richtigen Bildschirm braucht es zudem viele Pixel nebeneinander, die sich einzeln ansteuern und umfärben lassen. Und gerade deswegen sind Phasenwechselmaterialien nun viel versprechende Kandidaten für Mikrodisplays. Mit Hilfe lithografischer Verfahren sind nämlich Pixelgrößen im Submikrometerbereich erreichbar, was eine extrem hohe Auflösung ermöglicht und viele bestehende Technologien weit übertrumpft. Bei gegenwärtigen Farbdisplays sprechen elektrische Schalter, so genannte Dünnschichttransistoren, die einzelnen Bildpunkte an und könnten auch bei der Produktion höchstauflösender GST-Displays eingesetzt werden.

Das Prinzip der Displayfolien von Hosseinis Team unterscheidet sich auf vielerlei Weise von konventionellen Bildschirmtechnologien. Das Halbleiterbauteil ist leicht zu verarbeiten und sogar biegsam. Wie die Autoren der Studie zudem an ihrem Material demonstrierten, besitzt es die besondere Eigenschaft, bistabil zu sein, also seine

Anzeige ohne ständige Stromzufuhr aufrechterhalten zu können. Das reduziert den Akkuverbrauch deutlich, ähnlich wie bei Lesegeräten für E-Books.

### Zehn Millionen Bilder pro Sekunde

Zahlreiche Einsatzbereiche erfordern hohe Bildwiederholraten, also viele Einzelbilder pro Sekunde, etwa um Animationen und Filme flüssig wiederzugeben. Folien aus GST sind äußerst schnell. Aus Speicheranwendungen ist bereits bekannt, dass Schichten aus GST in lediglich 100 Nanosekunden zwischen amorpher und kristalliner Struktur wechseln können. Umgerechnet auf einen Einsatz als Bildschirm entspräche das einer Wiederholrate von zehn Megahertz – einige zehntausendmal zügiger als die modernsten Fernsehgeräte.

Allerdings gibt es bis zur Markteinführung noch zahlreiche Hürden. Die Folie muss zunächst in Pixel unterteilt werden, für die einzelne Transistoren zuständig sind. Jeder Bildpunkt benötigt zur richtigen Zeit die richtigen Impulse. Weiterhin muss die Farbpalette der Filme erweitert werden, damit die zusammenschalteten Pixel lebendig wirkende, bunte Bilder ergeben. Wichtig ist darüber hinaus, dass das Display sattes Schwarz und helles Weiß und da-

mit insgesamt einen guten Kontrast erzeugt. Und schließlich misst sich die Leistungsfähigkeit eines Monitors auch daran, wie viele Graustufen er darstellen kann – doch gerade solche Abstufungen sind keine offensichtliche Stärke von Phasenwechselmaterialien.

Sofern es gelingt, diese Schwierigkeiten zu meistern, könnte die neue Art von Displays Bereiche jenseits dessen erschließen, was mit gegenwärtigen Technologien möglich ist. Die optoelektronische Struktur vermag dann auch mehr als nur ein Bildschirm zu sein – Einsatzbereiche als Lichtsensor, Datenspeicher oder als mikroelektronisches Bauteil erscheinen möglich. Die Fähigkeit, Bilder mit Auflösungen im Submikrometerbereich zu erzeugen, dürfte sich besonders für einige derzeit neu entwickelte Displayanwendungen eignen, beispielsweise intelligente Kontaktlinsen oder andere Strukturen, die direkt am – oder sogar im – Körper getragen werden.

**Dirk J. Broer** erforscht Polymerelektronik im Labor für organische Funktionsmaterialien an der Technischen Universität Eindhoven.

© Nature Publishing Group

[www.nature.com](http://www.nature.com)

Nature 511, S. 159–160, 10. Juli 2014

# Virengiganten aus dem Permafrost

Riesenviren sind erst seit einigen Jahren bekannt. Nun angelten Forscher sogar lange eingefrorene Exemplare aus dem sibirischen Boden: Nach 30 000 Jahren waren sie noch infektiös.

VON JOHANNES SANDER

Die späte Entdeckung der Viren verwundert wegen ihrer Winzigkeit nicht. Erstaunlicherweise werden aber ausgerechnet die größten von ihnen, die sogar unter dem Mikroskop sichtbar sind, erst jetzt gefunden. Und jeder neue Vertreter dieser Riesenviren verblüfft durch unerwartete Eigenschaften – wie nun ein jahrtausendlang gefrorenes Pithovirus.

Schon Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723) konnte Pilze und Bakterien unter dem Mikroskop beobachten. Dass manche solche Winzlinge ansteckende Krankheiten verursachen, erkannten Forscher Mitte des 19. Jahrhunderts. Der Hintergrund anderer Erkrankungen wie der Grippe oder der Pocken blieb jedoch noch lange unklar. Ein »Gift« (lateinisch: virus) – schien im Spiel zu sein. Nur wurde das merkwürdigerweise nicht schwächer, wenn man es verdünnte, schien sich also irgendwie zu vermehren. Andererseits schlüpfte dieses »Gift« damals durch jedes Filter und war auch nach seinem sonstigen Verhalten offenbar kein Mikroorganismus. Erst allmählich kamen Wissenschaftler dem Rätsel auf die Spur: ab etwa 1930 mit Hilfe von Ultrafiltern, einige Jahre später mit dem Elektronenmikroskop und seit den 1950er Jahren durch die Fortschritte in der Molekularbiologie.

Das erste Riesenvirus hatten Mikrobiologen bereits 1992 gefunden – im Wasser eines Kühlturms in England –, doch hielten sie es wegen seiner Größe für ein Bakterium. Erst gut zehn Jahre später erkannte ein Team in Marseille um Didier Raoult, Jean-Marie Claverie und Chantal Abergel den Irrtum. Es taufte diesen Erreger, der sich in Acanthamoeben, also großen Einzellern, vermehrt, Mimivirus: abgekürzt für »microbe mimicking« (imitierendes)

»virus« (*Science* 306, S. 1344–1350, 2004). Ähnliche Riesenviren, zusammen Megaviridae genannt, fanden sich in den folgenden Jahren noch weitere (siehe SdW 5/2012, S. 14). Neben ihrer Größe teilen sie andere Merkmale: ein von Fibrillen umgebenes äußeres Kapsid in Form eines Ikosaeders (20-Flächners); innere Lipidmembranen; sowie ganz im Inneren nochmals ein Nukleokapsid, das die Erbsubstanz des Virus beherbergt. Ihre DNA enthält einen relativ hohen Anteil von Nukleotiden mit den Kernbasen Adenin und Thymin.

Eine Besonderheit ist, dass sich der gesamte Vermehrungszyklus der Megaviriden im Zytoplasma der Wirtszelle abspielt, also außerhalb ihres Kerns, und zwar dank eines eigenen DNA-Replikationsapparats. Für Viren mit einem DNA-Genom ist das, bis auf wenige Ausnahmen, untypisch. Sie beanspruchen normalerweise für ihre Vermehrung die entsprechenden wirtseigenen Moleküle und Vorrichtungen sowie Prozesse, die sich im Zellkern abspielen. Hingegen vermehren sich sogenannte RNA-Viren im Zytoplasma; sie können die Maschinerie des Zellkerns ohnehin nicht nutzen.

2013 entdeckte die Arbeitsgruppe von Claverie nochmals völlig andere Riesenviren (*Science* 341, S. 281–286, 2013). Diese »Pandoraviren« sind auffällig gestaltet: Sie bilden kein Ikosaeder, sondern erinnern in ihrer gerundeten, leicht länglichen Form etwas an eine griechische Amphore mit einer vorspringenden Öffnung an einer Schmalseite. Durch diesen »Hals« gelangt die virale DNA in die Wirtszelle.

## Untypische Riesengenome

Sonstige Viren besitzen typischerweise sehr wenige, manchmal nur eine Hand voll Gene und ein äußerst sparsames Genom. Im Vergleich dazu sind die Riesenviren üppig mit Erbgut ausgestattet. Die Genomgröße der Megaviriden nimmt es immerhin mit der mancher kleiner Bakterien auf. Bei den Pandoraviren aber reicht sie sogar an die einiger Einzeller im engen Sinn heran – also an die von Organismen mit echtem Zellkern. Der Genbestand der Pandoraviren weicht überdies deutlich von dem von Mimivirus und Co. ab. Auch enthält ihre DNA reichlich Guanin und Cytosin. Ein weiterer Unterschied zu den Megaviriden: Bei den Pandoraviren um-

Virenwelt voller Überraschungen

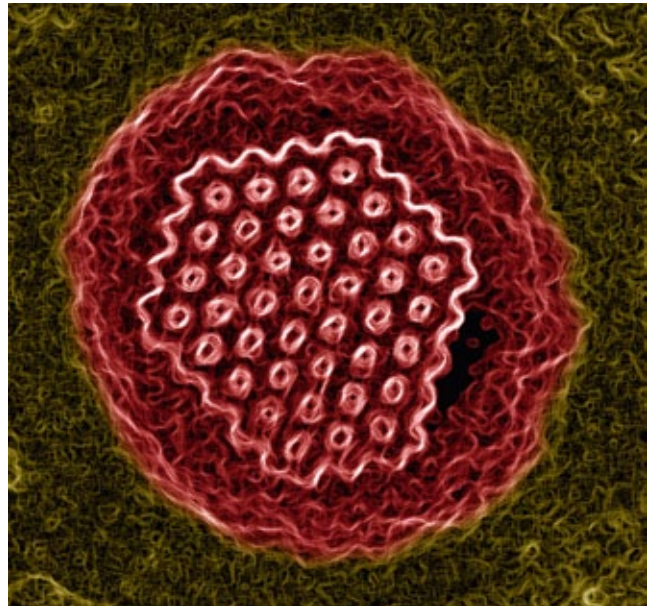
	Mimivirus	Pandoravirus	Pithovirus
Genomgröße	etwa 1200 Kilobasen	bis zu 2800 Kilobasen	etwa 610 Kilobasen
Zahl der Proteine	etwa 1200	etwa 1500–2500	etwa 500
Genomstruktur	linear	linear	linear oder zirkulär
Basenverteilung	AT-reich	GC-reich	AT-reich
Replikationsort	Zytoplasma	Zytoplasma und Zellkern	Zytoplasma
Partikellänge	400–800 Nanometer	1000 Nanometer	1500 Nanometer
Partikeldurchmesser	400–800 Nanometer	700 Nanometer	500 Nanometer

Die drei bisher entdeckten Riesenvirustypen unterscheiden sich nicht nur in ihrer Größe, im Genom und im Aussehen, sondern sogar in ihrer Vermehrungsweise beträchtlich. Auffälligerweise besitzen die besonders großen Pithoviren das kleinste Genom und die wenigsten Gene.





JULIA BARTOLI LUND, CHANTAL ABERCEL / ICS / CNRS / AMU



JULIA BARTOLI LUND, CHANTAL ABERCEL / ICS / CNRS / AMU

schließt eine äußere Kapsidhülle eine innere Lipidmembran, welche die Erbsubstanz des Virus umgibt; die innere Kapsel fehlt also.

Außerdem benötigen die Pandoraviren zu ihrer Vermehrung wohl teilweise den Zellkern der Wirtszelle, denn zumindest einige vermehrte DNA-Abschnitte von ihnen scheinen in den Zellkern zu gelangen: Es finden sich so genannte Introns, kleine, vor der Transkription in RNA und der Proteinsynthese ausgeschnittene Stücke; die dazu erforderliche Struktur steckt im Zellkern.

DNA – Desoxyribonukleinsäure – ist eine sehr reaktionsträge chemische Substanz, die sich deswegen besonders gut dazu eignet, Informationen über lange Zeiträume zu bewahren. Vor allem in Kälte erhält sich DNA anscheinend über viele Jahrtausende. Dass dann hieraus selbst ganze Organismen wiedererstehen können, zeigte kürzlich ein russisches Forscherteam: Aus über 30000 Jahre im Permafrostboden Sibiriens eingefrorenem Fruchtwewebe regenerierte es lebens- und vermehrungsfähige Exemplare des Leimkrauts *Silene stenophylla* (PNAS 109, S. 4008–4013, 2012). Diese Sensation inspirierte die Gruppe um Claverie, in ebenso lange gefrorenen Bodenproben aus Sibirien nach noch infektiösfähigen Riesenviren zu fischen. Als Köder verwendeten die Wissenschaftler die Amöbenart *Acanthamoeba castellanii*. Und tat-

Die Pithoviren aus dem sibirischen Eis erinnern in ihrer Form an eine antike Amphore, wie die Pandoraviren. Im Gegensatz zu diesen haben sie einen Deckel mit einer Struktur, deren Muster einer Bienenwabe ähnelt (rechts).

sächlich stießen sie so auf ein weiteres Riesenvirus, das sogar einen bisher noch unbekanntem Typ darstellt (PNAS 111, S. 4274– 4279, 2014).

Nur auf den ersten Blick hat dieser neue Erreger manches mit den Pandoraviren gemein. So erinnert seine Form ebenfalls an eine Amphore – weshalb die Forscher ihn *Pithovirus sibiricum* taufte (nach griechisch: pithos = Weinkrug) und einer neuen Gruppe zuordneten, den Pithoviren. Bei diesen ist die Amphorenöffnung allerdings mit einem »Korken« verschlossen, dessen bienenwabenhähnliches hexagonales Muster auffällt.

Der Replikationszyklus verläuft bei beiden Gruppen in vielem ähnlich. Eine Amöbe nimmt das Virus durch Phagozytose auf, das heißt, sie umschließt es und schnürt die entstehende membranumhüllte Blase nach innen ab. Die Pithoviren verlieren nun ihren Korken. Dann verschmilzt bei beiden Virentypen die innere Lipidmembran mit der Membran der Blase, und die virale Erbsubstanz gelangt ins Zytoplasma der Wirtszelle. Dort entsteht anschließend unter Beteiligung viraler Moleküle eine als Virenfabrik bezeichnete Struktur, die neue Viruspartikel herstellt. Solche

klar umgrenzten Produktionszonen für neue Virionen treten auch bei einigen anderen Viren auf, wohl aber nicht bei allen.

Schließlich löst sich die Wirtszelle auf, und Hunderte von neuen Partikeln kommen frei. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den drei Riesenvirusgruppen ist jedoch: Die Replikation der Pithoviren geschieht wie die vom Mimivirus und anderen Megaviren ausschließlich im Zytoplasma der Amöbe. Sie benutzen dazu also nicht auch Prozesse im Zellkern wie die Pandoraviren.

Die Genome aller drei Typen von Riesenviren unterscheiden sich stark voneinander. Das gilt sowohl für deren Aufbau und Struktur als auch für die Gene. Das Pithovirus in eine eigene, dritte Gruppe zu stellen, erscheint somit völlig gerechtfertigt. Zum Beispiel hat überhaupt nur ein Drittel seiner aus den genetischen Sequenzen erschlossenen Proteine eine erkennbare Ähnlichkeit mit bereits bekannten Proteinen von einzelligen, Bakterien oder anderen Viren, die bislang in der Datenbank des National Center for Biotechnology Information in Bethesda (Maryland) registriert sind. Lediglich fünf

Proteine weisen eine enge Verwandtschaft zu Proteinen der Pandoraviren auf. Von vielen der bei den Pithoviren neuen Proteine kennen die Forscher noch gar nicht die Funktion.

**Rätselhafte Palindrome**

Am erstaunlichsten und für ein Virus völlig ungewöhnlich ist die geringe Gendichte des Pithovirus, obwohl es besonders groß ist: Denn seine DNA enthält zahlreiche Kopien einer palindromischen Sequenz – das heißt, die beiden gepaarten Erbstränge ergeben in gegenläufiger Richtung die gleiche Abfolge an Kernbasen. Diese Sequenz war den Genetikern bisher unbekannt und kodiert nicht für Proteine. Ohne-

hin erscheinen das Genom des Pithovirus und die Anzahl seiner Gene im Vergleich zu den anderen bekannten Riesenviren recht klein.

Die Forscher erwarten, bald noch weitere neue Arten oder sogar Typen von Riesenviren aufzuspüren. Den Namen Pandoraviren wählten deren Entdecker damals bewusst auch deswegen, weil er sinnbildlich dafür steht, wie viel Unbekanntes und möglicherweise Gefährliches diese Welt bereithält, das ans Licht zu bringen überraschende Folgen haben kann. Nach der griechischen Mythologie entwichen der Büchse der Pandora alle Übel der Menschheit; zurück blieb einzig die Hoffnung. Zwar sind die jetzt in Sibirien gefundenen Pithoviren

für den Menschen harmlos. Doch niemand ahne, so betonen die französischen Forscher, was alles noch im Permafrostboden überdauere und im Zuge der Klimaerwärmung oder durch Eingriffe wie Bergbau und Ölbohrungen plötzlich wieder zu Tage käme. Neuere Studien weisen bereits auf eine stärkere Bedrohung der nördlichen Tier- und Pflanzenwelt durch Pathogene hin. Die Pithoviren könnten als Modellorganismus dazu dienen, diese Vorgänge zu erkennen und falls erforderlich geeignete Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Insofern stehen sie für die Hoffnung.

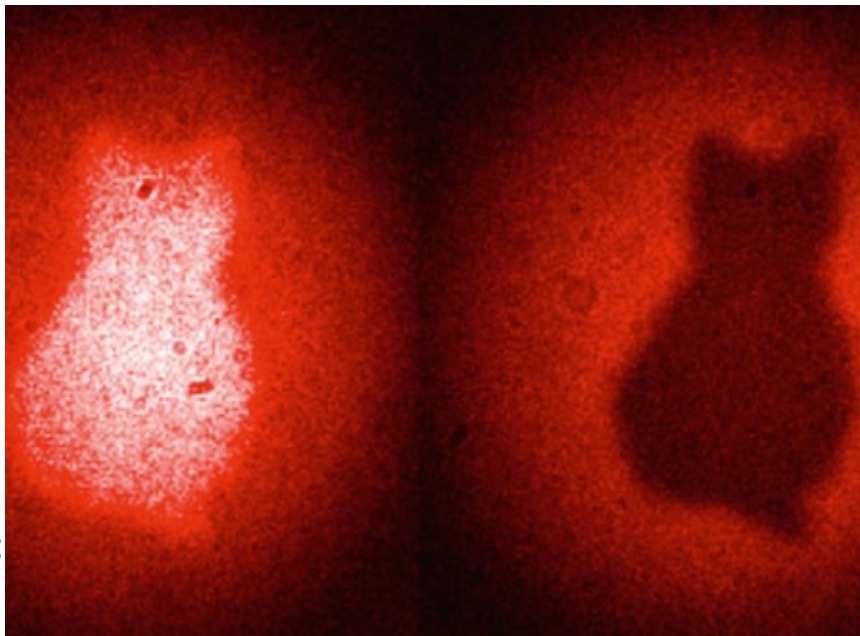
**Johannes Sander** ist promovierter Biologe und arbeitet als Wissenschaftsautor in Halver.

QUANTENBILDGEBUNG

# Bilder mit verlorenem Licht

Die bizarre Welt der Quantenphysik macht es möglich: Forscher schossen ein Foto mit Hilfe von Lichtteilchen, die nicht einmal in die Nähe des Motivs kamen.

VON DIRK EIDEMÜLLER



Obwohl die Photonen das katzenförmige Loch im Karton nie trafen, zeichneten die Laserstrahlen auf dem Detektor ein Abbild des Motivs – hell beziehungsweise dunkel, je nachdem, ob sich die Lichtwellen verstärkend oder auslöschend überlagerten.

Wer etwas sichtbar machen will, muss es beleuchten. Kein Bild ohne Licht. Dieses Grundgesetz der Optik scheint unantastbar. Was aber, wenn man die Photonen, mit denen man ein Objekt bestrahlt, in einer schwarzen Box verschwinden lässt und nicht zur Darstellung nutzt? Der gesunde Menschenverstand legt nahe, dass dann das Bild verloren ist. Doch wie ein Forscherteam um den Wiener Physiker Anton Zeilinger nun in einem ausgefeilten Experiment zeigte, erlauben es die Eigenheiten der Quantenphysik, auch in solch einem Fall noch ein Bild zu gewinnen.

»Das Neue an unserem Experiment ist, dass wir die Lichtteilchen, die auf das Objekt treffen, gar nicht detektieren«, sagt Gabriela Barreto Lemos, Erstautorin der Studie (*Nature* 512, S. 409–412, 2014). Dieses scheinbar widersprüchliche Verhalten ist nicht nur eine schlagende Demonstration quantenphysikalischer Prinzipien – es könnte auch ganz neue Abbildungsverfahren ermöglichen. Die Idee zum Experiment geht auf einen Vorschlag von Leonard Mandel und seinen Kollegen aus dem Jahr 1991 zurück.

Die Wissenschaftler um Zeilinger machten sich zu Nutze, dass sich bestimmte Quanteneigenschaften über ein ganzes System ausbreiten. Deshalb teilten sie einen Laserstrahl mehrfach



auf (siehe Abbildung rechts). Mit Hilfe spezieller optischer Bauteile gewannen sie zunächst aus grünem Laserlicht von 532 Nanometern Wellenlänge zwei grüne Teilstrahlen. Diese waren kohärent und deshalb in der Lage, zu interferieren, also Überlagerungsmuster zu erzeugen. Denn wie Wasserwellen können sich auch Lichtwellen gegenseitig verstärken oder auslöschen. Dies geschieht bei Licht, wenn sich beide Strahlen sehr präzise wieder vereinen. Nach den Gesetzen der Quantenphysik treten Überlagerungseffekte aber nur auf, wenn man den wieder zusammengeführten Strahlen nicht ansehen kann, welchen Weg sie genommen haben. Hätte man einen der beiden Strahlen etwa dazu benutzt, ein Objekt zu durchleuchten, wäre keine Interferenz mehr möglich gewesen.

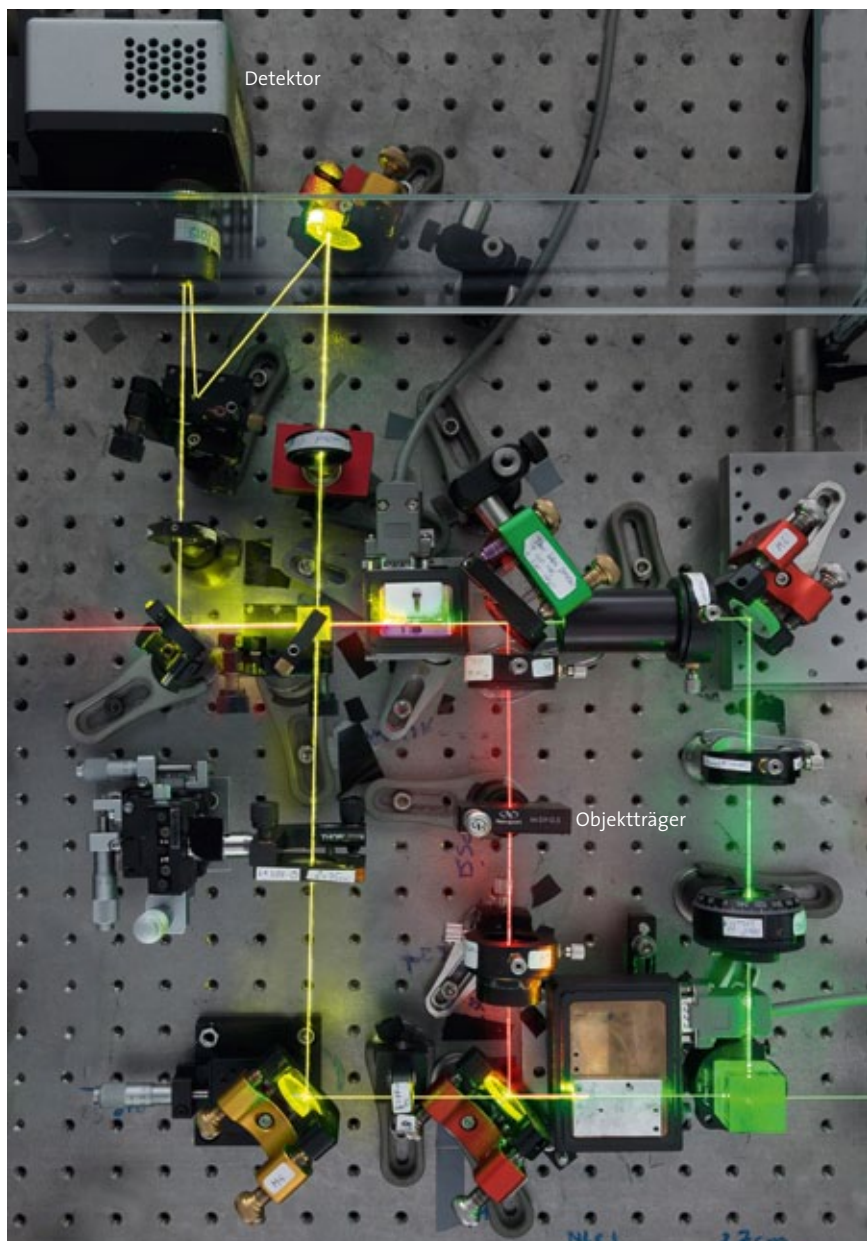
### Ein Motiv, auf viele Wege verteilt

Genau dies war nun der Clou bei dem Experiment: Die Forscher teilten die beiden grünen Strahlen nochmals auf. In jedem der Lichtwege gewannen sie mit Hilfe so genannter nichtlinearer optischer Kristalle zwei Strahlen unterschiedlicher Frequenz: Je einer lag im Infraroten, der andere an der Grenze zwischen Rot und nahem Infrarot, der Einfachheit halber als »roter Strahl« bezeichnet.

Die verschiedenfarbigen neuen Teilstrahlen, der rote und der infrarote, sind miteinander verknüpft, da sie gemeinsam erzeugt wurden. Die Information, die Licht transportieren kann, verteilt sich hier deshalb über beide Lichtstrahlen.

Die jeweils roten Strahlen liefen nun außen um das Untersuchungsobjekt herum und hatten mit diesem keinen Kontakt. Am Ende der Apparatur kamen die roten Photonen in einer Interferenzschaltung wieder zusammen.

Einen der beiden infraroten Teilstrahlen lenkten die Forscher aber auf das Objekt, ein in Karton geschnittenes Loch mit dem Umriss einer Katze, und zwar so, dass der Kontakt mit dem Pappmodell im Strahl eine Phasenverschiebung hervorrief. Diesen Strahl



Der Strahlengang des Experiments, hier nachgestellt mit sichtbarem Laserlicht. Rechts unten läuft ein grüner Strahl ein, wird geteilt und anschließend in verschiedene Farben umgewandelt. Der mittlere, rote Strahl durchquert einen Objekträger, wird dann aber aus dem Aufbau gelenkt, ohne den Detektor (links oben) zu treffen. Obwohl die gelben Strahlen das Objekt nie durchliefen, können sie es abbilden, da sie gemeinsam mit den roten erzeugt wurden und daher quantenmechanisch verknüpft sind.

kombinierten sie später wieder mit dem anderen infraroten Teilstrahl, der mit dem Objekt nicht in Berührung gekommen war. Dabei legten sie die beiden infraroten Strahlen so exakt übereinander, dass beide ununterscheidbar wurden. Man konnte also grundsätzlich nicht mehr bestimmen, ob ein Lichtteilchen in diesem Strahl durch die Kat-

zensilhouette gegangen war oder außen herum.

»Das infrarote Photon durchleuchtet das Objekt. Danach trägt es das Bild nicht allein, sondern gemeinsam mit dem roten Photon«, erklärt Zeilinger. Das ist die Konsequenz aus der quantenphysikalischen Verknüpfung der beiden Photonen durch ihre gemeinsa-

me Erzeugung. »Keines trägt für sich allein das Bild. Danach werden die beiden Wege der infraroten Photonen ununterscheidbar gemacht. Dadurch trägt jetzt das rote Photon das Bild allein, obwohl es nie das Objekt sah.« Bei den beiden roten Photonen trat infolge dieses Quanteneffekts eine Phasenverschiebung auf, mit deren Hilfe die Forscher die Katze per Interferenz abbilden konnten. Für die Abbildung in der Kamera benötigten die Forscher also nur noch die roten Strahlen; den kombinierten Infrarotstrahl lenkten sie mit einem speziellen Spiegel aus der Apparatur.

Das Interessante an dem Effekt ist, dass er auf der prinzipiellen Unmöglichkeit beruht, den Weg der infraroten Photonen zu bestimmen. Liegen die beiden infraroten Teilstrahlen nicht nahezu perfekt übereinander, tragen sie selbst noch die Information, und die roten Strahlen erzeugen kein Katzenbild.

Erst indem die Forscher die Bildinformation aus den infraroten Strahlen tilgten, konnten sie die roten dazu bringen, das Objekt darzustellen. Damit ist es ihnen gelungen, eine Abbildung mit Hilfe von Photonen zu erzeugen, die keinen direkten Kontakt mit dem Objekt hatten.

### Fotografieren mit dem am besten geeigneten Licht

Sein Verfahren funktioniert im Prinzip bei allen Wellenlängen, so Zeilinger. »Man kann ein Objekt fotografieren, indem man es mit Licht bestrahlt, das vom Ultravioletten über das Infrarote vielleicht sogar bis zur Terahertzstrahlung reicht, während man das Bild bei einer frei gewählten Wellenlänge aufzeichnet, für die es leistungsfähige Detektoren gibt.« Man könnte mit diesem Quantentrick also Bilder in Wellenlängenbereichen aufnehmen, für die es keine oder zu wenig empfindliche Ka-

meras gibt. Im Infraroten etwa gibt es noch keine Detektoren, die jedes einzelne Lichtteilchen aufzeichnen.

Die Forscher testeten die Methode auch an weiteren Untersuchungsobjekten. So ersetzten sie die Kartonkatze einmal durch ein Siliziumplättchen, in das sie den Umriss einer Katze geätzt hatten. Dieses Material ist für infrarotes, nicht jedoch für rotes Licht durchlässig. Dann verwendeten sie eine Probe aus Silikatglas mit einer Vertiefung, die im roten Licht nicht nachweisbar gewesen wäre, im infraroten jedoch schon. In beiden Fällen konnte das anschließend »weggeworfene« Infrarot das Objekt so abtasten, dass das rote Licht schließlich ein gutes Bild in der Kamera erzeugte – auch wenn die roten Photonen in beiden Fällen für eine direkte Abbildung untauglich gewesen wären.

**Dirk Eidemüller** ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.



**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT  
VERLAG

## DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT

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

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

Ort: Heidelberg  
Preis: € 139,- pro Person;  
Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-



Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit:

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

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen.



# Neue Nervenzellen demontieren alte Erinnerungen

Das Gehirn produziert täglich frische Zellen und fügt diese in bereits bestehende Neuronennetze ein. Das wirkt sich jedoch auf das Gedächtnis aus.

VON KATHARINA MÜLLER

Neue Nervenzellen entstehen bei Säugetieren nur bis relativ kurz nach der Geburt – davon waren Neurowissenschaftler bis in die 1990er Jahre hinein überzeugt. Heute weiß man, dass auch erwachsene Gehirne neuronalen Nachwuchs produzieren. Allerdings findet diese »adulte« Neurogenese in geringerem Ausmaß als die embryonale statt und in nur zwei verschiedenen Gehirnarealen: im Riechkolben und im Gyrus dentatus, der Eingangsstation des Hippocampus (siehe Bild rechts). Letztere Hirnstruktur sitzt tief innen im Schläfenlappen und sorgt maßgeblich dafür, dass Erinnerungen entstehen und wieder abgerufen werden können. Außerdem ist der Hippocampus eine wichtige Schaltstelle beim Lernen und räumlichen Orientieren. Damit stellt sich aber die Frage, wie sich die neu gebildeten Nervenzellen auf all diese Funktionen auswirken.

Auf der Suche nach einer Antwort untersuchten bereits vor einigen Jahren Amar Sahay – damals an der Columbia University in New York – und sein Team die Lernfähigkeit von erwachsenen Mäusen, bei denen die Forscher die Neurogenese mittels Genmanipulation verstärkt hatten (*Nature* 472, S. 466–473, 2011). Sie unterzogen die Nager einer so genannten Angstkonditionierung: Über neun Tage hinweg versetzten sie ihnen jeden Tag in einem den Tieren bisher unbekanntem Käfig A kurze elektrische Schocks. Danach kamen die Mäuse in einen ähnlich aussehenden, aber anders riechenden Käfig B, in dem ihnen nichts geschah. Die Forscher maßten anhand der Angstreaktion der Nager – ein Erstarren in Erwartung vor dem Elektroschock –, wie gut diese zwischen der »gefährlichen« und der

»harmlosen« Umgebung unterscheiden konnten.

Anfangs hatten alle Tiere vor beiden Käfigen gleich viel Respekt. Nach durchschnittlich neun Tagen hatten die Mäuse mit normaler Neurogenese gelernt, dass sie sich vor Käfig B nicht zu fürchten brauchten. Denjenigen mit verstärkter Zellneubildung war das aber im Mittel bereits ab dem vierten Tag klar!

Die neuen Zellen helfen anscheinend dabei, zwischen ähnlichen neuronalen Erregungsmustern zu unterscheiden – und somit ein abweichendes Erlebnis als eigene Erinnerung abzuspeichern. Wie genau sie das machen, ist jedoch nicht ganz klar. Laut einer möglichen Erklärung sind sie anpassungsfähiger als reifere Nervenzellen, die sich in ihren Reaktionen bereits auf einen bestimmten Reiz festgelegt haben.

## Wie lange hält das Gedächtnis?

So weit zum Effekt der Neurogenese auf das Abspeichern von Erinnerungen. Inwiefern sie auch ihren Abruf beeinflusst, untersuchte ein Team um Katherine Akers von der University of Toronto (*Science* 344, S. 598–602, 2014). Wieder konditionierte man die Mäuse darauf, einen bestimmten Käfig mit einer schmerzhaften Erinnerung zu assoziieren. Dieses Mal sollten sie jedoch nicht zwischen diesem und einer ungefährlichen Umgebung unterscheiden. Stattdessen testeten die Forscher, wie lange den Nagern das unangenehme Erlebnis in Erinnerung blieb. Dazu verfrachteten sie die Tiere am nächsten Tag wieder in besagten Käfig, wo ihnen diesmal jedoch nichts geschah. Dann maßten sie die Angstreaktion. Über 28 Tage hinweg wiederholten sie das einmal pro Woche.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANNA

Einer der wenigen Orte des erwachsenen Gehirns, in dem noch neue Nervenzellen entstehen, ist der Hippocampus (blau) im Schläfenlappen. Was bewirken sie?

Dabei verglichen sie die Reaktionen der jüngeren und älteren Tiere miteinander. So konnten sie den Einfluss der Neurogenese auf das Gedächtnis untersuchen. Denn ähnlich dem Menschen kommen Mäuse noch nicht mit vollständig entwickeltem Gehirn zur Welt, wodurch sich in ihren ersten Lebenswochen viel mehr neue Neurone bilden als bei älteren Nagern.

Die Tiere, die im Erwachsenenalter konditioniert wurden, erstarrten an jedem der vier Testtermine gleichermaßen vor Angst. Jungmäuse hingegen fürchteten sich lediglich am ersten Tag. Bereits in der zweiten Woche hatten sie scheinbar jegliche Erinnerung an die schmerzhaft Erfahrung verloren. Die neuen Nervenzellen ließen sie demnach neue Informationen schneller wieder vergessen.

Damit war aber noch nicht klar, welche Leistung des Gedächtnisses die neuen Nervenzellen beeinträchtigen: das Abspeichern oder das Abrufen einer Information. Um das zu überprüfen, konditionierten die kanadischen Forscher eine andere Gruppe erwachsener Mäu-



## Eigensinnige Hummeln

### Warum ein Staat Individualisten braucht.

Im Vergleich zur Honigbiene spielt die Hummel für uns Menschen nur eine bescheidene Rolle. Während Imker seit Jahrtausenden den hoch organisierten Bienenstaaten Körbe und Kästen anbieten, um ihnen Wachs und Honig abzuluchsen, wurden die pummeligen Verwandten lange sich selbst überlassen – auch von der Wissenschaft. Der Verhaltensforscher Karl von Frisch (1886–1982) erhielt 1973 den Nobelpreis für die Erforschung der Tanzsprache, mit der Honigbienen einander detailliert über Richtung und Entfernung von Quellen ergiebigen Blütennektars informieren. So etwas hat die Hummel nicht zu bieten.

Immerhin schwirren und tänzeln auch Hummeln aufgeregt durch das Nest, wenn sie von erfolgreicher Nahrungssuche heimkehren, und verbreiten dabei den im Pelz mitgebrachten Blumenduft. Er wirkt auf die Artgenossen als – gegenüber dem Tanz der Honigbiene allerdings unpräzise – Aufforderung: Irgendwo dort draußen gibt es eine Nektar spendende Blumenart, die so duftet wie ich; worauf wartet ihr noch?

Erst seit einigen Jahren interessieren sich Verhaltensforscher dafür, was die animierten Hummeln dann unternehmen. Es stürzen nämlich keineswegs alle Tiere als kompakter Schwarm aus dem Bau, um die per Duft signalisierte Nektarquelle aufzuspüren. Stets ignorieren mehrere Individuen die Botschaft und machen sich auf den Weg zu anderen Blumensorten und -orten, die sie von früher her kennen; sie vertrauen mehr auf die eigene Erinnerung, statt sich von der allgemeinen Aufregung über neu gefundene Blüten anstecken zu lassen.

**Warum tun Hummeln das?** Wie die britischen Biologinnen Ellouise Leadbeater und Claire Florent vermuten, ist es angesichts der ungenauen Information über das neue Blumenareal ganz sinnvoll, dass nicht gleich sämtliche Hummeln losziehen, um es auf gut Glück zu finden, sondern dass einige sich auf gesicherte ältere Erfahrung verlassen (*Behavioural Ecology and Sociobiology* 68, S. 1145–1150, 2014).

Aber nicht nur konservative Eigenbrötler nutzen dem Hummelstaat, sondern auch Individuen, die quasi schwer von Begriff sind. Der kanadische Hummelforscher Nigel Raine und seine Doktorandin Lisa Evans untersuchten zunächst im Labor, wie schnell Hummeln lernen, eine bestimmte Farbe mit der Belohnung durch Nektar zu assoziieren. Sie entdeckten enorme Unterschiede: Begriffsstutzige Tiere sammeln bis zu 40 Prozent weniger von dem süßen Blütensaft. Doch wenn die langsam Lernenden mit einer Kolonie ins Freie ausschwärmen durften, hatte dieser gemischte Schwarm draußen mehr Erfolg als einer, der nur aus overschlauen Individuen bestand (*Journal of Comparative Physiology* 200, S. 475–484, 2014).

Anscheinend profitiert eine auf unvollständige Information angewiesene Gruppe von Mitgliedern, die zwar langsamer als andere aus Erfahrungen lernen, aber gerade durch ihre Fehler neue Erfahrungen machen, die der Gemeinschaft zugutekommen. Dafür bietet das Tierreich zahlreiche Beispiele, unter Insekten wie unter Vögeln (*Science* 345, S. 609–610, 2014).

Und beim Menschen? Unter meinen Bekannten gelten einige als eher unpraktisch und sozial ungeschickt. Sie sind oft mit ihren Gedanken woanders und merken erst spät, wenn man sich über sie lustig macht. Doch zugleich sind das originelle Personen mit überraschenden Ideen und kreativen Fähigkeiten. Man kennt ja den Typ des zerstreuten Professors, der in jungen Jahren die meiste Zeit über Büchern hockt. Er ist in Gesellschaft unsicher, kann dafür aber über entlegene Themen Auskunft geben. Solche Eigenbrötler, die in mancher Hinsicht schwer von Begriff sind, bereichern nicht nur den Hummelstaat.



Michael Springer

se und regten erst direkt danach die Bildung neuer Nervenzellen an, indem sie ihnen ein intensives Lauftraining verpassten. Nach sieben Tagen im Laufrad hatten sich tatsächlich vermehrt frische Nervenzellen im Gyrus dentatus gebildet; nach insgesamt vier Wochen formten diese bereits neue Nervenzellkontakte (Synapsen) im Hippocampus.

Insgesamt sechs Wochen nach der Konditionierung untersuchten die Forscher das Verhalten der Mäuse: Diese reagierten weniger furchtsam auf den »Schockkäfig« als ihre Artgenossen, die kein Lauftraining absolviert hatten. Die Neurogenese beeinträchtigt demnach vor allem das Abrufen einer Erinnerung, argumentiert Akers.

### Neuronale Störenfriede

Anscheinend verdrängen also neue Nervenzellen alte Erinnerungen. Das passiert womöglich, indem sich die zusätzlichen Neurone in bereits vorhandene Verbindungen zwischen dem Gyrus dentatus und der nächsten Verarbeitungsschicht im Hippocampus einzwängen und diese neu verschalten. Damit zerstören sie den »Abdruck« einer alten Erinnerung im hippocampalen neuronalen Netzwerk. Wenn eine Erinnerung abgerufen wird, feuert nämlich immer genau die gleiche Population Neurone in der gleichen Verschaltung. Drängt sich nun ein neues Neuron in dieses Netz hinein, verändert es das Muster und beeinträchtigt damit auch die Erinnerung.

An Menschen werden solche Experimente natürlich nicht durchgeführt. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass Neurogenese ganz ähnliche Effekte auf das menschliche Gedächtnis haben könnte: Ein Team um Craig Stark von der University of California in Irvine hatte beispielsweise schon 2008 mehr neuronale Aktivität zwischen dem Gyrus dentatus und dem übrigen Hippocampus beobachtet, wenn Probanden zwischen Objekten unterschieden, die sich stark ähnelten (*Science* 319, S. 1640–1642, 2008).

**Katharina Müller** hat Cognitive Science studiert und ist Wissenschaftsjournalistin in Amsterdam.



BMW i3 und i8 +++ Die Zukunft der Elektromobilität  
+++ Nachhaltig innovativ +++ Mit Carbonkarosserien  
+++ Für weniger Emissionen +++ Und mehr Fahrfreude  
+++ Durch größere Gewichtsreduzierung +++ Die  
BMW Group +++ Der erste Automobilhersteller +++  
Der Carbon in Großserie produziert

Mehr erfahren unter:

[BMWGROUP.COM/WHATSNEXT](http://BMWGROUP.COM/WHATSNEXT)

# WARUM WIR BEI UNSEREN AUTOS AUF LEICHTBAU SETZEN? WEIL ES IMMER WENIGER BRINGT.

KONTINUIERLICH WENIGER EMISSIONEN DURCH INNOVATIVE MATERIALIEN.  
FÜR UNS DER NÄCHSTE SCHRITT.

**BMW  
GROUP**



Rolls-Royce  
Motor Cars Limited



# Zum Jagen geboren

Ein wichtiger Faktor bei der evolutionären Entwicklung des Menschen war, Fleisch zu essen. Seit wann unsere Vorfahren regelmäßig Tiere erlegten, ist unsicher. Doch anscheinend erwarben sie manche Voraussetzungen dafür viel früher als gedacht.

Von Kate Wong



Eine Anhöhe über einem großen See im ostafrikanischen Grabenbruch. Einige Jäger hauen Stücke von schwarzgrünem Vulkanglas sorgsam zu kleinen scharfen Spitzen mit Schneidkanten zurecht. Diese Klingen befestigen sie an langen hölzernen Schäften – fertig ist ein hocheffektiver Wurfspeer.

Szenen wie diese müssen sich in Ostafrika schon vor mehreren hunderttausend Jahren abgespielt haben, wie eine rund 280 000 Jahre alte Fundschicht in Äthiopien in der Grabungsregion Gademotta zeigt: Dort kamen derartige Steinspitzen zu Tage. Solche Wurfspeere bedeuteten eine technologische Revolution für die frühen Menschen. Mit ihnen vermochten sie Tiere leichter aus der Distanz zu überwältigen als mit reinen Holzspeeren. Damit erweiterten sie das Spektrum an möglicher Beute und verringerten das eigene Verletzungsrisiko, wenn sie große, wehrhafte Arten, vielleicht sogar Flusspferde erlegten.

Sicherlich war solch ein Jagdspeer damals der Gipfel der Technik. Das eigentlich bemerkenswerte daran ist allerdings die Vielzahl an Entwicklungsschritten unterschiedlichster Art, die dieser Erfindung vorausgingen, bis Menschen schließlich so weit waren, eine derartige Konstruktion überhaupt zu erdenken, anzufertigen und tatsächlich zu gebrauchen. Dazu mussten im Lauf von zehntausenden Generationen viele neue körperliche Anpassungen zusammenkommen. Sie rüsteten unsere Vorfahren nach und nach immer besser für das Beschaffen von Fleisch aus.

In einer Zeit der Supermärkte und des Fast Food vergessen wir leicht, dass der Mensch der geborene Jäger ist. Langsam und schwach, ohne Raubtierzähne und Krallen, sieht er nicht danach aus. Doch schon lange bevor er Tieren mit Fahrzeugen und Gewehren nachstellte, wurde er zum bedrohlichsten Raubtier auf Erden.

Vor ein paar Jahrmillionen ernährten sich unsere – bereits aufrecht gehenden – Australopithecinen-Vorfahren noch

Schon der *Homo ergaster* – der afrikanische *Homo erectus* – muss ein guter Jäger gewesen sein, der mit Wurfaffen zu hantieren verstand. Dies deutet sein Schulterbau an, hier zu sehen am 1,6 Millionen Jahre alten Skelett des »Turkana-Jungen« aus Kenia.



## AUF EINEN BLICK

## WURFGESCHICK ALS SPEZIELLE ANPASSUNG

**1** Frühe Menschen verlegten sich wesentlich eher auf das **Jagen** als bislang vermutet. Schon **vor zwei Millionen Jahren** töteten unsere Vorfahren regelmäßig Tiere.

**2** In unserer Evolution gingen **anatomische Anpassungen** an das Leben als Jäger Hand in Hand mit dem Erschaffen immer **effektiverer Jagdwaffen**. Diese funktionierten zunehmend aus sicherer Distanz.

**3** Ein Hauptmerkmal des Menschen gegenüber anderen Primaten ist, mit großer Kraft **weit und gezielt werfen** zu können. Dazu hat sich besonders der **Schulterbau** verändert.

hauptsächlich von Pflanzen. In ihre Verwandtschaft gehörte die ostafrikanische Art *Australopithecus afarensis* mit der berühmten »Lucy«. Doch schon früh bildeten sich erste Voraussetzungen für ein späteres Jägerdasein heraus. Denn vieles, worin wir uns von den heutigen Menschenaffen unterscheiden, dürfte unter anderem eine Anpassung an eine solche Lebensweise darstellen – von der Fähigkeit zum ausdauernden Laufen bis zum großen Gehirn. Neuere Forschungen erhellen nun sogar einige bislang unklare Vorgänge in unserer Vergangenheit. Sie lassen zum Beispiel ahnen, wann sich unser Wurfarm mit seiner besonderen Arm- und Schulterkonstruktion entwickelte – eine Voraussetzung zum Speere werfen – oder wann Großwildjagd einsetzte.

## Anpassung an trockeneres Klima

Vor etwa drei Millionen Jahren standen die Homininen (menschennähnliche Primaten) evolutionär an einem Scheideweg. Infolge des trockener werdenden Klimas wichen in weiten Regionen Afrikas Wälder und dichte Gehölze offenen Graslandschaften. Damit veränderte sich das Nahrungsangebot: Früchte und zartes Blattgrün wurden rarer. An die neuen Bedingungen passten sich die Homininen auf verschiedene Weise an. Manche von ihnen, vor allem die späteren »robusten« Australopithecinen, entwickelten massive Kiefer und Zähne, mit denen sie anscheinend Gräser und andere harte Pflanzenkost gut zermahlen konnten. Eine andere Linie – aus der die Gattung *Homo* hervorging – schlug einen völlig anderen Weg ein. Diese Homininen verzehrten in zunehmender Menge tierische Proteine und Fette. Beide Lösungen bewährten sich lange nebeneinander. Doch vor einer Million Jahren waren die robusten Arten ausgestorben.

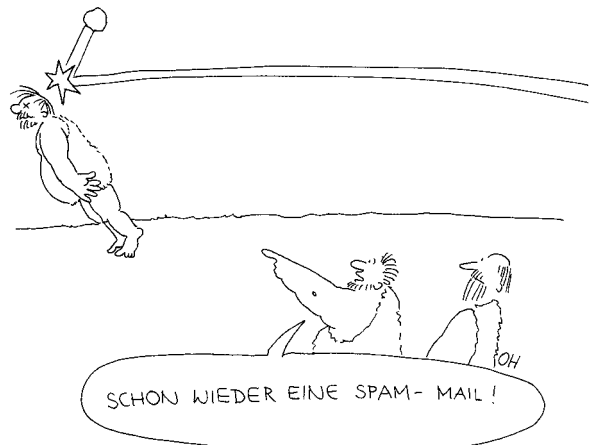
Warum sie verschwanden, wird sich vielleicht nie völlig klären lassen. Es könnte sein, dass ihre spezialisierte Lebensweise ihnen nicht erlaubte, sich nochmals auf andere Kost umzustellen, als sich Klima und Umwelt weiter veränderten. Oder vielleicht wurden sie nun von der Gattung *Homo* verdrängt. Um so deutlicher erweist sich für diese Phase: Die *Homo*-Linie hatte mit der Hinwendung zu tierischer Nahrung einen sehr erfolgreichen Weg gewählt.

Eine Reihe anatomischer Anpassungen machte diese unsere Vorfahren zu ernstlichen Konkurrenten der Säbelzahn-

katzen und anderer großer Raubtiere der afrikanischen Savannen, die dort bisher unangefochten geherrscht hatten (siehe SdW 7/2014, S. 34). Zum Beispiel kann ein Mensch auf seinen zwei Beinen im Vergleich zu anderen Raubtieren zwar nicht besonders schnell sprinten – aber das macht er mit seinem hohen Ausdauervermögen wett, das den anderen Arten und oft auch den Beutetieren in der Regel fehlt. Ein Mensch könnte ein Pferd im Marathon schlagen. Ähnliches leistet kein anderer heutiger Primat auch nur annähernd. Laut Daniel Lieberman von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und Dennis Bramble von der University of Utah in Salt Lake City könnten frühe Menschen ihre Beute bis zur völligen Erschöpfung getrieben haben. Fossilien zeigen, dass die hierfür wichtigen anatomischen Voraussetzungen im Körperbau – unter anderem Beine mit kurzen Zehen, großen Gelenkoberflächen und einer langen Achillessehne – bereits vor etwa zwei Millionen Jahren entstanden. Schon damals dürften Menschen immer mehr zu Ausdauerläufern geworden sein.

Das erforderte auch eine besondere physiologische Ausstattung. Bei andauernder intensiver Bewegung überhitzt der Körper rasch, wenn er die Wärme nicht irgendwie los wird. Uns kühlt stark wasserhaltiger Schweiß, der auf nackter Haut schnell verdunsten kann. Nina Jablonski von der Pennsylvania State University in University Park vermutet, dass der *Homo ergaster* (auch afrikanischer *H. erectus* genannt) vor 1,6 Millionen Jahren schon kein Fell mehr besaß, aber eine Menge Schweißdrüsen zum starken Schwitzen (siehe SdW 10/2010, S. 60).

Doch all diese Anpassungen hätten den frühen Menschen bei der Jagd nicht viel gebracht, wenn ihm Möglichkeiten fehlten, das gehetzte Tier am Ende zu erlegen – und das vorzugsweise aus einiger Distanz, also am besten indem man es mit einem geworfenen schweren oder scharfen Gegenstand trifft. Aber brachte der frühe *Homo* dieses Kunststück wirklich schon fertig? Der moderne Mensch vermag ein Ziel aus einiger Entfernung mit ziemlicher Wucht genau zu treffen. Im Vergleich dazu wirken Schimpansen beim Werfen geradezu täppisch. Einen kraftvollen, weiten, gut gezielten Wurf ermöglicht unter anderem der spezielle menschliche Schulterbau: Im präzisen Zusammenspiel mit dem übrigen Körper



gewinnen unsere Arm- und Schultermuskeln viel elastische Energie und setzen sie blitzschnell in kinetische Energie um, wie Neil T. Roach von der George Washington University und seine Kollegen kürzlich beschrieben.

Die Forscher untersuchten die Dynamik des Werfens und die beteiligten anatomischen Strukturen bei Studenten, die Baseball spielten. Besonders drei deutliche anatomische Unterschiede des Menschen zu Schimpansen fielen ihnen auf: die lange, bewegliche Taille, die eine viel stärkere Rotation um die Körpermitte erlaubt; der in der Längsrichtung weniger in sich gedrehte Oberarmknochen und die nicht nach oben, sondern zur Seite weisende Schulterpfanne, wodurch sich die Drehung des Arms der des Körpers überlagert. Diese Komponenten vergrößern den Bewegungsradius und den Schwung beim Werfen beträchtlich. So lässt sich wesentlich mehr elastische Energie aufbauen und ans Wurfgeschoss abgeben als bei einem Menschenaffen.

Das Team entdeckte auch, wann diese Merkmale in der Menschenevolution aufgetreten waren. Fossilien von Früh- und Vormenschen zeigen, dass sich die verschiedenen Anpassungen nicht alle gleichzeitig ausbildeten: Eine längere Taille und einen weniger gedrehten Oberarmknochen wie-

sen demnach schon Australopithecinen auf, aber die seitlich stehende Schulterpfanne kam erst vor ungefähr zwei Millionen Jahren in der menschlichen Gattung hinzu.

Inwieweit sich die einzelnen anatomischen und physiologischen Merkmale von Anfang an unter Bedingungen entwickelten, die etwa ausdauernderes Laufen beziehungsweise geschickteres Werfen begünstigten, lässt sich nicht sagen. Möglicherweise entstanden manche dieser Eigenschaften zunächst für andere Zwecke – und erst später erwies sich, dass sie vorzüglich in den neuen Zusammenhang passten. Die lange Taille etwa dürfte ursprünglich eine Anpassung an den aufrechten Gang gewesen sein. Nachträglich kam offenbar die Funktion hinzu, dem Wurf durch eine Drehung um die Körpermitte noch mehr Schnellkraft zu verleihen.

Als Triebfeder hinter dem Umbau der Schulter vor zwei Millionen Jahren vermutet Roach allerdings tatsächlich Selektionskräfte, die auf die Fähigkeit zu werfen gerichtet waren. Denn mit solchen Schultern und Armen konnten unsere Vorfahren schlechter Bäume erklimmen. Frühere Homini- nen hatten im Geäst außer Nahrung sicherlich oft auch Zu- flucht vor Raubtieren gefunden. »Das mühelose Erklettern von Bäumen gibt einer nur auf, wenn er im Gegenzug etwas

ISTOCKPHOTO / IMAGE SOURCE



Mindestens vor einigen hunderttausend Jahren haben Menschen den Wurfspeer erfunden. Ans Werfen waren unsere Schultern bereits vor zwei Millionen Jahren angepasst.

gewinnt«, mutmaßt Roach. Und von Vorteil war wohl nicht nur der Aspekt, dass die gehaltvolle tierische Nahrung nun leichter zugänglich wurde. Denn mit einem gut gezielten Wurf konnte man auch lästige Raubtiere vertreiben, die einen bedrohten oder einem Beute streitig machten.

### Frühe Zeugnisse der Jagd

Doch haben die frühen Menschen wirklich schon vor zwei Millionen Jahren routinemäßig selbst Tiere erlegt? Belege dafür sind nicht leicht zu finden. Steinwerkzeuge und Kerben auf Tierknochen von vor 2,6 Millionen Jahren lassen annehmen, dass Homininen in dieser noch früheren Phase zumindest schon Tiere zerteilten. Allerdings könnten diese genauso gut durch Raubtiere oder anders zu Tode gekommen sein.

Noch bis vor wenigen Jahren lieferten die viel jüngeren hölzernen Wurfspeere von Schöningen den frühesten unzweifelhaften Beweis, dass Menschen selbst jagten, in diesem Fall Pferde. Die acht schlanken Speere, die mitsamt Spitze aus den Stämmchen junger Bäume gefertigt wurden und hervorragende Wurfeigenschaften hatten, fanden Archäologen in den 1990er Jahren in einer Braunkohlegrube nördlich des Harzes zusammen mit anderen Jagdwaffen und zahlrei-

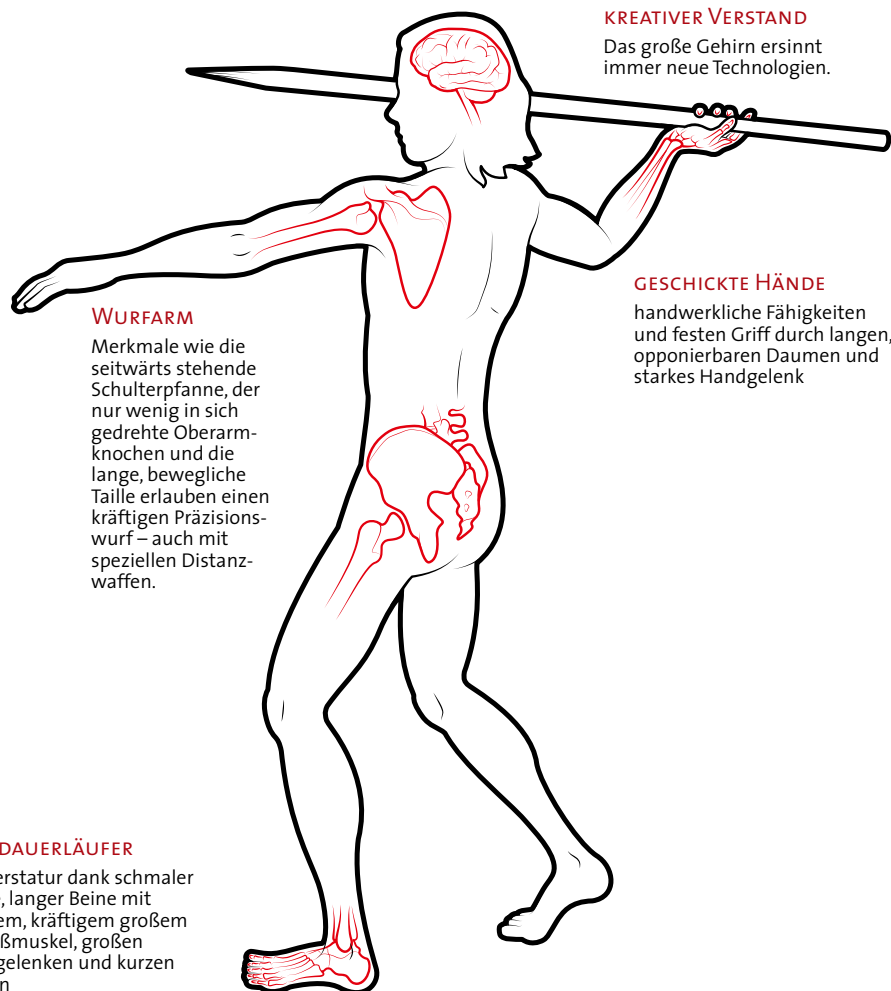
chen Tierknochen. Nach aktuellen Berechnungen sind sie rund 300 000 Jahre alt. Die eingangs beschriebenen Funde aus Ostafrika lassen vermuten, dass manche Menschengruppen zu dieser Zeit bereits Speere mit Steinspitzen anzufertigen wussten. Eine noch umstrittene neue Studie verlegt den Beginn dieser Technologie für Südafrika sogar deutlich weiter zurück, auf etwa eine halbe Million Jahre vor unserer Zeit (siehe S. 31, Bild 3).

Dass noch wesentlich davor ein früher *Homo* bereits selbst auf die Jagd ging, zeichnet sich erst seit einigen Jahren ab. An verschiedenen Orten Ostafrikas finden sich aus dieser Phase Massenansammlungen von Tierknochen, die Schlachtsuren und andere Zeichen von Werkzeuggebrauch aufweisen.

Einer jener Fundorte liegt in der Olduwaischlucht in Tansania und ist als FLK Zinj bekannt (nach dem dort um 1959 gefundenen »Zinjanthropus«, später *Paranthropus boisei* genannt). Vor rund 1,8 Millionen Jahren müssen Frühmenschen Gnus, Wasserböcke und andere große Säugetiere dorthin geschleppt und sie dann zerlegt haben. Bereits in den 1960er Jahren grub die Paläoanthropologin Mary Leakey den Großteil der jetzt neu untersuchten Tierknochen aus – und

## Raubtier Mensch

**Auf den ersten Blick** passt die menschliche Anatomie kaum zu der eines Raubtiers. Starke Krallen, wehrhafte Zähne und große Körperkraft fehlen ebenso wie die Fähigkeit zum blitzschnellen Sprint. Das machen andere Eigenschaften mehr als wett, von denen hier einige angedeutet sind – wie das Talent zum Werfen und damit Beute auf Distanz zu erlegen sowie die große Ausdauer beim Laufen, mit der Opfer zu Tode gehetzt werden konnten.



**WURFARM**  
Merkmale wie die seitwärts stehende Schulterpfanne, die nur wenig in sich gedrehte Oberarmknochen und die lange, bewegliche Taille erlauben einen kräftigen Präzisionswurf – auch mit speziellen Distanzwaffen.

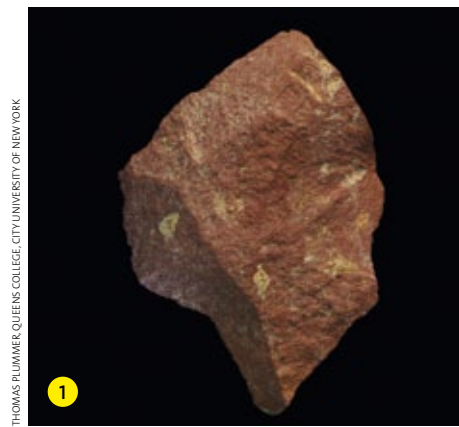
**KREATIVER VERSTAND**  
Das große Gehirn ersinnt immer neue Technologien.

**GESCHICKTE HÄNDE**  
handwerkliche Fähigkeiten und festen Griff durch langen, opponierbaren Daumen und starkes Handgelenk

**AUSDAUERLÄUFER**  
Läuferstatur dank schmaler Taille, langer Beine mit langem, kräftigem großem Gesäßmuskel, großen Beingelenken und kurzen Zehen



Die frühesten Indizien dafür, dass Menschen Tiere erlegten, stammen aus Kanjera South in Kenia. Es handelt sich um zwei Millionen Jahre alte Schneidwerkzeuge (1) und Tierknochen mit Schnittspuren (2). Von Kathu Pan in Südafrika stammen 500 000 Jahre alte mutmaßliche steinerne Speerspitzen, die hier zur Demonstration an Schäften befestigt wurden (3). Eine Steinspitze erhöhte die Gefährlichkeit der Wurfwaffe. Die mutmaßlichen Pfeilspitzen (4) von Pinnacle Point in Südafrika sind 71 000 Jahre alt. Pfeil und Bogen steigerten die Reichweite nochmals erheblich.



THOMAS PLUMMER, QUEENS COLLEGE, CITY UNIVERSITY OF NEW YORK



JOSEPH FERRARO, BAYLOR UNIVERSITY

seitdem rätselten die Forscher, ob diese Tiere von Menschen erlegt wurden oder nicht.

Schließlich hatte Henry T. Bunn von der University of Wisconsin in Madison die Idee, ihr Altersprofil zu erstellen. Löwen zum Beispiel töten von ausgewachsenen Tieren großer Arten wie Wasserböcken überproportional viele alte Individuen. Andere Großraubtiere machen es ähnlich. Hätten die Frühmenschen sich damals hauptsächlich vorgefundene Kadaver zu eigen gemacht, müssten sich demnach vergleichsweise viele Fossilien von ziemlich alten Tieren finden. Tatsächlich aber war ein auffallend großer Anteil der ausgewachsenen Beute im besten Alter. Jungtiere und betagte Individuen gab es dagegen verhältnismäßig wenige. Dieses Muster wäre zu erwarten, wenn die Menschen sich ihre Opfer nach ihren Vorlieben selbst ausgesucht hätten.

Was ebenfalls zu diesem Altersprofil passt: Es ähnelt stark dem Muster erlegter Tiere, wie es bei den Hadza auftritt, einem heutigen Jäger-und-Sammler-Volk in Tansania, sowie bei den San-Buschleuten von Botswana. Beide gehen allerdings mit Pfeil und Bogen auf die Jagd. Jene frühen Menschen kannten bestimmt noch nicht weit reichende Waffen, schon gar nicht Pfeil und Bogen. Bunn stellt sich aber vor, dass sie aus dem Hinterhalt jagten, zum Beispiel auf Bäumen bei Wasserstellen lauerten und aus kurzer Distanz spitze Holzspeere auf nahe vorbeikommende Tiere schleuderten.

Noch älter, nämlich etwa zwei Millionen Jahre alt, sind Jagdindizien vom Ufer des Victoriasees in Westkenia. An der dortigen Grabungsstelle Kanjera South förderte ein Team um Joseph Ferraro von der Baylor University in Waco (Texas) und Thomas W. Plummer von der City University of New York neben Tausenden von Steinwerkzeugen auch zahlreiche, darunter zertrümmerte Tierknochen zu Tage, von denen offenbar das Fleisch abgesäbelt oder deren Mark herausgeholt worden war. Die meisten dieser Fossilien stammen von jungen Antilopen. Weil sie kaum Raubtierspuren aufweisen, ist anzunehmen, dass dort tatsächlich Hominine ihre eigene Beute zerlegten. Dafür spricht nach Plummers Ansicht zudem die geringe Größe der Opfer: Zierliche Antilopen oder Jungtiere hätten die Raubtiere wohl gleich selbst vollständig gefressen.

Plummer hält diese Fundstücke für die bisher ältesten handfesten Zeugnisse menschlicher Jagd. Vor allem aber beweisen sie nach Ansicht der Forscher, dass die Homininen von Kanjera keineswegs nur hin und wieder mit einer Fleischportion Abwechslung in ihre sonst pflanzlichen Mahlzeiten brachten, sondern dass die nahrhaften Tierprodukte einen Hauptanteil ihrer Ernährung ausmachten. Da die Sedimentschichten mit den Tierknochen Hunderte, wenn nicht Tausende von Jahren umfassen, scheint man dort über einen langen Zeitraum regelmäßig und in erheblicher Menge Fleisch, Fett, Knochenmark und dergleichen verzehrt zu haben. Daneben standen bei diesen Frühmenschen auch energiereiche Pflanzenteile auf dem Speiseplan, zum Beispiel Knollen, wie Zubereitungsspuren an Werkzeugen erkennen lassen.

### Beschleunigte menschliche Entwicklung

Die Tragweite jener Ernährungsumstellung ist gar nicht hoch genug zu bewerten. Nach fossilen und archäologischen Funden muss damals folgende Rückkopplungsschleife zwischen evolutionären und kulturellen Entwicklungen in Gang gekommen sein: Die energiekonzentrierte Nahrung trieb das Hirnwachstum an; Menschen mit einem größeren Gehirn erfanden neue Technologien; mit denen konnten sie noch mehr Fleisch beschaffen, aber auch hochwertigere Pflanzennahrung; und die immer bessere Ernährung erlaubte eine weitere Zunahme der Hirnmasse. So stieg das menschliche Hirnvolumen seit den ersten Vertretern der Gattung *Homo* vor über zwei Millionen Jahren bis zum Auftreten des *Homo sapiens* vor rund 200 000 Jahren von etwa 600 auf im Durchschnitt rund 1400 Kubikzentimeter.

Die neue Ernährungsweise müsste sich außerdem nachhaltig auf die Struktur und Auffächerung des sozialen Lebens ausgewirkt haben. Besonders seitdem die Menschen sich an größere Tiere heranwagten, dürfte es hier gravierende Umschwünge gegeben haben, schon weil es sich nun anbot, die Beute unter den Gruppenmitgliedern zu verteilen. Der Anthropologe Travis Pickering von der University of Wisconsin in Madison glaubt außerdem, dass bereits beim frühen *Homo* eine stärkere soziale Untergliederung aufkam –



was schließlich unter anderem zu einer Arbeitsteilung der Geschlechter führte: Hauptsächlich die Männer begaben sich auf Großwildjagd, und die Frauen sammelten bevorzugt pflanzliche Nahrung. Abends trafen dann alle wieder an einem zentralen Ort zum Essen zusammen. Auf diese Weise könnten, so spekuliert Pickering, bereits jene Guppen gelebt haben, die vor 1,8 Millionen Jahren die großen Huftiere von FLK Zinj schlachteten. Heute mag uns solch eine Verteilung der Verantwortlichkeiten antiquiert vorkommen – damals erwies sie sich als bemerkenswert erfolgreiche Organisationsform mit hohem Anpassungswert.

Außerdem vermutet Pickering, dass die Umstellung der Nahrung auf Fleisch unseren Altvorderen zu mehr Selbstbeherrschung verhalf. Zwar wird gern das Gegenteil angenommen: Jagen habe die Aggressivität gefördert. Diese Ansicht rührt von Beobachtungen an Schimpansen her, die höchst aufgeregt und aggressiv wirken, wenn sie einmal ein Tier erbeuten. Doch laut Pickering verlangte die Jagd schon vom Frühmenschen viel Besonnenheit und einen kühlen Kopf. Schimpansen bauen unter anderem auf ihre große Kraft und ihr gefährliches Gebiss. Wenn sie ein Tier erwischen, töten sie es mit roher Gewalt. Das alles konnten die frühen Menschen nicht. Sie mussten viel stärker als die Menschenaffen ihren Verstand einsetzen und ihre Emotionen zügeln. Distanzwaffen halfen nach dieser These später zusätzlich dabei, aggressive Gefühle von der Jagdsituation zu entkoppeln.

Zu dieser These passen Beobachtungen der Primatologin und Anthropologin Jill Pruett von der Iowa State University in Ames, die sie im Senegal an Savannenschimpansen machte. Dort fertigt sich ein Affe manchmal einen spitzen, langen Stock und stößt damit in eine Baumhöhle. Mit etwas Glück erwischt er einen Galago, einen nachtaktiven kleinen Halbaffen, der am Tag in dem Loch schläft. Die Schimpansen sollen hierbei lange nicht so ungestüm wirken wie ihre Artgenossen im Regenwald, wenn sie Beute machen. Das Werkzeug mag dazu beitragen.

Als einziger Primat besiedelt der *Homo sapiens* fast die ganze Erde. Einige Forscher vermuten, dass die frühe Ausbreitung unserer Gattung auf andere Kontinente wesentlich mit dem Jagen zusammenhing. Fünf Millionen Jahre lang

hatte sich die Evolution der Homininen und schließlich auch die Entwicklung der menschlichen Gattung in Afrika abgepielt. Doch vor etwas weniger als zwei Millionen Jahren erschienen Vertreter der Gattung *Homo* auch anderswo, sehr bald etwa am Kaukasus. Waren die ersten Siedler Eurasiens Tierherden gefolgt? Die Savannenvegetation, die damals auch in den neuen Gebieten häufig vorkam, dürfte ihnen vertraut erschienen sein.

Späteren Ausbreitungswellen wie schließlich denen des *Homo sapiens* mögen noch andere Motive zu Grunde gelegen haben. Aber selbst wenn Jagdwild nicht immer der Hauptbeweggrund war: Dass die Menschen ferne Winkel der Erde erobern und sich auf völlig neuartige Umwelten einstellen konnten, verdanken sie nicht zuletzt jenen Eigenschaften, die sie zum erfolgreichsten Raubtier der Welt machten. ∞

#### DIE AUTORIN



**Kate Wong** ist Redakteurin bei »Scientific American«.

#### QUELLEN

- Bunn, H. T., Gurtov, A. N.:** Prey Mortality Profiles Indicate that Early Pleistocene *Homo* at Olduvai Was an Ambush Predator. In: *Quaternary International* 322–323, S. 44–53, 2014
- Ferraro, J. V. et al.:** Earliest Archaeological Evidence of Persistent Hominin Carnivory. In: *PLOS One* 8, e62174, 2013
- Roach, N. T. et al.:** Elastic Energy Storage in the Shoulder and the Evolution of High-Speed Throwing in *Homo*. In: *Nature* 498, S. 483–487, 2013

#### LITERATURTIPP

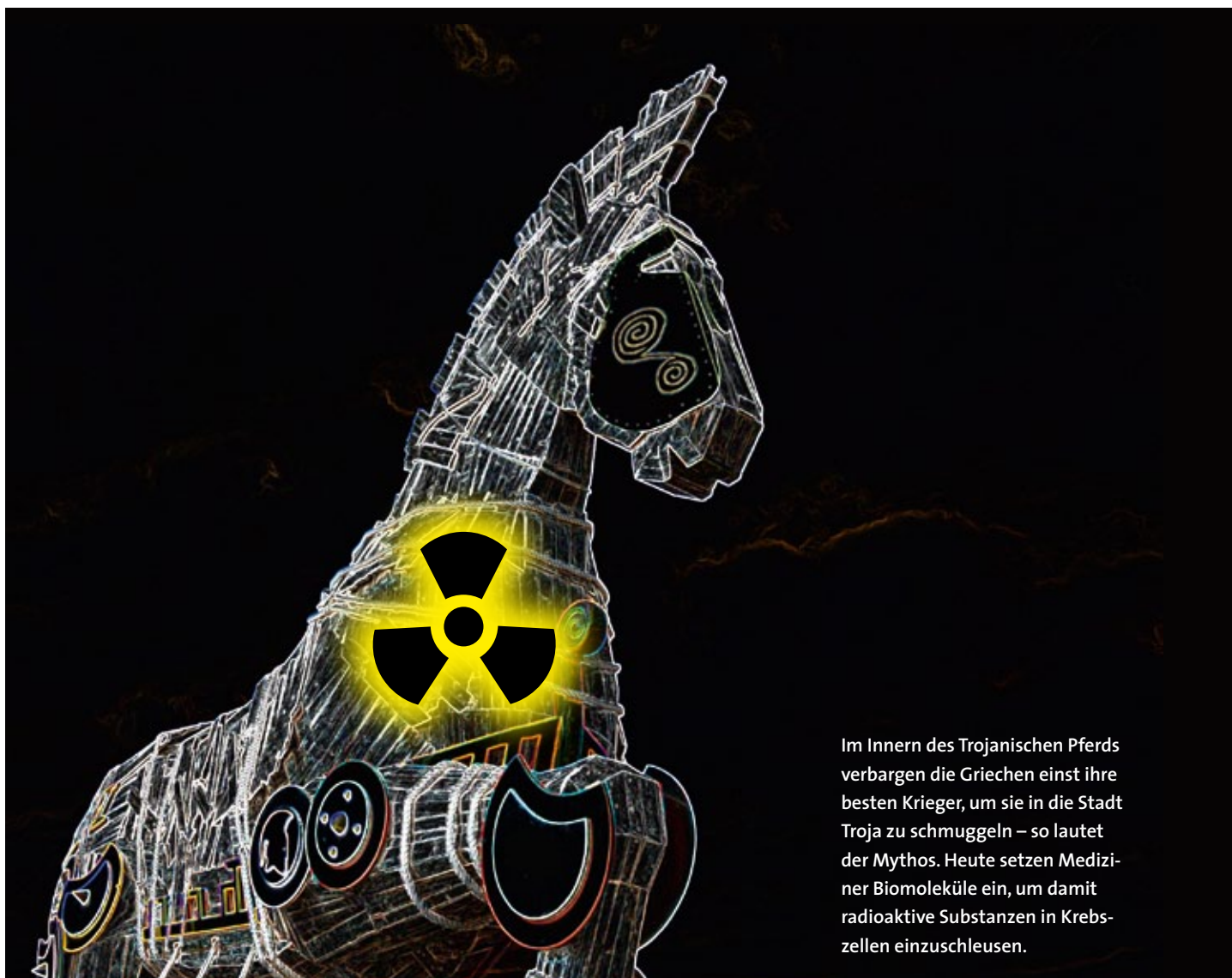
**Der kreative Mensch.** Zwischen biologischer und kultureller Evolution. *Spektrum der Wissenschaft Spezial Archäologie, Geschichte, Kultur* 2/2013  
*Artikel über die Entwicklung und besondere Stellung des Menschen*

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1309283](http://www.spektrum.de/artikel/1309283)

# Maßgeschneiderte Radionuklide gegen Krebs

Radioaktive Stoffe lassen sich einsetzen, um Tumorzellen im Körper zu bekämpfen. Mit modernen Neutronenquellen und Teilchenbeschleunigern gelingt es Forschern heute, therapeutische Nuklide herzustellen, die nahezu optimale Eigenschaften haben.

Ulli Köster, Cristina Müller, Roger Schibli



Im Innern des Trojanischen Pferds verbargen die Griechen einst ihre besten Krieger, um sie in die Stadt Troja zu schmuggeln – so lautet der Mythos. Heute setzen Mediziner Biomoleküle ein, um damit radioaktive Substanzen in Krebszellen einzuschleusen.



**M**ehr als drei Millionen Europäer erkranken Jahr für Jahr an Krebs. Künftig werden es noch mehr sein, denn der Anteil älterer Menschen an der Gesamtbevölkerung steigt, und bei ihnen treten Tumoren häufiger auf. Dieser Umstand verschlei-ert manchmal, dass die Krebstherapie in den zurückliegenden Jahren große Fortschritte gemacht hat. Vor allem die Kombination von früher Diagnose, exakter Abbildung der Tumoren und gezielter Behandlung führt dazu, dass die Ärzte heute mehr als die Hälfte aller Krebserkrankungen erfolgreich therapieren können.

Leider gilt das nicht für fortgeschrittene Fälle, bei denen der Primärtumor bereits gestreut hat. Denn hier lassen sich meist nicht alle Tochtergeschwulste (Metastasen) finden, geschweige denn chirurgisch entfernen. Es gibt zwar Behandlungsarten, die theoretisch sämtliche Krebszellen im Körper erreichen – insbesondere die verschiedenen Chemotherapien. Sie zielen darauf ab, Tumorzellen während der Teilung zu zerstören. Allerdings sind Chemotherapien nicht selektiv; sie richten sich gegen alle Zellen mit hoher Teilungsrate und greifen deshalb auch gesundes Gewebe an, was oft schwere Nebenwirkungen verursacht.

Behandlungen mit Radiopharmazeutika könnten einen Ausweg aus diesem Dilemma weisen. Hierbei injizieren Mediziner radioaktive Isotope (auch Radionuklide genannt) in den Blutkreislauf des Patienten. Die Substanzen gelangen zu den Tumorzellen und vernichten diese mittels ionisierender Strahlung. Im Idealfall dringen solche Wirkstoffe wie »trojanische Pferde« in die entarteten Zellen ein und entfalten dort gezielt ihre zerstörerische Wirkung. Nicht nur in der Therapie, auch in der Diagnostik haben sich Radionuklide vielfach bewährt.

### Das Schweizer Taschenmesser der Nuklearmedizin

Dank einer engen Zusammenarbeit von Physikern, Radiochemikern, Biologen, Radiopharmazeuten und Medizinern lassen sich heute auch solche Nuklide klinisch nutzen, bei denen das früher nicht möglich war. Die meisten medizinisch verwendbaren Radionuklide findet man nicht in der Natur. Ihre Zerfallsraten müssen in etwa der menschlichen Stoffwechselrate entsprechen, damit möglichst viele Zerfälle in einem »nützlichen« Zeitfenster erfolgen – also in der Zeit, nachdem sich das Nuklid im Körper verteilt hat und bevor es wieder ausgeschieden wird. Das bedeutet, man kann Radionuklide nicht über längere Zeit lagern und muss sie somit kontinuierlich produzieren. Heute ist es möglich, Isotope herzustellen, die aus medizinischer Sicht beinahe ideale Eigenschaften besitzen. Wissenschaftler nutzen hierfür Teilchenbeschleuniger und Neutronenquellen an verschiede-

nen Forschungszentren, etwa dem CERN in Genf, dem Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble oder dem Paul Scherrer Institut (PSI) im Schweizer Kanton Aargau.

Uns ist es in vorklinischen Versuchen gelungen, vier Nuklide des Elements Terbium auf mögliche medizinische Anwendungen hin zu prüfen. Die Verwendung unterschiedlicher Isotope desselben Stoffs hat mehrere Vorteile: Die Substanzen sind chemisch identisch und verteilen sich daher auf genau die gleiche Weise im Körper, zerfallen aber mit unterschiedlichen Halbwertszeiten und unter Aussendung verschiedener Strahlenarten. Deshalb eignen sie sich für ein breites Spektrum diagnostischer und therapeutischer Anwendungen. Wir bezeichnen Terbium daher gern als »Schweizer Taschenmesser der Nuklearmedizin« – nicht zuletzt, weil ein wesentlicher Teil unserer Forschungsarbeiten in der Schweiz stattfand.

Die Vorstellung, radioaktive Substanzen in die Blutbahn gespritzt zu bekommen, wirkt auf viele Patienten abschreckend. Doch obwohl die Nuklide im Blutstrom durch den ganzen Organismus wandern, lässt sich erreichen, dass sie ihre Wirkung nur in bestimmten Körper- beziehungsweise Tumorgeweben entfalten. In welchen, hängt von der Art des Nuklids und der Verabreichungsform ab. Dieser Umstand ermöglicht es, mit Radiopharmazeutika gezielt Krebszellen anzugreifen.

Die Art der ausgesendeten Strahlung bestimmt dabei das medizinische Einsatzgebiet. Alphastrahler sind Nuklide, die beim radioaktiven Zerfall Helium-Atomkerne (so genannte Alphastrahlung) aussenden. Mit typischen Energien von einigen Millionen Elektronvolt bewegen sich die Kerne im menschlichen Gewebe nur wenige zehn Mikrometer weit, bis sie ihre gesamte Energie abgegeben haben und »stecken

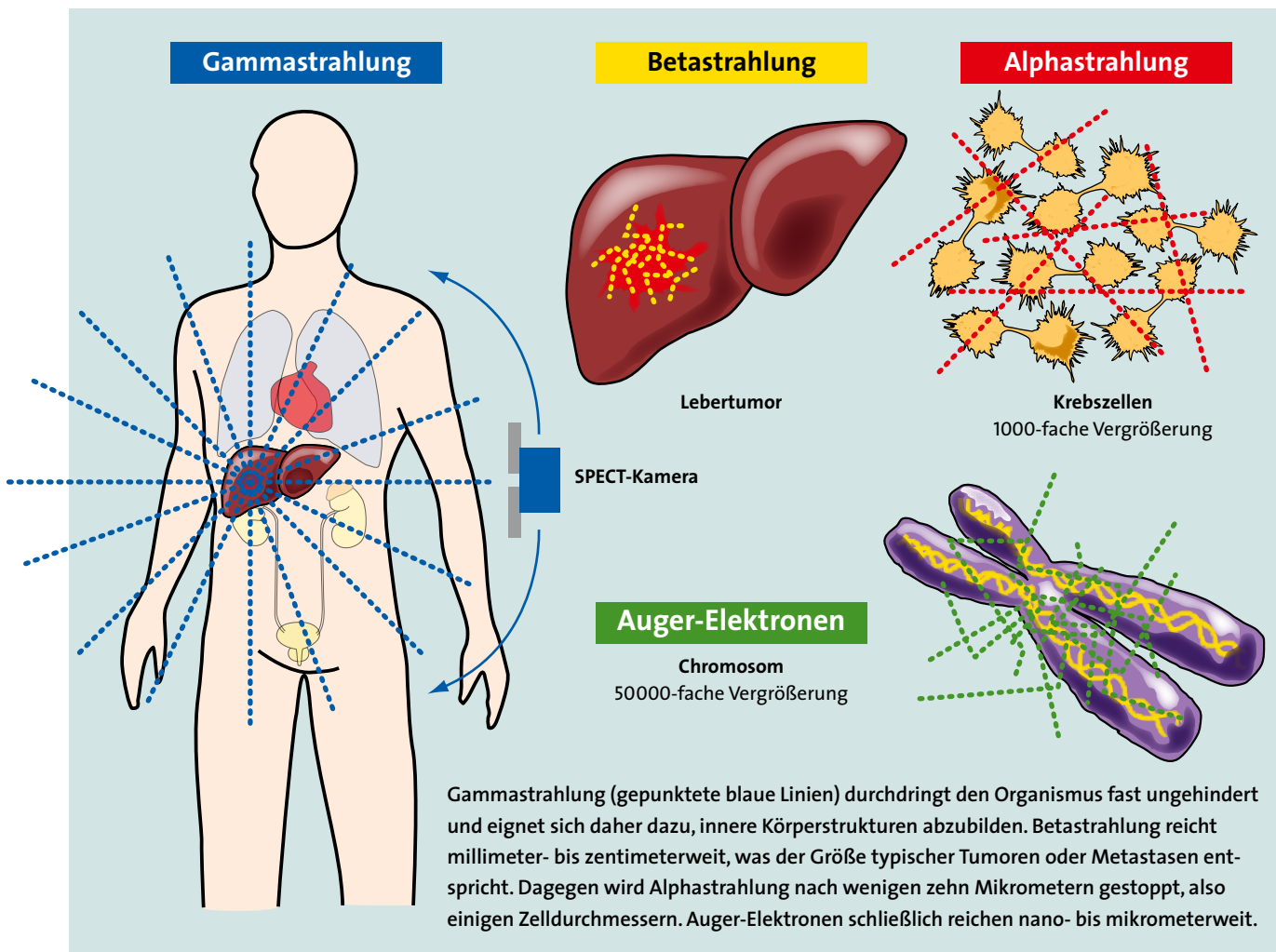
#### AUF EINEN BLICK

##### ANGRIFF VON INNEN

**1** Nuklearmediziner verwenden **radioaktive Nuklide**, um Tumoren im Körper zu bekämpfen. **Biomoleküle** sorgen dafür, dass die strahlenden Substanzen spezifisch an Krebszellen andocken.

**2** Bislang stand den Medizinern nur eine begrenzte Auswahl an Radioisotopen zur Verfügung. **Teilchenbeschleuniger, Forschungsreaktoren** und ausgefeilte **radiochemische Techniken** ermöglichen nun die Herstellung weiterer medizinisch interessanter Radionuklide.

**3** **Terbium**, ein Metall der **Seltenen Erden**, tritt in Form zahlreicher Isotope auf, von denen vier medizinischen Nutzen versprechen. Sie verhalten sich chemisch praktisch identisch, zerfallen aber auf unterschiedliche Weise. Vorklinische Tests machen Hoffnung, dass sich das Isotop-Quartett als **flexible Waffe gegen Krebs** bewähren könnte.



bleiben«. Die Reichweite der Strahlung entspricht somit ein paar Zelldurchmessern. Alphastrahler eignen sich daher zur Bekämpfung einzelner Krebszellen – auch weil die Heliumkerne auf ihrer kurzen Wegstrecke sehr intensiv mit umgebender Materie wechselwirken und zahlreiche Atome und Moleküle zertrümmern. Das erzeugt in der Erbsubstanz (DNA) der betroffenen Zellen etliche Doppelstrangbrüche, woran die Zellen in der Regel zu Grunde gehen. Deshalb kann man mit Alphastrahlern auch Krebsarten behandeln, die sehr strahlenresistent sind.

Betastrahler (genauer:  $\beta$ -Strahler) sind Nuklide, die beim Zerfall energiereiche Elektronen abgeben. Deren Reichweite im Weichgewebe beträgt einige Millimeter bis Zentimeter. Sie werden bevorzugt zur Therapie von kleinen und mittelgroßen Tumoren und Metastasen eingesetzt.

**Mit Hilfe von Anti-Elektronen kann man den Ort des Tumors sehr genau bestimmen**

Schließlich gibt es noch Gammastrahler: Nuklide, die energiereiche Photonen freisetzen, welche den menschlichen Körper meist ungehindert durchdringen. Gammastrahler haben sich als sehr nützlich in der Diagnostik erwiesen. Ihre im Körper abgegebene Photonenstrahlung verlässt den Körper und kann mit Gammakameras aufgezeichnet werden, um funktionelle Bilder von körperinneren Strukturen zu erstellen. Im Zuge der so genannten Einzelphotonen-Emissionscomputertomografie (SPECT, »single photon emission computed tomography«) lassen sich damit sogar Schnittbilder vom Körper erzeugen.

Auch Positronen- $(\beta^+)$  sowie Auger-Elektronen-Strahlung sind für medizinische Zwecke interessant. Positronen (Anti-Elektronen) werden beim Zerfall bestimmter neutro-

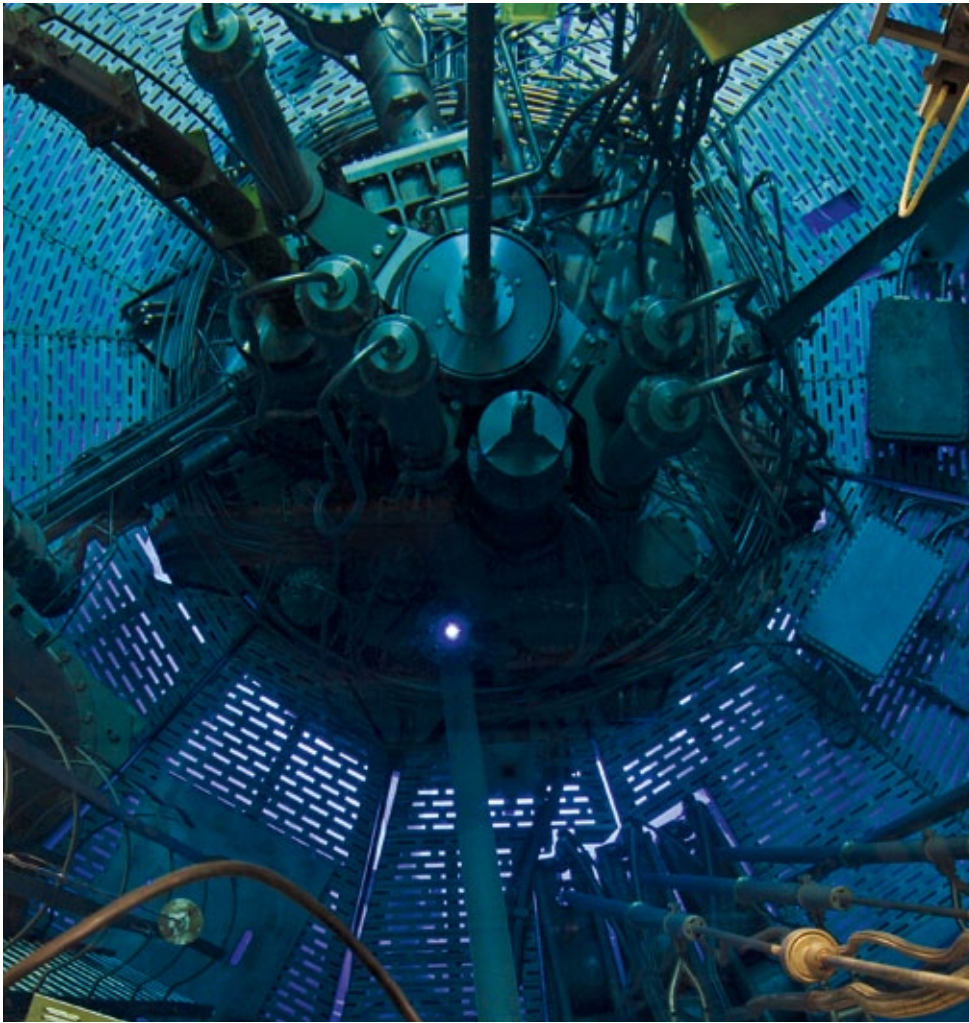
MEHR WISSEN BEI [Spektrum.de](http://Spektrum.de)



Unser Online-Dossier zum Thema »Krebs – der Feind im eigenen Körper« finden Sie unter

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





ULLHOFFER

Der Hochflussreaktor am Institut Laue-Langevin (Grenoble, Frankreich) ist die stärkste Neutronenquelle Europas. Hier und an anderen Neutronenquellen, etwa dem Forschungsreaktor FRM2 in Garching bei München sowie der Spallationsneutronenquelle am PSI, produzieren Physiker die Nuklide Lutetium-177 (für klinische Anwendungen) und Terbium-161 (für vorklinische Studien).

nenarmer Isotope frei und nach wenigen Millimetern im umliegenden Gewebe gestoppt. Sodann zerstrahlen sie mit einem Elektron der Umgebung in zwei Gammaphotonen, die den Körper in entgegengesetzten Richtungen verlassen. Jedes nachgewiesene Gammaaar definiert eine Gerade, nahe der die Positronenfreisetzung stattfand. Der Schnittpunkt vieler solcher Geraden erlaubt es, den Ort eines Tumors sehr genau zu bestimmen.

Auger-Elektronen wiederum entstehen, wenn bei einem radioaktiven Zerfall ein Elektron aus einem kernnahen Atomorbital emittiert wird und ein »Loch« in der Elektronenhülle des Atoms zurücklässt, das kurz darauf von einem Elektron einer äußeren Schale besetzt wird. Die dabei frei werdende Energie kann auf ein anderes Elektron desselben Atoms übergehen, welches nun als Auger-Elektron das Atom verlässt. Auger-Elektronen können sehr niedrige Energien besitzen und verfügen im menschlichen Gewebe über entsprechend kurze Reichweiten (Nanometer bis Mikrometer).

### Obwohl Radionuklide im Blutstrom durch den ganzen Körper wandern, lässt sich erreichen, dass sie **nur in bestimmten Geweben** wirken

Sie können Krebszellen sehr effektiv zerstören – vorausgesetzt, es gelingt, die entsprechenden Radionuklide nah genug an den besonders strahlenempfindlichen Zellkern heranzubringen. Der medizinische Einsatz von Nukliden, die Auger-Elektronen emittieren, befindet sich noch in der vorklinischen Forschung.

Jedes Nuklid hat in der klinischen Anwendung seine spezifischen Vor- und Nachteile (siehe »Radionuklide in der Tumorthherapie – ein Überblick«, S. 37). Wissenschaftler versuchen, die Herstellungs- und Therapieverfahren so weiterzuentwickeln, dass die Ärzte zunehmend über »maßgeschneiderte« Radioisotope verfügen, die sich jeweils besonders gut zum Bekämpfen bestimmter Tumorarten eignen. Wichtig sind dabei vor allem die Art und Reichweite der freigesetzten Strahlung sowie die Halbwertszeit des radioaktiven Zerfalls. Letztere muss für klinische Zwecke, je nach Anwendung, im Bereich von Stunden, Tagen oder Wochen liegen.



Wir verwenden das Element Terbium als Grundlage für einen flexibel einsetzbaren »Werkzeugkoffer« mit Radiopharmaka. Terbium tritt in Gestalt zahlreicher Nuklide auf, von denen vier für die Nuklearmedizin interessant sind: Tb-149, Tb-152, Tb-155 und Tb-161. Zusammen decken sie das ganze Spektrum der beschriebenen Strahlenarten (Gamma-,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , Alpha- und Auger-Elektronen-Strahlung) ab, was sie für zahlreiche diagnostische und therapeutische Anwendungen geeignet erscheinen lässt. Biochemisch verhalten sich alle exakt gleich – man kann ein medizinisch interessantes Molekül also sowohl mit einem diagnostischen Terbiumnuklid markieren (zu Untersuchungszwecken) als auch mit einem therapeutischen Terbiumnuklid beladen (zu Behandlungszwecken) – die Verteilung im Körper wird in beiden Fällen identisch sein.

Leider war bis vor Kurzem keines dieser Isotope kommerziell verfügbar. Um dies zu ändern, initiierten wir eine Zusammenarbeit europäischer Forschungslabors am CERN, am ILL und am PSI. Die dort vorhandenen Geräte und Anlagen ermöglichen es, die medizinisch interessanten Terbiumnuklide in erforderlicher Reinheit herzustellen. So nutzen wir den europäischen Hochflussreaktor am ILL sowie die Spallations-Neutronenquelle am PSI (sie liefert einen kontinuierlichen Neutronenfluss), um Tb-161 zu erzeugen. Das Nuklid, das  $\beta^-$ -Strahlung und Auger-Elektronen emittiert, entsteht dabei durch Neutronenbestrahlung von hoch angereicherter Gadolinium-160. Schwierig bei dem Verfahren ist es, die frisch produzierten Terbiumnuklide vom Gadolinium zu trennen, weil beide sich chemisch stark ähneln. Zudem muss die Separierung schnell erfolgen, da Tb-161 mit einer Halbwertszeit von knapp sieben Tagen zerfällt. Uns gelingt es inzwischen, mehr als 90 Prozent des erzeugten Terbiums in hochreiner Form zu extrahieren.

Im Gegensatz zu Tb-161 lassen sich die Nuklide Tb-149, Tb-152 und Tb-155 nicht durch Neutronenbeschuss erzeugen. Für ihre Herstellung benötigen wir schnelle Protonen.

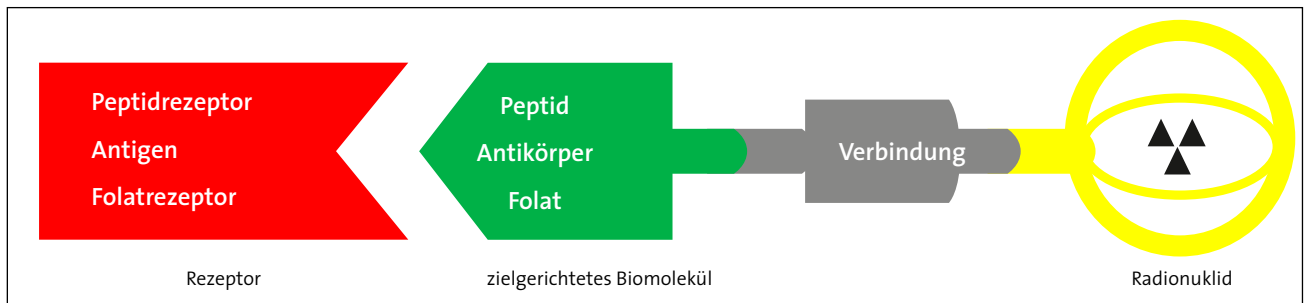
## Beschießt man Tantalproben mit schnellen Protonen, entstehen Isotope, die für medizinische Zwecke interessant sind

Am CERN befindet sich der Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider), wo ein Linear- und drei kleinere Ringbeschleuniger regelmäßig den Hauptbeschleunigerring mit schnellen Protonen befüllen. Längst nicht alle Protonen gelangen in den Hauptring, fast die Hälfte wird auf Materieproben geschossen, wobei zahlreiche verschiedene Nuklide entstehen. Wir verwenden das Element Tantal, bei dessen Beschuss sich diverse Radionuklide der Seltenen Erden bilden – darunter die interessanten Terbiumsorten. Diese herauszufiltern, ist allerdings eine große Herausforderung.

Hierfür erhitzen wir das Tantal während des Protonenbeschusses auf mehr als 2000 Grad Celsius, was dazu führt, dass die entstehenden Terbiumisotope aus den Proben herausdiffundieren. Die so freigesetzten Atome beschließen wir mit Laserstrahlen, so dass sie ein Elektron verlieren und zu Ionen werden. Diese Ionen beschleunigen wir in einem elektrischen Feld und trennen sie mit einem Magneten entsprechend ihrer Masse. Das Verfahren hat den Vorteil, chemisch selektiv zu sein: Durch sorgfältiges Abstimmen der Laserwellenlänge lässt sich gezielt nur ein bestimmtes Element ionisieren, um es von störenden Radionukliden anderer Elemente zu separieren. Die Kombination von Laserionisation und magnetischer Massentrennung liefert daher die gewünschten Terbiumisotope in hoher Reinheit.

## Wie lässt sich das Gift im Körper an die richtige Stelle bringen?

Die Arbeit der Physiker und Radiochemiker ist damit beendet, und es beginnt jene der Biologen und Pharmazeuten. Sie haben die Aufgabe, Terbiumnuklide so in den Körper einzuschleusen, dass diese ihre Wirkung lediglich an Krebszellen entfalten. Die Nuklide einfach in die Blutbahn zu injizieren, würde mehr Schaden als Nutzen anrichten. Ionisierende Strahlung kann nicht zwischen gesunden und entarteten Zellen unterscheiden – sie schädigt beide gleichermaßen.



Zielgerichtete Radiopharmaka funktionieren nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip. Das Radionuklid wird an ein Biomolekül gekoppelt – ein Peptid, einen Antikörper oder ein kleines organisches

Molekül wie Folsäure – und in die Blutbahn gegeben. Das Biomolekül bindet sich im Körper an eine passende Struktur, etwa auf Krebszellen, so dass dort das Radionuklid seine Wirkung entfaltet.

## Radioisotope in der Tumorthherapie – ein Überblick

**Das Isotop Iod-131, ein Beta- und Gammastrahler,** war das erste erfolgreich in der Krebstherapie eingesetzte Radionuklid. Es entsteht bei der Kernspaltung von Uran und fällt heute meist als Nebenprodukt beim Herstellen von Technetium-99m an, dem am häufigsten verwendeten diagnostischen Isotop der Nuklearmedizin. Iod-131 hat unter anderem den Vorteil, in großen Mengen verfügbar zu sein. Auch gibt es in der Chemie etablierte Methoden, das Element an organische Moleküle zu binden, was für die medizinische Verabreichung von großer Bedeutung ist.

Yttrium-90 fällt ebenfalls bei der Kernspaltung von Uran an und ist, wie Iod-131, leicht verfügbar. Es sendet Betastrahlung mit einer Reichweite von bis zu zwölf Millimetern in Weichgewebe aus. Im klinischen Einsatz werden somit nicht nur Tumorzellen in direkter Nachbarschaft des Radionuklids bestrahlt, sondern auch weiter entfernte Zellen. Das kann durchaus erwünscht sein, um beispielsweise in größeren Metastasen die gesamte Tumormasse zu treffen. Bei zu großer Reichweite der Strahlung können jedoch auch gesunde Zellen in Mit-

leidenschaft gezogen werden, was eventuell Nebenwirkungen verursacht.

**Als »Goldstandard« der Radionuklidtherapie mit Betastrahlern** gilt heute Lutetium-177, da es relativ energiearme Strahlung mit weniger als zwei Millimeter Reichweite freisetzt, was die Strahlenwirkung stärker auf die Tumorzellen beschränkt. Zudem gibt Lutetium-177 auch Gammastrahlung geringer Intensität ab, mit der man während der Behandlung überwachen kann, ob die verabreichten Nuklide an den richtigen Körperstellen wirken. Indem man das Isotop an bestimmte Peptide (kleine Proteine) oder Antikörper koppelt, kann man sehr genau vorgeben, wo es sich anreichern soll – etwa in neuroendokrinen Tumoren, Lymphomen oder Prostata Tumoren. Allerdings ist die Herstellung von reinem Lutetium-177 technisch sehr anspruchsvoll und erfordert ausgefeilte radiochemische Trennverfahren. Die Erzeugung eines einzigen Gramms würde rund eine Milliarde Euro kosten – doch ließen sich damit mehr als 100 000 Patienten behandeln.

Nuklearmediziner haben daher verschiedene Methoden entwickelt, um die strahlenden Atome an Krebszellen und in Tumoren anzureichern.

So genannte metabolische Therapien nutzen die Tatsache aus, dass Tumorzellen oft einen spezifischen Stoffwechsel aufweisen. Schilddrüsenzellen haben typischerweise einen hohen Bedarf an Iod. Dieser bleibt meist auch in Schilddrüsentumoren und ihren Metastasen erhalten. Verabreicht man also radioaktives Iod, so wird es im Tumor und in seinen Absiedlungen angereichert. Das versetzt Mediziner in die Lage, die Geschwulste mit dem Nuklid Iod-123, das Gammastrahlen aussendet, per SPECT bildlich darzustellen. Mit dem Isotop Iod-131 wiederum, einem Beta- und Gammastrahler, lassen sich die Tumoren von innen her bestrahlen und abtöten.

Bei etlichen Krebsarten entstehen Metastasen in den Knochen. Diese wachsen deutlich schneller als normale Knochenzellen und haben daher einen stark erhöhten Bedarf an Mineralien wie Kalzium und Phosphaten. Der Umstand erlaubt es, den Krebs zu behandeln, indem man radioaktive Isotope verabreicht, die sich chemisch wie Kalzium verhalten – etwa Erdalkalielemente wie Strontium-89 oder Radium-223. Sie sammeln sich bevorzugt in den Metastasen an und entfalten dort ihre tödliche Wirkung.

Leider versagen solche Anreicherungsverfahren bei vielen Krebsarten. Dennoch haben die Nuklearmediziner Wege gefunden, radioaktive Nuklide zielgerichtet in Krebszellen einzuschleusen. Sie nutzen dabei das Prinzip des Trojanischen Pferds, jener hölzernen Figur, in der die Griechen laut Mythos ihre besten Kämpfer versteckten, um sie in die Stadt

Troja zu schmuggeln. In der Nuklearmedizin übernehmen Biomoleküle die Rolle des Pferds. Bestimmte Krebszellen tragen spezifische »Marker« auf ihrer Oberfläche, das sind Moleküle (beispielsweise Proteine), die nur auf den entarteten Zellen vorkommen, hingegen kaum oder gar nicht auf gesunden Körperzellen. Biomoleküle mit entsprechenden Bindungseigenschaften – etwa Antikörper, Peptide (kleine Proteine) oder Vitamine – können an die Marker andocken und von dort ins Innere der Krebszelle vordringen. Hat man sie zuvor mit einer giftigen Fracht beladen, beispielsweise mit radioaktiven Nukliden, befördern sie diese in die Zelle hinein. Das Verfahren setzen Mediziner schon seit Langem in der zielgerichteten Chemotherapie ein, mit dem Chemotherapeutikum an Stelle des Radionuklids in der Rolle des Zellgifts. Aber auch wenn die Biomoleküle lediglich außen an der Krebszelle haften, kann ihre Nuklidfracht wirken, sofern die ausgesendete Strahlung bis in die Zelle reicht.

Der klinische Einsatz von Antikörpern, die mit Radionukliden verknüpft sind, wird als Radio-Immuno-Therapie bezeichnet. Koppelt man das Radionuklid hingegen an ein Peptid, spricht man von Peptid-Rezeptor-Radionuklid-Therapie, abgekürzt PRRT. Sie hat im Gegensatz zur zielgerichteten Chemotherapie den Vorteil, dass die winzige »Huckepack-Ladung« des Radionuklids die Eigenschaften des Trägerpeptids hinsichtlich Pharmakokinetik und Selektivität der Bindung praktisch nicht beeinflusst.

Wir verwenden das Vitamin Folsäure als trojanisches Pferd. Viele Tumorzellen nehmen es über den so genannten Folatrezeptor auf und transportieren es in ihr Inneres. Einige Krebsarten zeichnen sich dadurch aus, dass die Krebszellen

sehr viele Folatrezeptoren besitzen. Dazu gehören Tumorerkrankungen der Eierstöcke, der Gebärmutter, der Lunge und der Nieren. In gesunden Körperzellen ist der Folatrezeptor dagegen kaum verbreitet und tritt lediglich in den Nieren gehäuft auf.

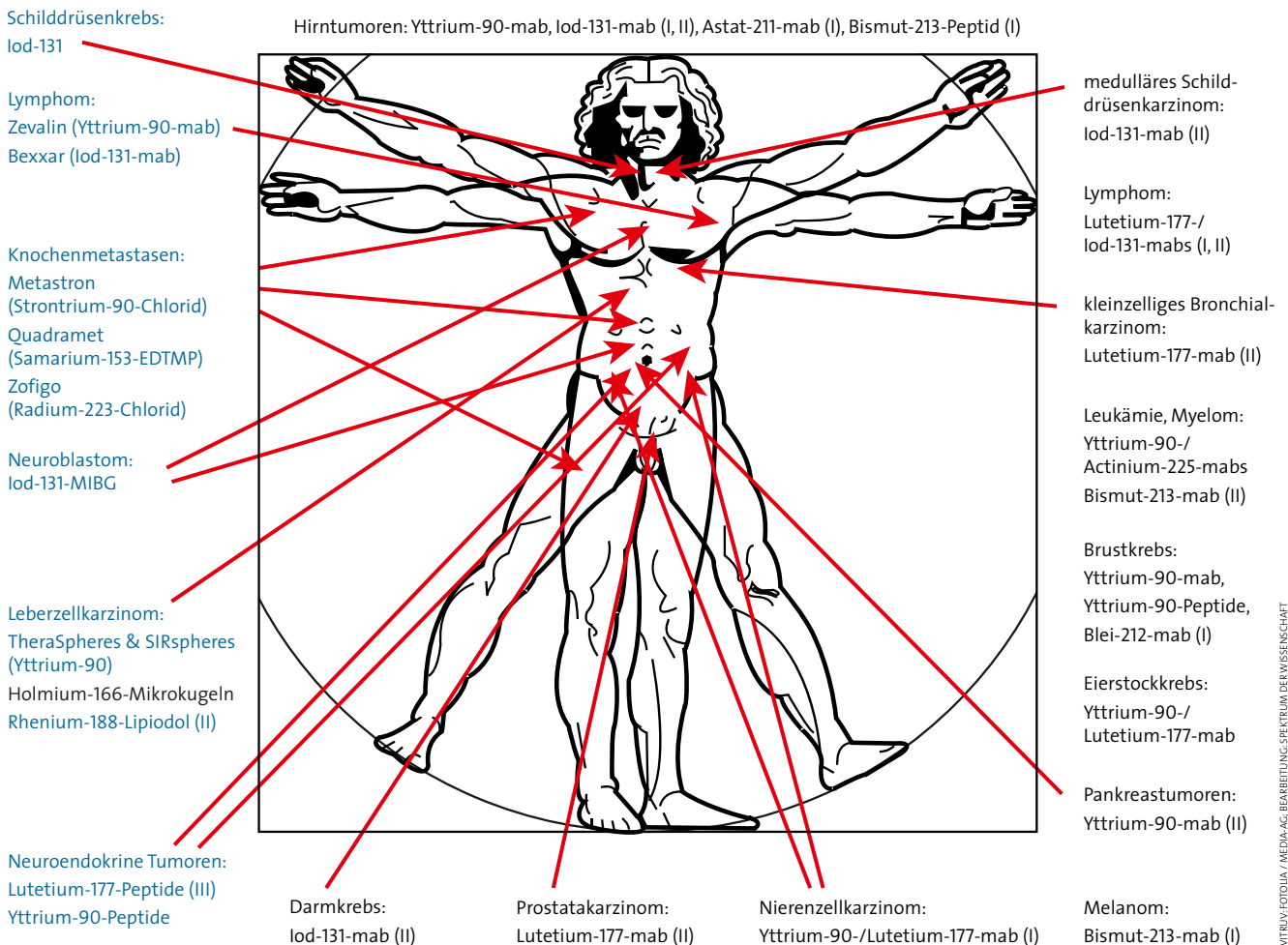
### Trojanisches Pferdchen aus drei verschiedenen Molekülen

Um unsere Terbiumnuklide mit der Folsäure zu verknüpfen, bauen wir eine Art molekularen Käfig an das Vitamin an, der Metalle wie Terbium stabil und sicher einschließt. Doch damit ist das Pferd noch nicht fertig gezimmert. Folsäure ist ein relativ kleines Molekül, das sich über das Blut sehr schnell im Körper verteilt, allerdings auch rasch über die Niere wieder ausgeschieden wird. Das wirkt einer Anreicherung im Tumor entgegen und kann zur Schädigung der Niere führen, falls sich dort zu viele Radioisotope ansammeln. Um die Aufenthaltsdauer des Folsäure-Terbium-Komplexes im Blut zu verlängern, fügen wir an das natürliche Vitamin ein Molekül an,

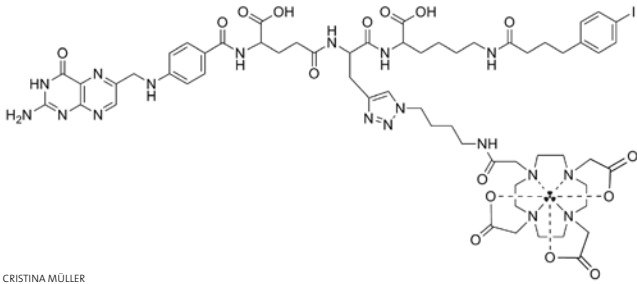
das eine Affinität zu Albumin aufweist, einem Protein des Blutserums. Dadurch zirkuliert der ganze Komplex deutlich länger im Blutkreislauf – die Krebszellen lagern infolgedessen mehr davon ein, und die Niere muss weniger ausscheiden. Dieses künstliche Molekülkonstrukt, ein so genanntes Folat, haben wir für vorklinische Tests mit unterschiedlichen diagnostischen und therapeutischen Terbiumnukliden bestückt, um Terbiumfolate (Tb-Folate) zu erzeugen (Grafik rechts).

Zunächst prüften wir die Stabilität der Komplexe. Es zeigte sich, dass die Tb-Folate selbst bei einer Woche Verweildauer im menschlichen Blutplasma intakt bleiben. Anschließend testeten wir, wie spezifisch die Komplexe an Tumorzellen in Kultur andocken. Darauf folgten Experimente mit Labormäusen, die unter künstlich hervorgerufenen Tumorerkrankungen litten. Um zu untersuchen, wie sich Tb-Folat im Körper der Tiere verteilt, verfolgten wir die von den Nukliden ausgesandte Gammastrahlung mittels SPECT- und PET-Bildgebung. Hierfür stellten wir die Mäuse durch Betäuben ruhig und brachten sie in einen speziellen Kleintierscanner, der die

Eine Vielzahl zielgerichteter Radiopharmaka wird klinisch erforscht oder befindet sich bereits im Routineeinsatz (blau). Die römischen Zahlen stehen für die jeweilige klinische Studienphase und »mab« für monoklonale Antikörper, die spezifisch an bestimmte Krebszellen binden.







CRISTINA MÜLLER

Das von den Autoren erzeugte Radiopharmakon besteht aus einem Folsäure-Gerüst (links oben), einem molekularen Käfig, der das Terbiumnuklid einschließt (rechts unten), sowie einem Molekül, das sich an einen Bestandteil des Blutserums bindet (rechts oben). Das ganze Konstrukt wird als Terbiumfolat (Tb-Folat) bezeichnet.

Strahlung detektierte. Zum anatomischen Vergleich nahmen wir parallel Röntgenbilder der Nager auf.

Wie die Versuche belegen, reichern sich die Tb-Folate in den Tumoren und in den Nieren der Tiere an, aber kaum in anderen Organen. Der Effekt ist bereits eine Stunde nach Verabreichen der Komplexe nachweisbar und hat nach vier Stunden seine maximale Ausprägung erreicht. Selbst sieben Tage später ist die Konzentration des Wirkstoffs in den Tumorzellen immer noch hoch. Demnach gelangt unser trojanisches Pferd an die richtige Stelle. Doch genügt das, um den Feind (die Krebszellen) von innen heraus zu besiegen?

### Innenbeschuss mit Partikeln dämmt Tumorwachstum ein

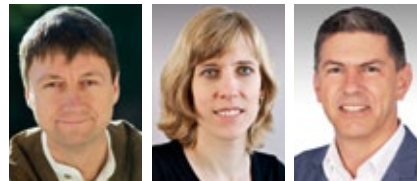
Um diese Frage zu beantworten, untersuchten wir das Tumorwachstum in verschiedenen Gruppen von Mäusen. Jedem Tier wurde die gleiche Zahl von Krebszellen injiziert. Die erste Gruppe bekam vier Tage später eine Dosis Tb-161-Folat (ein Beta- und Auger-Elektronen-Strahler), die zweite erhielt vier und acht Tage später jeweils eine Dosis Tb-149-Folat (ein Alphastrahler). Die Kontrollgruppe schließlich behandelten wir mit einer nicht radioaktiven physiologischen Kochsalzlösung. Über acht Wochen hinweg verfolgten wir die Tumorgroße und das Körpergewicht der Mäuse. Während jene aus der Kontrollgruppe sehr große Tumoren entwickelten, war das Tumorwachstum bei Tieren der anderen beiden Gruppen stark verlangsamt; bei einigen Mäusen verschwanden die Geschwulste sogar. Die Kontrolle der Blutwerte ergab, dass die Nieren trotz Aufnahme von Tb-Folat nicht merklich geschädigt wurden.

Wie geht es weiter? In der vorklinischen Forschung suchen wir derzeit nach Möglichkeiten, den Übertritt von Tb-Folaten in die Nieren weiter einzuschränken, etwa durch vorherige Blockade der dort befindlichen Folatrezeptoren mit geeigneten Bindungspartnern. Auch testeten wir neue Kombinationen aus Terbiumisotopen und Antikörpern oder Peptiden. Die klinische Anwendung unserer Tb-Folate liegt allerdings noch in der Zukunft. Bevor sie routinemäßig eingesetzt werden können, müssen sie – wie alle neuen Arznei-

stoffe – nach der vorklinischen Phase eine dreistufige klinische Testserie durchlaufen. In der ersten Phase wird an wenigen Teilnehmern untersucht, wie sich das Radiopharmakon im Körper verteilt und ob es inakzeptable Nebenwirkungen hat. In der zweiten Phase testen die Mediziner unterschiedliche Dosierungen, um die optimale Verabreichungsart zu finden. Schließlich wird das neue Radiopharmakon in einer groß angelegten Studie (Phase III) mit der besten herkömmlichen Therapie verglichen und muss dabei beweisen, dass es dieser gegenüber einen Vorteil hat.

Unser »Schweizer Taschenmesser der Nuklearmedizin« könnte sich als vielseitige Waffe im Kampf gegen Krebs bewähren – als Allheilmittel aber nicht. Jede Krebsart ist anders, und längst nicht alle Tumoren verfügen über geeignete Folatrezeptoren, damit unsere künstlich erzeugten Komplexe wirken können. Mit der Schaffung unseres trojanischen Pferds wagten wir ein riskantes, kompliziertes Unternehmen, weil die einfacheren, herkömmlichen Methoden versagten. Doch obwohl die Griechen Troja mit Hilfe ihrer berühmten List besiegten, wurden die meisten Kriege davor und danach mit konventionellen Mitteln gewonnen. Ganz ähnlich gilt auch in der Krebsmedizin: Radiopharmaka sind weder eine Konkurrenz zum »Schwert« (dem Skalpell des Chirurgen) noch zu »Schusswaffen« (den Anlagen für die Strahlentherapie) und auch nicht zur Chemotherapie, sondern eine sinnvolle Ergänzung dazu. ~

### DIE AUTOREN



**Ulli Köster** (links) ist Physiker. Er befasst sich unter anderem mit der Herstellung radioaktiver

Isotope für die Medizin am Hochflussreaktor des Institut Laue-Langevin in Grenoble, Frankreich. **Cristina Müller** arbeitet als Privatdozentin an der ETH Zürich und als Forschungsgruppenleiterin am Zentrum für Radiopharmazeutische Wissenschaften (ZRW), Paul Scherrer Institut, Schweiz. Ihr Schwerpunkt ist die vorklinische Forschung, insbesondere die Entwicklung und Anwendung radioaktiv markierter Folsäure-Abkömmlinge. **Roger Schibli** ist außerordentlicher Professor für radiopharmazeutische Wissenschaften an der ETH Zürich und Leiter des ZRW.

### QUELLEN

**Müller, C. et al.:** A Unique Matched Quadruplet of Terbium Radioisotopes for PET and SPECT and for  $\alpha$ - and  $\beta$ -Radionuclide Therapy: An in vivo Proof-of-Concept Study with a New Receptor-Targeted Folate Derivative. In: *Journal of Nuclear Medicine* 53, S. 1951–1959, 2012  
**Müller, C. et al.:** Future Prospects for SPECT Imaging Using the Radiolanthanide Terbium-155 – Production and Preclinical Evaluation in Tumor-Bearing Mice. In: *Nuclear Medicine and Biology* 41, S. e58–e65, 2014  
**NuPECC:** Nuclear Physics for Medicine. European Science Foundation, ISBN: 978-2-36873-008-9; [www.nupecc.org/npmed/npmed2014.pdf](http://www.nupecc.org/npmed/npmed2014.pdf)

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1309284](http://www.spektrum.de/artikel/1309284)

# Simulierte Quantenwelten

Quantenmechanische Systeme sind oft zu komplex, um sie zu berechnen oder direkt zu untersuchen. Trotzdem entlocken Forscher ihnen immer mehr Geheimnisse – indem sie die Phänomene mit anderen Mitteln trickreich nachbauen.

Von Oliver Morsch und Immanuel Bloch

**A**ls gegen Ende des 19. Jahrhunderts immer größere Leitungsnetze entstanden, um Wechselstrom über Hunderte von Kilometern in die entlegensten Winkel Amerikas und Europas zu transportieren, standen Ingenieure und Investoren vor einem gewaltigen Problem. Niemand konnte vorhersagen, wie sich so große Netzwerke verhalten würden. So könnten Überspannungen, etwa bei Kurzschlüssen oder anderen ungünstigen Bedingungen, die Leitungen oder ganze Fabrikanlagen zerstören. Zwar konnten die Wissenschaftler ein Stromnetzwerk im Prinzip mathematisch beschreiben. Doch die komplizierten Differenzialgleichungen von Hand zu lösen, war in den meisten Fällen praktisch unmöglich. Das vergrößerte das technische und finanzielle Risiko weitläufiger Stromnetzwerke erheblich.

In ihrer Not kamen die Ingenieure auf eine pfiffige Idee. Wenn sie schon nicht in der Lage waren, das Verhalten der komplizierten Stromnetzwerke zu berechnen, dann sollten sie es zumindest simulieren können. In der Praxis bedeutete das, elektrische Bauteile herzustellen, die zusammen ähnliche Eigenschaften aufwiesen wie hunderte Kilometer lange Überlandleitungen. Zugleich mussten sie aber in ein Labor passen. Einen solchen Simulator entwickelte Vannevar Bush um 1930 am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge und nannte ihn Netzwerkanalysator. Dessen Benutzer konnte das Verhalten eines großen elektrischen Netzwerks im Labor ohne Risiko nachstellen und damit in gewisser Wei-

## AUF EINEN BLICK

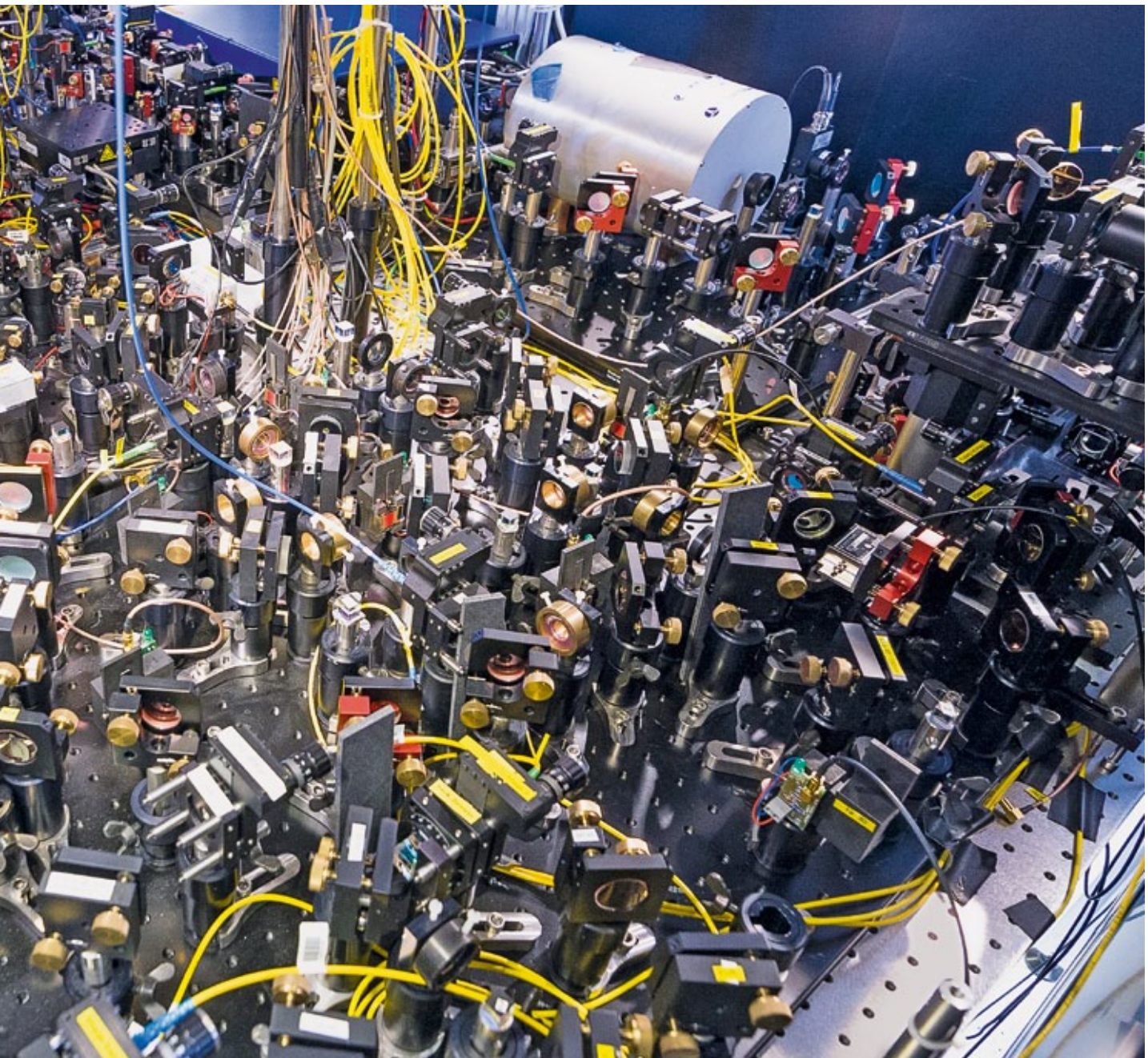
### NANOKOSMOS AUS DEM BAUKASTEN

- 1** Heutige Computer können Strukturen aus vielen Quantenteilchen **nicht exakt berechnen**.
- 2** Im Labor bilden Forscher gezielt einzelne Aspekte eines **komplexen Systems** mit wenigen, kontrollierbaren **Quantenobjekten** nach.
- 3** So simulieren die Physiker, was bei **sonst kaum beobachtbaren Vorgängen** passiert – oder modellieren sogar neue, noch unbekannte **Materialien**.



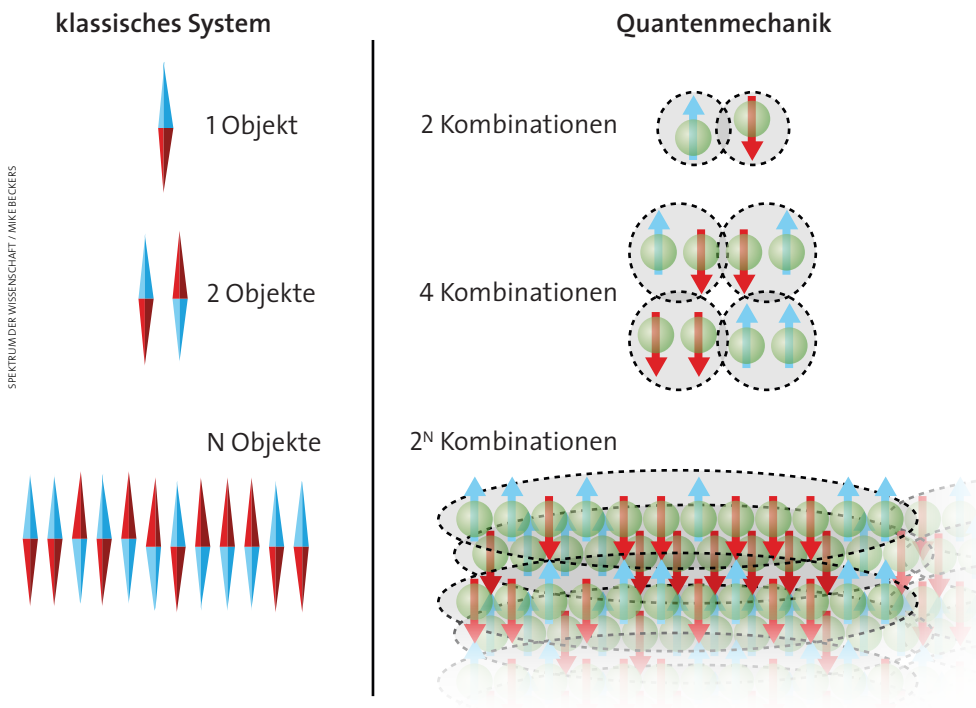


In diesem Quantensimulator am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching lenken schier zahllose optische Bauteile wie Spiegel, Linsen und Glasfaserkabel das Licht aus dutzenden Lasern. Damit können Forscher Atome kühlen, einfangen und manipulieren.



AXEL GRIESCH





Anders als etwa magnetische Kompassnadeln (links) können quantenmechanische Teilchen gleichzeitig nach »oben« oder »unten« zeigen (rechts). Während im klassischen, makroskopischen Fall wenige Zahlen ausreichen, um das System vollständig zu beschreiben, müsste man in der quantenphysikalischen Situation alle denkbaren Kombinationen berechnen – bereits bei kleinen Systemen eine unermessliche Menge.

se die mathematischen Gleichungen lösen, die es beschrieben. Der Simulator war also eigentlich ein Rechner, ein Computer – wenn auch kein digitaler, der Informationen als Abfolge von Nullen und Einsen abspeichert und verarbeitet, sondern ein analoger.

Noch bis Anfang der 1960er Jahre verwendeten viele Elektrizitätswerke diese Netzwerkanalysatoren. Dann verdrängten die neuen Digitalcomputer sie allmählich. Was immer die Simulatoren taten, digitale Rechner konnten es besser und schneller. Die Ära der Analogcomputer schien beendet.

### Wiedergeburt in neuem Gewand

Seit einigen Jahren jedoch erfahren Simulatoren ein unerwartetes Comeback – allerdings in völlig anderer Form. So leistungsfähig Digitalrechner auch geworden sind, es gibt immer noch Fragestellungen, an denen sie sich die Zähne ausbeißen. Das fundamentalste dieser Probleme formulierte der berühmte theoretische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman (1918–1988). Die Frage, die er 1981 in einer Rede stellte, war schlicht und tief greifend: Wie simuliert man die physikalische Realität? Oder genauer, wie simuliert man die Realität der Quantenphysik?

Die ganze Tragweite dieses Problems lässt sich auf ein zentrales Prinzip der Quantenmechanik zurückführen: die Überlagerung. Stellen wir uns eine Kompassnadel vor, die genau zwei »Zustände« annehmen kann. Entweder zeigt der Nordpol der Nadel nach oben oder nach unten. Um den Zustand einer Festplatte zu beschreiben, die aus lauter solchen Kompassnadeln besteht, brauchen wir genau so viele Bits – Variablen, die den Wert »oben« oder »unten« annehmen – wie Kompassnadeln. Fügen wir eine weitere Nadel hinzu, erfordert das ein Bit mehr.

Zur Kompassnadel gibt es ein quantenmechanisches Pendant, den Drehsinn von Elektronen, auch Spin genannt. Die physikalische Beschreibung einer Festplatte, auf der jedes Bit in einem Spin gespeichert ist, unterscheidet sich allerdings drastisch von ihrem klassischen Gegenstück. Spins können nicht nur entweder nach oben oder nach unten zeigen – die Quantenmechanik erlaubt zudem, dass sich diese Ausrichtungen überlagern (siehe Grafik oben). Um den Zustand eines Spins zu beschreiben, braucht man daher zwei Zahlen, so genannte Wahrscheinlichkeitsamplituden. Aus deren Quadrat ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, bei einer Messung den Spin in der einen oder anderen Ausrichtung zu finden. Doch solange man nicht misst, zeigt er – und genau das macht die Quantenmechanik so paradox – in beide Richtungen zugleich.

Noch komplizierter wird es, wenn wir es mit mehreren Spins zu tun haben. Denn das Überlagerungsprinzip gilt auch für mehrere Quantenobjekte. Um den Zustand eines solchen Systems zu beschreiben, müsste man die Wahrscheinlichkeitsamplituden aller möglichen Kombinationen der einzelnen Zustände »oben« und »unten« kennen. Für zwei Spins sind das vier Werte ( $2^2$ ) und für drei Spins acht ( $2^3$ ), was noch überschaubar ist. Generell braucht man, um ein System mit N Spins zu beschreiben, genau zwei hoch N Zahlen. Die Anzahl der Werte steigt also exponentiell. Für 40 Spins benötigt man bereits etwa eine Billion Zahlen – eine Datenmenge von mehreren Terabyte, die immerhin noch auf eine Festplatte passt. Doch bereits bei 80 Spins wären Billionen Terabyte erforderlich. Das sind mehr Informationen, als die gesamte Menschheit in ihrer Geschichte angesammelt hat.

Dieses Beispiel zeigt, dass es unmöglich ist, selbst kleine Quantensysteme mit digitalen Computern exakt zu berech-

nen. Richard Feynman schloss daraus: »Die Natur ist nicht klassisch. Und wenn Sie die Natur simulieren wollen, dann sollten Sie sichergehen, dass diese Simulation quantenmechanisch ist.« Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten. Entweder man baut einen Digitalrechner mit quantenmechanischen Zählseinheiten, so genannten Qubits – den Quantencomputer, an dem Forscher seit Jahren intensiv arbeiten. Oder aber man entwickelt analoge Computer ähnlich den Netzwerkanalysatoren, also Quantensimulatoren.

## Wie fängt man Atome?

Dafür sind Quantenobjekte nötig, deren Eigenschaften die Forscher kennen und die sie leicht steuern können. In den letzten Jahren haben Physiker verschiedene solcher Objekte untersucht, etwa in elektrischen Feldern eingeschlossene Ionen, Lichtteilchen oder auch Supraleiter, also Materialien ohne elektrischen Widerstand unterhalb einer bestimmten Temperatur. All diese Ansätze haben ihre Vor- und Nachteile. Ionen zum Beispiel lassen sich problemlos einfangen und kontrollieren, allerdings sind sie als geladene Teilchen empfindlich gegenüber störenden elektrischen Feldern. Zudem ist es nicht leicht, mit mehr als etwa einem Dutzend von ihnen gleichzeitig zu arbeiten. Supraleitende Bauteile wiederum können gemäß den Bedürfnissen der Forscher maßgefertigt werden, doch auch hier ist es schwierig, sehr viele von ihnen zu einem großen System zusammenzuschließen.

Ein viel versprechender Ansatz besteht darin, ungeladene Atome auf niedrigste Temperaturen abzukühlen und dann

in »optischen Gittern« aus Laserlicht einzufangen (siehe Kasten unten). Neutrale Atome sind relativ unempfindlich gegenüber Störungen durch elektromagnetische Felder. Forscher können leicht mehrere Millionen von ihnen fangen und praktisch beliebig manipulieren, beispielsweise mit Laserstrahlen. Beste Voraussetzungen also, um Quantensimulatoren zu bauen. Die Szenarien, die Forscher dann mit den gefangenen Atomen durchspielen können, sind vielfältig.

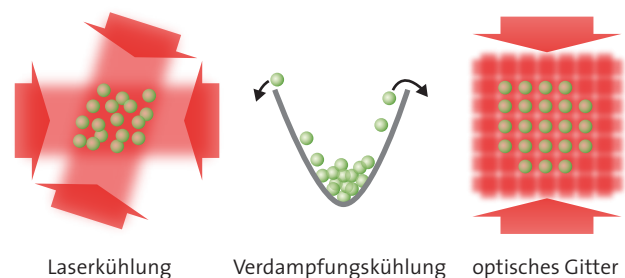
Jeder Festkörper zum Beispiel ist ein System, das aus sehr vielen Teilchen besteht. Daher fällt es Physikern oft nicht leicht, das Verhalten von Metallen, Halbleitern oder Supraleitern aus den Eigenschaften der Atome direkt herzuleiten. Bis heute verstehen die Theoretiker etwa nicht wirklich, warum einige der supraleitenden Materialien elektrischen Strom noch bei ungewöhnlich hohen Temperaturen verlustfrei leiten. Quantensimulatoren könnten helfen, solche Phänomene zu begreifen und vielleicht sogar neuartige Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften zu entwickeln.

Bereits 2002 bauten Wissenschaftler der Ludwig-Maximilians-Universität München einen einfachen Quantensimulator. Sie wollten einen Prozess erzeugen, den Festkörperphysiker schon 20 Jahre zuvor theoretisch vorhergesagt hatten. Die Ausgangsfrage: Wie verhalten sich Quantenteilchen, die sich in einem periodischen Potenzial bewegen – etwa zwischen den Feldern der geladenen »Atomrumpfe« in einem Kristallgitter – und zudem einander abstoßen, wenn sie sich begegnen? Die Regeln der Quantenmechanik erleichtern dabei die Bewegung der Teilchen. Mit einer bestimmten

## Tiefgekühlt und eingesperrt

**Um Atome einzufangen**, müssen sie erst extrem abgekühlt werden. Die Laserkühlung (links) beruht darauf, dass Atome (grün) einen Rückstoß erfahren, wenn sie ein Lichtteilchen (Photon) absorbieren. Zum Abkühlen verschieben Physiker die Wellenlänge des Lasers leicht gegenüber der Resonanzfrequenz, bei der ein Atom am stärksten absorbiert, zu einer etwas größeren Wellenlänge. Dann nutzen sie den Dopplereffekt, der uns den Ton eines sich nähernden Krankenwagens höher wahrnehmen lässt. Teilchen, die auf den Laser zufliegen, erscheint das Laserlicht mit kleinerer Wellenlänge und damit näher an der Resonanzfrequenz. Sie absorbieren also mehr Photonen als solche, die bereits stillstehen oder sich vom Laser entfernen. Setzt man Atome solchem Laserlicht aus allen drei Raumrichtungen aus, verlieren sie nach und nach ihre Bewegungsenergie und werden extrem kalt – bis zu wenigen millionstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt von minus 273,15 Grad Celsius.

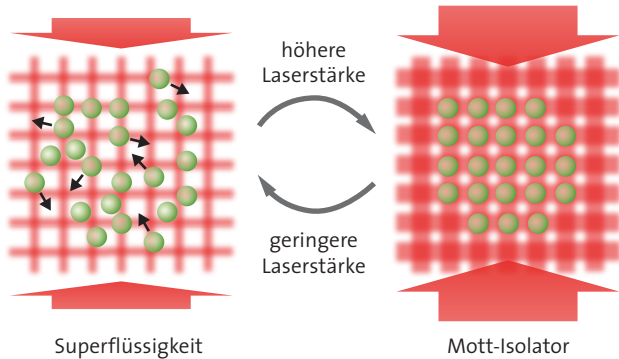
Noch kälter werden die Atome dann in magnetischen oder optischen Fallen (Mitte). Hier führen Physiker die »Verdampfungskühlung« herbei, die ähnlich funktioniert, als würde man leicht über ein heißes Getränk blasen. Die energiereichsten entkommen aus dem Potenzialtopf und die verbleibenden



nehmen einen neuen thermischen Gleichgewichtszustand bei niedrigerer Temperatur ein.

Sind die Teilchen erst einmal kalt und somit langsam genug, fangen Forscher sie in einem »optischen Gitter« (rechts). Dabei nutzen sie die so genannte Dipolkraft, die ein Laser auf ein Atom ausübt. Sie zieht es zum Ort größter Lichtintensität, bei einem gebündelten Laserstrahl also zum Brennpunkt. Für ein Gitter überlagern die Physiker mehrere Laserstrahlen. Dadurch bilden sich Interferenzstreifen mit abwechselnd hoher und niedriger Lichtstärke. Mit vielen genau aufeinander abgestimmten Laserstrahlen können die Wissenschaftler die Potenzialtöpfe praktisch beliebig anordnen und einzelne Atome darin festhalten.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ANIK BECKERS



**Steigt die Laserstärke im optischen Gitter, kommt es zu einem Quantenphasenübergang: Zunächst können sich die Atome (grün) reibungsfrei in einer Superflüssigkeit bewegen. Bei intensiverem Licht werden die Potenzialtöpfe tiefer, und die Teilchen erstarren zu einem Mott-Isolator.**

Wahrscheinlich können sie benachbarte Potenzialtöpfe »durchtunneln«, selbst wenn sie nach den Gesetzen der klassischen Physik nicht genügend Energie hätten, diese Barrieren zu überwinden. Aus den Rechnungen von theoretischen Physikern wusste das Team aus München, dass es bei extrem tiefen Temperaturen und einem bestimmten Verhältnis zwischen den Abstoßungskräften und der Tiefe der Potenzialtöpfe einen quantenmechanischen Phasenübergang geben sollte. Das ist eine Umwandlung zwischen grundverschiedenen Zuständen, die wir in anderer Form aus dem Alltag kennen, etwa wenn Wasser siedet und zu Dampf wird.

Der Phasenübergang der Quantenteilchen im Kristallgitter hat zwar eine andere Ursache, denn nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt kommt jede thermische Bewegung zum Stillstand, und nur noch eine Art Quantenrauschen treibt dann alle Prozesse an. Doch es gibt eine anschauliche Erklärung für das, was geschieht. Wenn die abstoßenden Kräfte, die im Kristallgitter herrschen, gering sind, können sich die Atome recht frei bewegen. Sie tunneln dann sehr leicht zwischen den Potenzialtöpfen, die sie normalerweise an einzelnen Stellen festhalten würden, hin und her – sie sind »superflüssig«. Dann fällt auch die Wechselwirkung zweier Atome, die sich zufällig am selben Ort im Gitter befinden, kaum ins Gewicht. Tiefe Potenzialtöpfe dagegen halten die Atome relativ fest auf ihren Plätzen (siehe Illustration oben). Dann macht es einen großen Unterschied, ob sich dort ein oder zwei Teilchen befinden. Wenn ein Atom auf einen bereits besetzten Gitterplatz tunnelt, ist das wegen der gegenseitigen Abstoßung der Atome energetisch extrem ungünstig. Das führt dazu, dass das System einen Zustand einnimmt, in dem sich die Atome überhaupt nicht mehr bewegen – es entsteht ein so genannter Mott-Isolator.

In Festkörpern konnte niemand den Phasenübergang zum Mott-Isolator direkt nachweisen. Im Quantensimulator dagegen war es für das Team aus München recht einfach. Dazu stellten sie ein Bose-Einstein-Kondensat her: ein quantenmechanisches Phänomen, bei dem bestimmte Teilchen

bei sehr niedrigen Temperaturen einen gemeinsamen Zustand einnehmen. Das Kondensat fingen sie dann in einem dreidimensionalen optischen Gitter ein und erzeugten so eine Art künstlichen Festkörper. Zunächst stellten sie die Laser, die das Gitter bildeten, so ein, dass die Potenzialtöpfe seicht waren und die Atome dadurch leicht hin- und hertunneln konnten. Um das zu überprüfen, ließen die Physiker die Atome aus dem Gitter herausfallen – indem sie die Laser einfach ausschalteten. Da jedem Teilchen eine Materiewelle zugeordnet ist, überlagerten sich die einzelnen Wellenzüge der Atome und bildeten auf einem Detektor ein charakteristisches Interferenzmuster. Daraus konnten die Forscher auf eine Superflüssigkeit schließen. Danach erhöhten sie die Laserstärke schrittweise und machten die Töpfe so immer tiefer. Bei einer bestimmten Laserstärke verschwand das Interferenzmuster plötzlich – für die Münchner Wissenschaftler ein klares Zeichen dafür, dass die Atome nun nicht mehr frei umherschirrten, sondern an einzelne Gitterplätze gebunden waren. Aus der Superflüssigkeit war ein Mott-Isolator geworden.

### Einzelne Teilchen sichtbar machen

Um etwas über einen Festkörper zu erfahren, müssen Forscher in der Regel einen indirekten Weg gehen. Zum Beispiel legen sie eine Spannung an und messen, wie viel Strom fließt, oder sie setzen das Material zusätzlich noch magnetischen oder elektrischen Feldern aus. Den einzelnen Elektronen beim Fließen zusehen können sie jedoch nicht.

In einem optischen Gitter dagegen ist es prinzipiell möglich, jedes Atom einzeln sichtbar zu machen. Einfach ist das allerdings nicht, denn der Abstand der Gittertöpfe entspricht nur etwa der Wellenlänge des Lichts. Diese wiederum beschränkt das Auflösungsvermögen eines Mikroskops. Die Gesetze der Optik scheinen es also kaum möglich zu machen, zwei derart benachbarte Atome getrennt voneinander zu beobachten. Doch genau das gelang zwei Forschergruppen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und an der amerikanischen Harvard University. Sie kombinierten geschickt ein hochauflösendes Mikroskop mit den Vakuumeinrichtungen und Laserstrahlen, die für Experimente mit kalten Atomen nötig sind. Der Lohn der Mühe war ein einmaliger Einblick in das Innenleben eines quantenphysikalischen Vielteilchensystems. Damit konnten die Forscher einzelne Atome sichtbar machen und so nachweisen, dass in einem Mott-Isolator tatsächlich genau ein Atom einen Gitterplatz besetzt (Bilder rechts).

Die Möglichkeit, einzelne Atome im Lichtgitter zu beobachten, eröffnete den Physikern ganz neue Perspektiven. So vollzog das Harvard-Team nach, wie ein Quantenmagnet entstand. Wie beim Mott-Isolator geht auch diesem Prozess ein Phasenübergang voraus. In der klassischen Physik richten sich bei einer Kette von Magneten benachbarte Kompassnadeln gleich aus. Schüttelt man diese Anordnung nun, wird an einem bestimmten Punkt die Stärke der rüttelnden Kräfte die ordnenden Anziehungskräfte der Nadeln überstei-



gen. Es kommt dann zu einem Phasenübergang von einem magnetischen zu einem nichtmagnetischen Zustand.

Bei einem System aus Quantenmagneten kann es ebenfalls zu so einer Situation kommen. Um das zu beobachten, modellierten die Forscher eine Kette von Spins. Dazu verwendeten sie aber nicht Spin tragende Elektronen, sondern Atome in einem optischen Gitter. Diese Atome waren zwar selbst nicht magnetisch, doch die Physiker wandten einen Trick an und konnten als charakteristische Eigenschaft statt der Spinrichtung die Zahl der Teilchen verwenden, die sich auf den jeweiligen Gitterplätzen befanden. War an jedem dieser Punkte genau ein Atom, so interpretierten sie dies als eine Kette von nach oben ausgerichteten Spins.

Den magnetischen Quantenphasenübergang simulierten die Forscher, indem sie ein äußeres Feld hinzufügten und so das Gitter »kippten«. Der Höhenunterschied zwischen benachbarten Gitterplätzen entsprach bei einer bestimmten Stärke des Felds genau der Energiebarriere, die sich aus der Abstoßung zwischen den Atomen ergab. So konnten einige Atome auf einen bereits besetzten Gitterplatz tunneln, während der frei gewordene Platz unbesetzt blieb. Dadurch ergaben sich die gleichen Bedingungen wie bei einem so genannten Antiferromagneten: Benachbarte »Spins« zeigten in entgegengesetzte Richtungen. Während sie das Gitter immer weiter kippten, verfolgten die Physiker, wie sich die künstlichen Spins nach und nach gegenständig anordneten und so den Phasenübergang zum Antiferromagneten vollzogen.

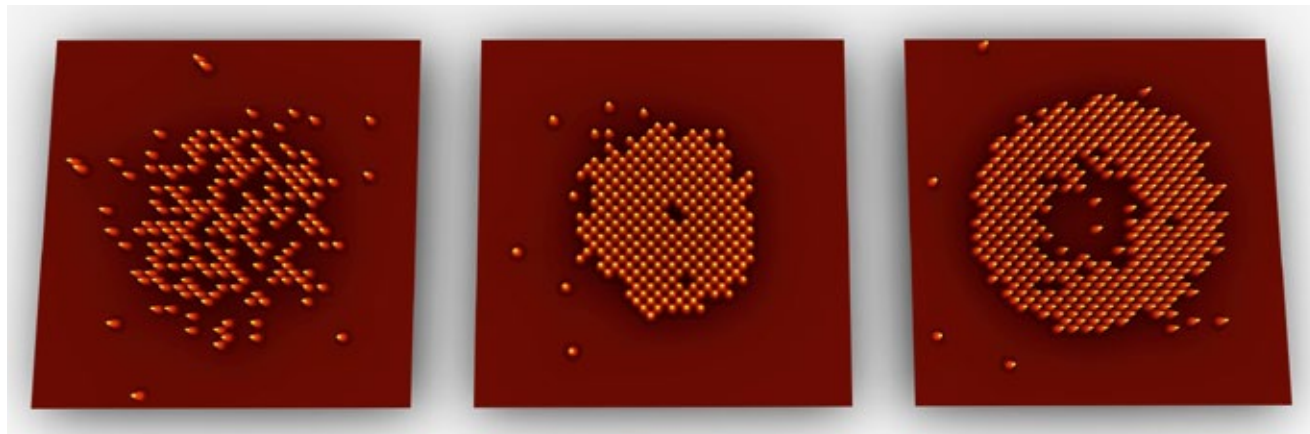
### Simuliertes Graphen

Mit Quantensimulatoren untersuchen Physiker immer komplexere Phänomene. Auch die Geometrie der optischen Gitter können die Forscher inzwischen nach ihren Bedürfnissen verändern. Zum Beispiel erzeugte ein Team an der Eidgenössisch Technischen Hochschule (ETH) Zürich 2011 mit Hilfe einer geschickten Kombination von Laserstrahlen eine Gitterstruktur, die Honigwaben ähnelte. Damit simulierten die Forscher das Verhalten von Elektronen in einem Material, in das Designer neuartiger elektronischer Bauelemente derzeit viele Hoffnungen setzen: Graphen. In diesem Stoff ordnen sich Kohlenstoffatome zweidimensional und wabenförmig an, was außergewöhnliche Effekte bei Stromleitung und Wärme-

transport verursacht. Diese Eigenschaften entstehen unter anderem wegen Besonderheiten der Energieniveaus der Elektronen im Kristallgitter an so genannten Diracpunkten. In normalen Materialien bilden die möglichen Elektronenenergien »Bänder«, die sich an bestimmten Punkten zwar nahekommen, aber dennoch voneinander getrennt bleiben. In Graphen dagegen berühren sie sich an den Diracpunkten, was die Bewegung der Elektronen radikal verändert. Durch die eigenartige Bandstruktur verhalten sie sich wie relativistische Teilchen nahe der Lichtgeschwindigkeit, obwohl sie eigentlich sehr langsam sind. Die ETH-Forscher fingen in ihrer Wabenanordnung aus Laserstrahlen Kaliumatome ein, die sich fortan ähnlich wie Elektronen in einer Graphenstruktur verhielten. Unter präzise kontrollierbaren Bedingungen studierten sie nun auch Prozesse, die mit »echtem« Graphen unmöglich gewesen wären, beispielsweise konnten sie die Form des Gitters verändern und die einzelnen Diracpunkte verschieben und miteinander verschmelzen.

Mittlerweile gelingt es Forschern sogar, in optischen Gittern künstliche magnetische Felder herzustellen. Solche Felder sind nötig, um das Verhalten von geladenen Teilchen zu simulieren, etwa der Elektronen. Denn auf diese wirkt in einem Magnetfeld eine Kraft senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung. Diese so genannte Lorentzkraft beeinflusst das Verhalten von Festkörpern in starken Magnetfeldern erheblich. Besonders interessant wird es zudem, wenn sich die Teilchen nur in zwei Dimensionen, also entlang einer Ebene bewegen können. So brachte beispielsweise ein Phänomen in einem derartigen System – der »Quanten-Hall-Effekt« – seinem Entdecker 1985 den Physiknobelpreis ein. Zweidimensionale Strukturen sind in Quantensimulatoren mit kalten Atomen leicht herstellbar. In Zukunft sollte es möglich werden, auch ausreichend starke künstliche Magnetfelder zu erzeugen und das Verhalten von Elektronen unter diesen Bedingungen zu simulieren. Die künstlichen Magnetfelder können

Unter einem hochauflösenden Mikroskop beobachteten Forscher die einzelnen Atome (hellrote Punkte) eines ungeordneten Kondensats (links) und den Übergang zu Mott-Isolatoren (Mitte, rechts).



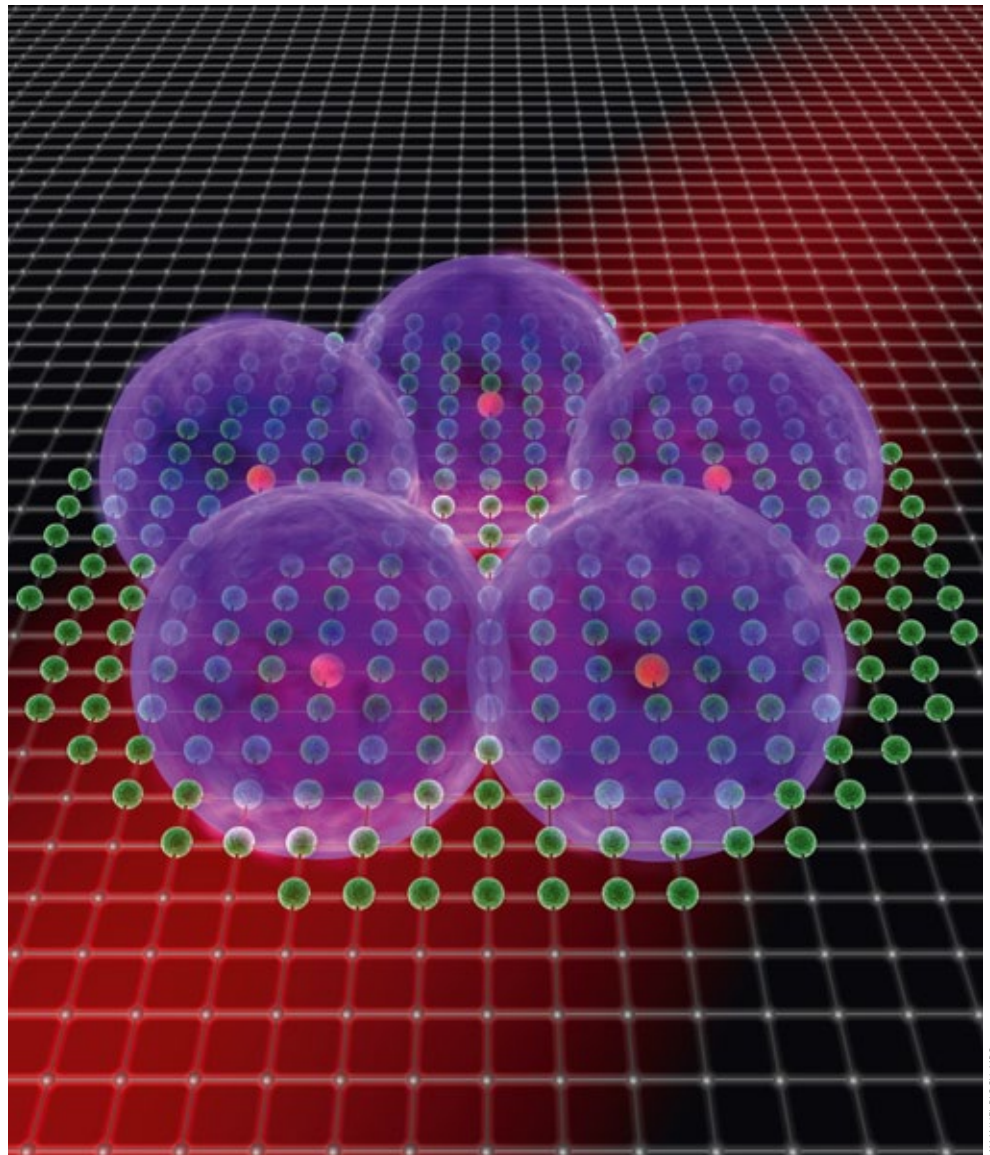
STEFAN KUHR UND IMMANUEL BLOCH, MPQ

dabei im Prinzip tausendmal stärker sein als die der heute weltbesten Magneten. Was derart intensive Felder bewirken könnten, weiß noch niemand – die Forscher hoffen also auf Überraschungen.

In Festkörpern beeinflussen nicht nur äußere Felder die Elektronen, sondern auch die Felder anderer Teilchen. Generell ergeben sich viele interessante Eigenschaften von Quantensystemen dadurch, dass ihre Bestandteile stark miteinander wechselwirken, sich also anziehen oder abstoßen. In den meisten bisher realisierten Quantensimulatoren mit Atomen wirkt aber nur die so genannte Kontaktwechselwirkung. Sie kommt zum Tragen, wenn sich zwei oder mehr Teilchen im gleichen Potenzialtopf eines optischen Gitters aufhalten. Objekte, die weiter voneinander entfernt sind, »sehen« einander so gut wie überhaupt nicht. Eine stärkere Wechselwirkung auf größere Distanz könnte dadurch erreicht werden, dass man die Atome mit Hilfe von Laserpulsen in so genannte Rydbergzustände versetzt (Grafik unten). Dabei handelt es sich um hoch angeregte Energiezustände, in denen das ä-

ßerste Elektron eines Atoms den Kern in einem tausendfach größeren Abstand als normal umkreist und dadurch sehr empfindlich auf elektrische Felder reagiert. Kommen sich zwei solche Rydbergatome nahe, erzeugt die Elektronenbewegung im jeweils anderen Atom kurzfristig ein elektrisches Feld, so dass eine Kraft entsteht. Diese kann mehrere Mikrometer weit reichen. Die Stärke der Kräfte können die Forscher genau einstellen. Schon jetzt erzeugen sie mit Rydbergatomen kristallähnliche Strukturen. In Zukunft wollen die Wissenschaftler mit solchen Atomen verschiedene physikalische Systeme modellieren, etwa Molekülkomplexe, die in Organismen für die Photosynthese wichtig sind.

Die Möglichkeiten von Quantensimulatoren sind aber noch lange nicht damit ausgeschöpft, nur die Prozesse in Festkörpern zu untersuchen. Mit Atomen in optischen Gittern können Wissenschaftler beispielsweise Phänomene simulieren, die man normalerweise mit Teilchenbeschleunigern wie dem CERN bei Genf in Verbindung bringt. So fanden Forscher 2012 am Max-Planck Institut für Quantenoptik in



Um in Quantensimulatoren stärkere Wechselwirkungen zu erzeugen, können die Atome in so genannte Rydbergzustände versetzt werden, bei denen die Elektronenhülle extrem aufgebläht ist. Dann reagieren sie sehr empfindlich auf Einflüsse aus einer weiten Umgebung.



Garching so genannte Higgs-Anregungen. Dabei handelt es sich um kollektive Bewegungen der Teilchen. Sie verhalten sich ähnlich wie relativistische Objekte bei höchsten Energien, nämlich die berühmten Higgs-Bosonen, deren Entdeckung im gleichen Jahr zum Physiknobelpreis 2013 führte.

Der Higgs-Mechanismus ist heute eher aus der Elementarteilchenphysik bekannt. Seinen Ursprung jedoch hat er in der Theorie der Festkörper. In ihren Experimenten mit kalten Atomen stellten die Physiker keine Higgs-Bosonen her, aber ihr Quantensystem folgte ähnlichen physikalischen Gesetzen. Die Garching Forscher untersuchten das genaue Verhalten eines kalten Gases beim Phasenübergang zu einem Mott-Isolator. Zuerst erzeugten sie in einem zweidimensionalen optischen Gitter ein Bose-Einstein-Kondensat. Dann veränderten sie die Intensität der Laserstrahlen und damit die Tiefe des Gitters periodisch für einige Millisekunden. Sie maßen sehr genau, wie sich die Temperatur des Gases durch diese Störung verändert hatte und konnten so darauf schließen, wie das Quantengas reagierte. In der Nähe des Phasenübergangs verhielt sich das kollektive System genau so, wie Theoretiker es bei einer Higgs-Anregung erwarten würden. So bieten Quantensimulatoren also sogar die Möglichkeit, diese Phänomene bei tiefsten Temperaturen zu studieren und unter Umständen auch Rückschlüsse auf Prozesse zu ziehen, die sich in Teilchenbeschleunigern bei trilliardenfach höheren Energien abspielen.

### Feynmans Vision wird greifbar

Forscher können Quantensimulatoren vielfältig einsetzen. Mit ihnen lassen sich Prozesse aus verschiedensten Bereichen der Physik im Labor nachstellen. Besonders aufregend erscheint darüber hinaus die Möglichkeit, ganz neue Materialien und Systeme zu modellieren, für die es bisher noch keine Vorbilder in der Natur gibt. Solche Experimente könnten dann wiederum Ideen für Anwendungen liefern, an die im Moment noch niemand denkt.

Den Netzwerkanalysatoren, die vor 100 Jahren Überlandleitungen und Umspannwerke simulierten, erging es übli-

gens ganz ähnlich. Bald entdeckte man das Potenzial, mit ihnen völlig andere Rechnungen durchzuführen. Es stellte sich heraus, dass die Differenzialgleichungen, welche die Analysatoren mit ihren zahllosen Bauelementen auf analoge Weise lösten, eine Vielzahl von physikalischen Systemen mathematisch beschreiben konnten. Deswegen ließen sich die Apparaturen für ganz andere Simulationen zweckentfremden. So konnten sie die Verformung von Materialien berechnen oder sogar die Schrödinger-Gleichung lösen, welche die mathematische Grundlage der Quantenmechanik bildet.

Natürlich hoffen Wissenschaftler noch immer darauf, dass ihnen gelingt, was Richard Feynman in seiner Rede beschrieb – nämlich einen universalen Quantencomputer zu bauen, der sich beliebig programmieren lässt und damit jedes Quantensystem berechnen kann. Tatsächlich läuft die Forschung an solchen Computern seit Jahren auf Hochtouren. Bisher gibt es allerdings nur einige Prototypen mit wenigen Qubits, die noch nicht für nützliche Rechnungen taugen. Einstweilen sind Simulatoren also unverzichtbar, um viele Prozesse besser zu verstehen. Sie werden noch einige Jahre ihr Potenzial ausspielen können – in der Quantenmechanik und weit darüber hinaus. ~

### DIE AUTOREN



**Oliver Morsch** (links) erforscht an der Università di Pisa Atome in optischen Gittern. **Immanuel Bloch** ist Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching und leitet dort die Abteilung Quanten-Vielteilchensysteme.

### QUELLE

**Bloch, I. et al.:** Quantum Simulations with Ultracold Quantum Gases. In: Nature Physics 8, S. 267–276, 2012

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1304062](http://www.spektrum.de/artikel/1304062)





Manche Symmetrien wie diese sind höchst instabil – eine kleine Störung genügt, um das System aus dem Gleichgewicht zu bringen.

SHOJI OSHIMIZU

# Verborgene Symmetrien

Physiker schätzen Symmetrien nicht nur wegen ihrer Schönheit, sondern auch wegen ihrer Nützlichkeit. Wahrhaft faszinieren kann aber ihre – scheinbare – Abwesenheit. Denn dann befinden sich die Forscher möglicherweise auf dem Weg, tiefere Strukturen der Wirklichkeit zu erkennen.

Von Frank Close

Nicht nur für Physiker sind Symmetrien etwas ganz besonderes. Menschen nehmen sie generell als harmonisch und ästhetisch befriedigend wahr; Symmetrien fühlen sich einfach richtig an. Auch in der Natur spielen sie eine herausragende Rolle, weshalb sie Forschern oft als Wegweiser zu neuen Theorien dienen. Dabei ist die Natur häufiger asymmetrisch als symmetrisch, und oftmals sind es gerade Asymmetrien, die uns Hinweise auf die wahre Natur der Realität liefern. Genau das widerfuhr Peter Higgs und François Englert, als sie vor 50 Jahren auf eine mögliche Erklärung dafür stießen, warum Elementarteilchen Masse besitzen. Dieses Phänomen, das wir heute Higgs-Mechanismus nennen, brachte den beiden Physikern im vergangenen Jahr sogar den Nobelpreis ein.

Mitunter geht Symmetrie sogar aus Asymmetrie hervor. Wir und unsere Umwelt bestehen aus Atomen, die von der Anziehungskraft entgegengesetzter elektrischer Ladungen zusammengehalten werden. Das einfachste Atom, Wasserstoff, enthält nur ein positiv geladenes Proton und ein negatives Elektron. Deren elektrische Ladungen gleichen sich dabei so exakt aus, dass ein Atom aus der Ferne gesehen praktisch nur noch auf die Schwerkraft reagiert.

Dieses perfekte Gleichgewicht der Ladungen kommt allerdings auf vollkommen asymmetrische Weise zu Stande. Nach allem, was wir heute wissen, ist das Elektron ein fundamentaler, nicht aus weiteren Elementen zusammengesetzter Bau-

stein der Materie. Das Proton dagegen nicht: Es besteht aus drei Quarks. Ordnen wir dem Elektron die Ladung  $-1$  zu, tragen die Quarks die Ladungen  $+2/3$  und  $-1/3$ . So sind Kombinationen möglich, in denen sich die Ladung der drei Quarks in einem Proton zu  $+1$  summiert und die der drei Quarks in einem Neutron zur Ladung null führen. Obwohl also Protonen komplex aufgebaut, Elektronen jedoch sehr einfache Objekte sind, entsprechen die Ladungen der Teilchen einander exakt so, dass das Atom insgesamt elektrisch neutral ist. Das deutet auf eine tiefere Symmetrie, die Elektronen und Quarks miteinander verbindet, auch wenn wir noch nicht wissen, um welche es sich handeln könnte.

## Warum weisen schnelle Leichtgewichte und ein ruhender schwerer Kern exakt dieselbe Ladung auf?

Dass sich Quarks zu Protonen oder Neutronen zusammenschließen, sorgt auch für Merkwürdigkeiten bei der Addition der Massen. Damit ein Quark in dem winzigen Raum lokalisiert bleibt, den ein Proton bietet – dieses durchmisst gerade einmal  $10^{15}$  Meter –, muss seine Energie immens hoch sein; das ergibt sich aus der Unschärferelation der Quantenmechanik. Wie die berühmte Formel  $E=mc^2$  zeigt, wobei  $E$  die Energie,  $m$  die Masse und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist, entspricht dieser Energie eine Masse. Die aufsummierten Quarkenergien verschaffen dem Proton so die nahezu 2000-fache Masse eines Elektrons. In jedem Atom sausen also schnelle Leichtgewichte um einen statischen und sehr schweren Kern herum, und trotz ihrer Unterschiedlichkeit schaffen es beide doch, die entgegengesetzte Ladung des jeweils anderen genau auszugleichen.

Leicht stößt man in der Welt der Elementarteilchen auf weitere Asymmetrien. Warum gibt es in unserer Umwelt keine Atome aus negativ geladenen Protonen und positiv geladenen Elektronen? Schließlich funktionieren die Regeln der elektrischen Anziehung und der Quantenmechanik für diese so genannte Antimaterie genauso wie für normale Materie. Doch es gibt da ein Problem.

Wenn das Universum in einem heißen Urknall aus dem Nichts entstanden ist, dann sollte die Energie dieses Ereignisses unseren Theorien zufolge genau gleiche Mengen an Ma-

## AUF EINEN BLICK

### WIE SYMMETRISCH IST DIE NATUR?

- 1 Symmetrien spielen in der Physik eine große Rolle, weil sie den **Weg zu völlig neuen Erkenntnissen** bahnen können.
- 2 Manche Phänomene wirken allerdings völlig unsymmetrisch, wie etwa die Dominanz von Materie gegenüber Antimaterie. Verbirgt sich dahinter eine **Asymmetrie der Naturgesetze**?
- 3 Möglicherweise ist die tiefere Symmetrie eines solchen Phänomens aber nur **verborgen**. Gegenüber dem instabilen Ursprungszustand hätte die Natur dann ein **asymmetrisches, aber stabiles System** bevorzugt.

terie und Antimaterie erzeugt haben. Doch beim Kontakt miteinander verwandeln sich Materie und Antimaterie in Strahlungsenergie. Kurz nach dem Urknall hätten sie sich also einfach gegenseitig wieder vollständig zerstört.

Diese schöne Symmetrie beobachten wir allerdings nicht: Das uns bekannte Universum besteht ausschließlich aus Materie und enthält fast keine Antimaterie – es weist also eine fundamentale Asymmetrie auf. Ihre Ursache kennen wir nicht. Vielleicht liegt die Lösung dieses großen Rätsels in einer Asymmetrie der Naturgesetze, die wir noch nicht entdeckt haben. Vielleicht handelt es sich aber auch um ein Beispiel dafür, dass uns eine grundlegende Symmetrie der Natur verborgen bleibt – dass die physikalische Welt uns also radikal anders erscheint, als ihre tiefere Struktur es erwarten ließe.

Auch das Leben selbst liefert ein Beispiel für eine verborgene Symmetrie. Auf den ersten Blick erscheint der menschliche Körper im Großen und Ganzen spiegelsymmetrisch, doch unsere inneren Organe bilden Ausnahmen. Eine der Ursachen dafür ist die asymmetrische Funktion des Herzens. Die linke Herzkammer pumpt mit Sauerstoff angereichertes Blut in den Körper – dafür muss sie stark sein. Die andere Herzkammer schickt das Blut zur Sauerstoffanreicherung in die Lungen – die aber liegen direkt neben dem Herzen, sie muss folglich viel weniger leisten. Da die linke Seite des Herzens entsprechend kräftiger ist als die rechte und das Herz ohnehin leicht nach links versetzt ist, haben wir das Gefühl, es sitze links; lediglich bei einem von 20 000 Menschen sind die Organe spiegelverkehrt angeordnet. Aus dieser Asymmetrie des Herzens ergibt sich schließlich auch eine asymmetrische Anordnung der anderen inneren Organe.

Auf einer noch tieferen Ebene, bei den Molekülen des Lebens, stoßen wir ebenfalls auf eine Asymmetrie. Louis Pasteur (1822–1895), der französische Chemiker und Mikrobiologe, fragte sich sogar, ob »die Existenz des Lebens selbst eine Folge kosmischer Asymmetrie« ist. Die Gesetze der Quantenmechanik sorgen dafür, dass das Kohlenstoffatom, das Ba-

siselement des Lebens, vier Bindungen besitzt, an die andere Atome andocken können. Ein einfaches Beispiel ist Methan,  $\text{CH}_4$ , das die Form eines symmetrischen Tetraeders aufweist, mit dem Kohlenstoffatom im Zentrum und den vier Wasserstoffatomen in den Ecken.

### Auch das Leben selbst ist auf molekularer Ebene asymmetrisch

Ganz anders sieht es aus, wenn an den vier Bindungsstellen je unterschiedliche Atome oder Moleküle andocken. In Milch findet sich beispielsweise das nicht rotationsymmetrische Molekül der Milchsäure, dessen Spiegelbild sich biochemisch anders verhält als das Original. In Lewis Carrolls »Alice hinter den Spiegeln« fragt sich die Titelheldin, ob Spiegelmilch wohl trinkbar sei. Sicher ist: Mit der einen Molekülvariante kommt der menschliche Stoffwechsel besser zurecht als mit der anderen.

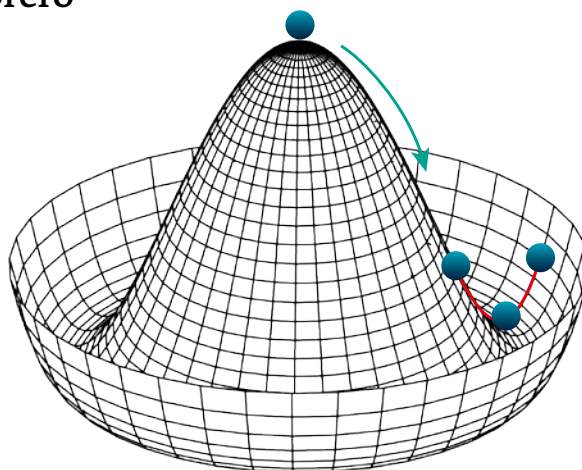
Zu den komplexeren Lebensbausteinen zählen die Aminosäuren. Auch sie besitzen eine Tetraederstruktur und können als Isomere auftreten, also in Form zweier zueinander spiegelbildlicher Versionen. Jeweils nur eine dieser Versionen ist mit Leben verträglich, jedenfalls mit den uns bekannten Lebensformen. Anders gesagt: Während die Naturgesetze beide Molekülformen erlauben, nutzt das irdische Leben ausschließlich eine davon. Das Leben verbirgt also eine fundamentale Symmetrie auf molekularer Ebene.

Eng mit der Symmetrie verknüpft ist die Stabilität. Schiebt man einen Einkaufswagen mit beiden Händen exakt in der Mitte des Griffs, so scheint er ein Eigenleben zu entwickeln. Er bricht aus, mal nach rechts und mal nach links, die Situation ist hochgradig instabil. Schon eine geringe Abweichung von der perfekten Symmetrie – wenn die eine Hand ein wenig stärker als die andere drückt – zerstört sofort das Gleichgewicht und lenkt den Wagen von der geraden Bahn ab.

Wie sieht es bei Systemen aus, in denen lediglich eine einzige Kraft am Werk ist, die Gravitation? Newton hat uns ge-

## Das Higgs im Sombbrero

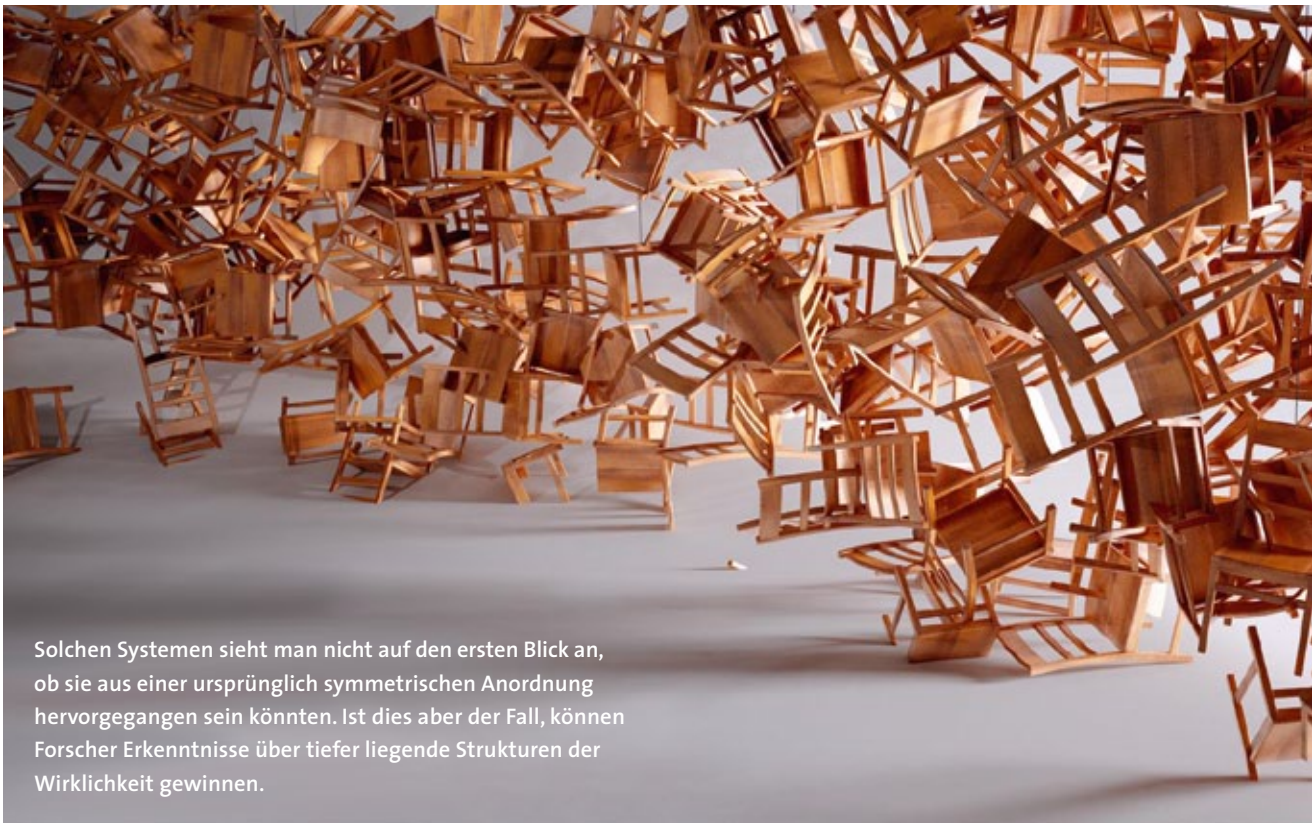
**Befindet sich ein Ball** exakt auf der Spitze eines Sombros, ist diese Situation zwar symmetrisch, aber instabil: Die kleinste Störung lässt ihn herabrollen. Dabei geht zwar die Symmetrie verloren, dafür erreicht der Ball einen stabilen Zustand. Dieser neue Gleichgewichtszustand »verbirgt« die ursprüngliche symmetrische Konfiguration.



Das Higgs-Feld (blaue Kugel) befindet sich in einer Energielandschaft, die wie ein Sombro geformt ist. Von einem ursprünglichen instabilen Zustand hoher Energie wandert es in einen energetisch niedrigeren, stabilen Zustand. Dort oszilliert es infolge der Unschärferelevanz der Quantenmechanik, wodurch Higgs-Teilchen entstehen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH RUPERT MULLAND





SIMON DANAEHER

Solchen Systemen sieht man nicht auf den ersten Blick an, ob sie aus einer ursprünglich symmetrischen Anordnung hervorgegangen sein könnten. Ist dies aber der Fall, können Forscher Erkenntnisse über tiefer liegende Strukturen der Wirklichkeit gewinnen.

lehrt, dass die von einem Körper ausgehende Schwerkraft sich nicht um Richtungen schert; sie wirkt kugelsymmetrisch. Man würde also erwarten, dass ihre Wirkung zu kugelartigen Formen führt. Dafür gibt es schöne Beispiele wie Mond und Sonne, ebenso manche Galaxien. Doch die meisten Galaxien sind gerade nicht kugelsymmetrisch: Spiralgalaxien erscheinen abgeflacht und erstrecken sich vorzugsweise entlang einer ganz bestimmten Ebene. Würden wir lediglich die Andromedagalaxie kennen, würden wir vielleicht vermuten, dass die Schwerkraft nur in zwei Dimensionen symmetrisch ist.

Tatsächlich ist eine sphärische Galaxie extrem instabil. Wenn sich nicht alle ihre Sterne von vornherein an genau der richtigen Position befinden, während sie unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen, kugelsymmetrischen Anziehung aufeinanderzufallen, werden einige von ihnen über ihr Ziel hinauschießen und später wieder zurückkehren. So oszillieren sie hin und her, bis sich eine stabile Konfiguration einstellt. Doch jede kleine Störung von außen – etwa die Gravitation einer anderen Galaxie – kann das fragile Gleichgewicht zerstören. In einer solchen Situation zieht die Natur Stabilität der Symmetrie vor: Ein symmetrisches, aber instabiles System wandelt sich in ein stabiles, dessen Symmetrie aber verborgen bleibt. Aus instabiler Symmetrie wird stabile Asymmetrie.

Für die Gesamtheit aller Galaxien im Kosmos bleibt die dreidimensionale Symmetrie jedoch erhalten, da die Ebenen der Spiralgalaxien zufällig im Raum orientiert sind. Die Symmetrie ist also nur individuell verborgen, im Universum als Ganzem besteht sie fort.

Das Prinzip der verborgenen Symmetrie lässt sich auch an einem Sombrero demonstrieren (Grafik links). Dreht man ihn so, dass die Hutspitze nach unten zeigt, kommt eine kleine Kugel darin sofort zur Ruhe. Dieser Zustand ist stabil und rotationssymmetrisch. Dreht man den Sombrero wieder um, ist das Ergebnis ebenfalls rotationssymmetrisch. Doch nun befindet sich ein auf der Hutspitze ruhender Ball in einem labilen Gleichgewicht; schon eine winzige Störung lässt ihn in die Hutkrempe hinunterrollen. Die Symmetrie ist noch immer da, aber jetzt ist sie verborgen.

### Was passiert, wenn ein Photon auf ein Plasma trifft?

Damit kommen wir zurück zum Higgs-Mechanismus. Die Annahme einer bestimmten Symmetrie, der Eichsymmetrie, führt dazu, dass die Quantenfeldtheorie masselose Teilchen vorhersagt. Im Zusammenhang mit dem Elektromagnetismus ist das unproblematisch, da das Trägerteilchen dieser Wechselwirkung, das Photon, tatsächlich keine Ruhemasse besitzt. Doch die Träger der schwachen Wechselwirkung, das W- und das Z-Boson, haben nachweislich Ruhemassen. In diesem Fall ist die grundlegende Symmetrie also verborgen – die Frage ist: auf welche Weise?

Es gibt eine Situation, in der Photonen eben doch eine Masse besitzen. Sie war es auch, die Higgs, Englert und andere auf die richtige Spur gebracht hat. Was passiert, wenn ein Photon auf ein Plasma trifft? Das Photon kann nur dann in ein solches Gas aus ionisierten Teilchen eindringen, wenn seine Frequenz oberhalb der so genannten Plasmafrequenz liegt; liegt sie darunter, wird es reflektiert. Ein Beispiel sind Radiowellen, die

von der Ionosphäre – einer hochgelegenen, plasmaartigen Schicht der Atmosphäre – reflektiert werden, weil sie eine entsprechend niedrige Frequenz haben. Die Frequenz von Licht ist viel höher, weshalb die Strahlung der Sonne und der Sterne die Ionosphäre ungehindert durchquert.

Stellen wir uns vor, in diesem Plasma lebten intelligente Wesen. Sie würden nur Photonen registrieren, deren Energie größer ist als ein bestimmtes Minimum. Aus der Relation  $E=mc^2$  schließen sie dann, dass Photonen, die eine Mindestenergie haben, auch eine Mindestmasse besitzen. Nehmen wir weiter an, ein Plasmaphysiker hätte trotzdem seine Zweifel an dieser Feststellung. Sowohl das elektrische und das magnetische Feld eines Photons schwingt senkrecht zur Bewegungsrichtung; longitudinale Vibrationen, also solche in Bewegungsrichtung, kommen hingegen nicht vor. Die Gesetze der Quantenmechanik verlangen jedoch, dass ein Teilchen mit Ruhemasse solche longitudinalen Wellen erzeugt. Könnte der Plasmaphysiker also nachweisen, dass es solche longitudinalen Wellen nicht gibt, würde sich sein Verdacht bestätigen. Doch das kann er nicht. Bewegt sich nämlich ein Photon durch ein Plasma, versetzt es dieses entlang seiner Bewegungsrichtung in Schwingungen. Kurzum: Innerhalb des Plasmas scheint das Photon wirklich alle Eigenschaften eines massebehafteten Teilchens zu haben. Aus der Perspektive der Plasmabewohner erscheint die grundlegende Symmetrie, die Photonen masselos macht, darum verborgen.

### Wir leben in einem allgegenwärtigen »Plasma«

Higgs, Englert und andere haben diese Idee verallgemeinert und stellten sich vor, der gesamte Raum sei von einer Art Plasma erfüllt. Photonen würden das nicht bemerken, W- und Z-Bosonen dagegen schon – und dadurch eine Ruhemasse erhalten. In diesem Szenario sind wir selbst die Wesen, deren einzige Erfahrung das Leben innerhalb eines seltsamen, allgegenwärtigen Plasmas ist.

Physiker bezeichnen dieses Plasma als Higgs-Feld. Bei seiner mathematischen Beschreibung symbolisiert eine sombreroartige Form (Grafik S. 50) die erwähnte Eichsymmetrie der Quantenfeldtheorie. Ist das Higgs-Feld gleich null, liegt es wie ein Ball auf der Spitze des Sombreros, wo die Energie hoch ist. In dieser symmetrischen Konfiguration sind nicht nur Photonen masselos, auch W- und Z-Bosonen verleiht das Feld dann keine Masse. Doch die Lage des Balls ist höchst instabil, und er rollt schon bald in einen stabilen Gleichgewichtszustand niedriger Energie, also in die Krempe des Sombreros. Hier ist das Higgs-Feld nicht mehr null, so dass es Teilchen nun doch mit Masse ausstattet. Die nach wie vor herrschende Eichsymmetrie erscheint uns ab diesem Zeitpunkt aber verborgen, denn ihre Konsequenz bleibt aus: Die Elementarteilchen sind nicht mehr masselos.

Wie mehrere Forscher 1964 bemerkten, muss der Ball in der Krempe nicht liegen bleiben, sondern kann ihr entlang im Kreis rollen; es gibt also einen zusätzlichen Freiheitsgrad für Schwingungen eines massebehafteten Teilchens wie etwa des W-Bosons. Dieser Umstand entspricht den oben er-

wähnten longitudinalen Vibrationen im Plasma. Higgs war jedoch der Einzige, der auf die Möglichkeit hinwies, dass der Ball auch quer zu dieser Kreisbahn schwingen kann, nämlich die Talwände herauf und wieder herunter. Solche Schwingungen sind eine unvermeidliche Folge der Unschärferelation und entsprechen der Existenz eines weiteren masse-reichen Teilchens, des Higgs-Bosons. Tom Kibble vervollständigte 1967 das Bild, indem er zeigte, wie W- und Z-Bosonen durch Wechselwirkungen mit dem Higgs-Feld ihre Masse erhalten, Photonen aber trotzdem masselos bleiben.

Diese aus einer instabilen Symmetrie geborene stabile Asymmetrie ist weit mehr als ein Kuriosum. Wären W- und Z-Bosonen masselos, wäre die schwache Wechselwirkung genauso stark wie die elektromagnetische. Erstere kontrolliert aber die Fusion von Wasserstoff zu Helium im Inneren der Sonne, und sie hätte in diesem Fall dafür gesorgt, dass unser Zentralgestirn seinen nuklearen Energievorrat bereits lang vor dem Auftauchen der ersten Menschen verbraucht hätte. Erst der Higgs-Mechanismus, so die Schlussfolgerung, macht eine Evolution wie die auf der Erde möglich, die sich über sehr lange Zeiträume erstreckt.

Die Entstehung einer stabilen Asymmetrie aus einer instabilen Symmetrie könnte also der Schlüssel zum Leben, zum Universum und zu nahezu allem sein. Dass es überhaupt ein Sonnensystem gibt, das nicht von Antimaterie zerstört wird, verdanken wir der Abwesenheit Letzterer. Vielleicht stoßen wir eines Tages darauf, dass lokale Überschüsse an Materie oder Antimaterie eine tiefere, globale Symmetrie verbergen. Zwar befinden wir uns in einer sehr großen Region hoher Materiedichte. Aber das Universum ist noch viel größer und könnte ganze Galaxienhaufen aus Antimaterie beherbergen. Die instabile globale Symmetrie wäre auch in diesem Fall hinter einer lokalen stabilen Asymmetrie verborgen.

Vielleicht ist die Dominanz bestimmter Varianten von Aminosäuren ein weiteres Beispiel für dieses Phänomen. Natürliche Auslese könnte einem kleinen Überschuss, der sich auf der jungen Erde einstellte, zu seiner heutigen Dominanz verholfen haben. Obwohl Pasteur noch nicht über unseren Wissensstand verfügte, hatte er möglicherweise Recht: Es gibt uns dank einer kosmischen Asymmetrie. ∞

### DER AUTOR



**Frank Close** ist Professor für Physik an der University of Oxford und Autor zahlreicher Sachbücher, zuletzt »The Infinity Puzzle: Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe« (Oxford University Press, 2011) und »Neutrino« (auf Deutsch bei Springer Spektrum, Heidelberg, Berlin 2012).

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1309285](http://www.spektrum.de/artikel/1309285)

© New Scientist  
[www.newscientist.com](http://www.newscientist.com)



„Meine Energiewende ist einfach und spart bares Geld!“

Macht den Kühlschrank zum Sparschrank:  
Die Sparkassen gratulieren der  
Gewinnerin des Energiewendepreises.



**Großes Finale beim Energiewendepreis der Sparkassen:** Cathrin Eichbaum aus Dortmund holt den ersten Platz. Ihr Tipp: Mit Luft gefüllte Frischhaltedosen reduzieren beim Öffnen der Kühlschranktür das neue Eindringen von Warmluft – so kann jeder kinderleicht Energie sparen. Noch weiter herunterkühlen lässt sich die Temperatur übrigens mit Coolpacks. Eine von vielen Ideen, die zeigen, dass die Energiewende zu Hause anfängt. Alle Ideen auf: [www.meine-energiewende.de/projekte/](http://www.meine-energiewende.de/projekte/)



# Alles im Griff

Dass uns Dinge in feuchter Umgebung einfach aus der Hand rutschen, weiß der menschliche Organismus raffiniert zu verhindern.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Manche Formulierungen, die wir in unserer Alltagssprache ganz selbstverständlich benutzen, haben ihren Ursprung in ferner Vergangenheit. Wenn wir Gelegenheiten ergreifen, Dinge in den Griff bekommen wollen und erst zufrieden sind, wenn wir diesen oder jenen Sachverhalt begriffen haben, spiegelt sich in unseren Redeweisen die uralte, für das Überleben des Menschen entscheidende Funktion des manuellen Greifens, Fassens und Handhabens.

Eine der Voraussetzungen für sicheren Griff, mit denen uns die evolutionären Selektionsmechanismen ausgestattet haben, sind die Reibungskräfte, die zwischen der Hand und dem ergriffenen Objekt wirken. Zuweilen muss man trotzdem nachhelfen. Wer etwa beim Umgraben immer mal wieder in die Hände spuckt, erhöht die Reibung zwischen Spatenstil und Händen – ein

Trick, der sich so sehr bewährt hat, dass der Ausdruck »kräftig in die Hände spucken« zum Synonym für beherztes Anpacken geworden ist. Gleichwohl ist es eher eine Ausnahme, dass feuchte Hände für bessere Griffigkeit sorgen. Gerätesportler etwa pudern ihre Hände mit Magnesiumkarbonat ein, auch Magnesia genannt, das den Schweiß absorbiert und so die Reibung erhöht.

In welchen Fällen sind Reibung und Griffigkeit also größer und in welchen kleiner? Mit Fragen wie dieser beschäftigt sich die Tribologie, zu Deutsch Reibungslehre, der Haut, die sich in den letzten Jahren als eigenständiger Forschungsbereich etabliert hat. Dabei werden auch praktische Aspekte berücksichtigt. Wer sich etwa in früheren Zeiten die Hände eincremte, dem glitschte, was immer er ergriff, gleich wieder aus den Fingern. Inzwischen gibt es aber Hautcremes, die gleich

nach dem Auftragen gute Griffestigkeit garantieren.

Das Maß der Reibung zwischen Händen und Gegenständen hängt von den jeweiligen Materialien ab, aber auch von der Morphologie der wechselwirkenden Oberflächen. Ein augenfälliger Spezialfall ist die geschrumpelte Haut an Händen und Füßen, die sich nach einem ausgiebigen Bad einstellt – als habe das Wasser die Haut aufgeweicht oder aufquellen lassen. Diesen Effekt betrachten wir üblicherweise mit mehr oder weniger Missfallen, doch ist er wirklich ein Makel? Oder profitieren wir nicht selbst von ihm, etwa beim Geschirrspülen, bei dem wir auch Gläser sicher im Griff haben? Ebenso besitzen die Greifbacken vieler Werkzeuge genau deshalb geriffelte Oberflächen, weil sie dann zuverlässiger greifen. Ist das Schrumpeln also entstanden, weil es evolutionäre Vorteile mit sich bringt?

Wissenschaftler der University of Newcastle um Tom Smulders und Kyriacos Kareklas behaupten genau das. Sie forderten Versuchspersonen auf, Glasmurmeln und kleine Bleigewichte, eingeklemmt zwischen Daumen und Zeigefinger, von einem Behälter in einen anderen zu bewegen. In der ersten Versuchsserie lagen die Objekte unter Wasser, in der zweiten im Trockenen. Außerdem mussten die Teilnehmer das Prozedere einmal mit glatten, trockenen Fingern durchlaufen und einmal mit schrumpeligen Händen, die sie zuvor eine halbe Stunde lang in warmes Wasser gehalten hatten.

Wenig überraschend zeigte sich, dass sie die trockenen Objekte schneller als die feuchten handhabten; dabei

»Ich kann es wohl begreifen  
aber nicht anfassen und umgekehrt«

*Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)*

**Schrumpelige Haut erhöht die Reibung zwischen einer Hand und einem von ihr ergriffenen Objekt, während Füße mit »Profil« besseren Halt auf dem Boden finden. Besonders wichtig ist dieser Umstand bei Nässe. Ist der Schrumpfeffekt Ergebnis einer evolutionären Anpassung?**



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / ALICE KRÜSSMANN



DREAMSTIME / EWA REIMER



Ein Schwamm mit einem darauf fixierten Klebeband liefert ein einfaches Modell für das Hautgewebe und die darüberliegende Hornschicht. Drückt man den Schwamm zusammen und simuliert so die Kontraktion tieferer Hautschichten, schrumpelt das Band mit.

spielte es keine Rolle, ob ihre Finger ein Schrumpelprofil hatten oder glatt waren. Im Fall feuchter Objekte waren profilierte Finger hingegen deutlich von Vorteil. Deren Schrumpeln, so die Forscher, könnte also eine evolutionäre Anpassung an den Umgang mit Objekten unter nassen Verhältnissen sein. Ein Test an Füßen steht noch aus, aber hier spielt sicherlich der Halt auf glitschigen Oberflächen eine Rolle.

### Finger mit durchtrennten Nerven schrumpeln nicht

Andere Wissenschaftler stellen einen direkten Bezug zwischen den Runzeln und dem Reifenprofil von Fahrzeugen her, das für bessere Griffigkeit und Halt in nasser Umwelt sorgt. Aus dem Rennsport ist bekannt, dass glatte Laufflächen bei Trockenheit »griffiger« sind; bei Nässe hingegen bevorzugen die Fahrer Reifen mit Profil, weil es hilft, das Wasser abzuleiten. Die These, dass die Profile von Fingern ähnliche Funktionen wie die von Reifen besitzen, wird den Forschern um Mark A. Changizi vom US-Forschungslabor 2AI zufolge auch dadurch erhärtet, dass die Morphologie der Runzeln deutliche Ähnlichkeiten mit Entwässerungsstrukturen in der Natur aufweist, wie sie sich etwa im Einzugsbereich von Flüssen beobachten lassen (siehe auch »In stem Fluss«, Spektrum der Wissenschaft 6/2014, S. 44).

Für eine evolutionäre Erklärung spricht ebenfalls, dass es autonome Vorgänge des Nervensystems sind, die das Schrumpeln in Gang bringen. Lange wurde vermutet, dass aufquellende unbehaarte Hautpartien für den Vorgang verantwortlich seien. Doch das

trifft nicht zu: Finger, deren Nerven durchtrennt sind, schrumpeln nicht. Vielmehr führen Nervenreize dazu, dass sich beim Eintauchen der Finger in Wasser das Gewebe unterhalb der außen gelegenen Hornschicht, des Stratum corneum, zu verengen beginnt. Was das bewirkt, kann man sich leicht veranschaulichen. Man heftet ein Klebeband auf einen Schwamm und drückt ihn anschließend von den Seiten her vorsichtig zusammen. Das Klebeband macht diese Schrumpfung nicht mit, sondern schlägt wellenförmige Falten, um seine »überschüssige« Länge der verkleinerten Unterlage anzupassen. Ein solcher Symmetriebruch widerfährt auch den Fingerkuppen: Deren steife Hornschicht behält ihre Ausdehnung nur so lange, bis die Spannung einen kritischen Wert überschreitet und sie in Falten legt.

Mit ihren Untersuchungen hoffen die Wissenschaftler nicht nur Einsicht in biochemische, sondern auch in physikalische, insbesondere mechanische Abläufe zu erlangen. Auffällig ist zum Beispiel, dass sich feuchtigkeitsbedingte Falten auf nur wenige Körperteile wie Finger und Zehen beschränken und zuerst auf deren Ballen auftreten.

Computersimulationen, die auf mechanischen Modellen beruhen, reproduzieren die Morphologie und mechanische Bildung der Falten mittlerweile recht genau. Dabei zeigt sich, dass für das Entstehen der Falten weniger die Materialeigenschaften der Haut verantwortlich sind als vielmehr die Dicke der Hornschicht. An Fingern und Zehen ist diese nämlich besonders groß. Wohl weil sie im Vergleich zu weichen Hautpartien nicht so stark in sich

gestaucht werden kann, erreicht sie die kritische Spannung schneller. An anderen Hautpartien wird der kritische Wert hingegen gar nicht erst überschritten, oder aber sie werfen – zumindest im Modell – Falten so kleiner Wellenlänge, dass diese praktisch nicht zu sehen sind.

Wohin uns solche Einsichten führen könnten, ist leicht einzusehen. Während der altersbedingte Faltenwurf der Haut unumkehrbar erscheint, ist das Schrumpeln reversibel. Kommt man also den physiologischen Vorgängen beim Letzteren auf die Schliche und lernt, das Phänomen durch äußere Eingriffe zu beeinflussen, kann man durch kosmetische Eingriffe vielleicht eines Tages auch Altersfalten vorbeugen. ~

### DER AUTOR



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

### QUELLEN

**Changizi, M. et al.:** Are Wet-Induced Wrinkled Fingers Primate Rain Treads? In: Brain, Behavior and Evolution 77, S. 286–290, 2011  
**Kareklas, K. et al.:** Water-Induced Finger Wrinkles Improve Handling of Wet Objects. In: Biology Letters 9, 20120999, 2013

### WEBLINK

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1309286](http://www.spektrum.de/artikel/1309286)

1914

### Gelehrige Einzeller

»Die Amerikaner L.M. Dag und M. Bently sperrten Pantoffeltierchen in Kapillarröhren, deren Durchmesser etwas kleiner war als die Länge der Tierchen. Die Bewegungen, um in der engen Röhre

umzukehren, wurden unter dem Mikroskop beobachtet. Beim ersten Male gelang die Umkehr erst nach zahlreichen vergeblichen Bemühungen; nach der 15. Übung kamen keine Fehlversuche mehr vor. Auch nachdem die Versuchstiere 10–20 Minuten lang in offenen Uhrschalen gehalten worden waren, war das Gelernte noch wirksam.« Prometheus 1307, November 1914, S. 111



Brieftauben für die Militärspionage.

### Gefiederte Luftaufklärer

»Die Bedeutung der Brieftaubenphotographie liegt auf militärischem Gebiet, da sie die unauffällige Aufnahme feindlicher Stellungen ermöglicht. Vom Kriegsministerium angestellte Versuche haben zu sehr guten Ergebnissen geführt. Unter anderem zeigte sich, daß die Tauben, die in Höhen von 50 bis

### Baumwollene Fenster

»Zur Verbesserung der Lüftungs- und Temperaturverhältnisse in stark benutzten Räumen ersetzt man in Amerika neuerdings einige Scheiben der Fenster durch Baumwollgewebe. Diese sorgen für ständige Zufuhr frischer Luft; dazu besitzen sie den Vorteil, daß Zugbildung vermieden wird. In Räumen mit solchen Fenstern konnte man einen 30 Proz. geringeren Staubgehalt feststellen als in Räumen mit offenen Fenstern; der Feuchtigkeitsgehalt entsprach demjenigen der Außenluft. Die Aufrechterhaltung der gewünschten Temperatur war selbst bei großer Kälte nicht schwieriger als bei ausschließlicher Verwendung von Glasscheiben. Besonders für Schulräume scheint die Neuerung von hohem Werte zu sein.« Technische Monatshefte, November 1914, S. 328

100 m fliegen, von Schützen kaum heruntergeholt werden können. Wählt man den Abflugort so, daß die zu fotografierenden Objekte in der Geraden »Abflugort–Heimatschlag« liegen und kennt man die ungefähre Entfernung, so braucht man den Kameraverschluß nur so einzustellen, daß er sich nach

der zur Durchfliegung nötigen Zeit öffnet. Die Erfahrungen haben unsere Militärverwaltung veranlaßt, in Festungen Stationen einzurichten, die bis zu 1000 Tauben Besatzung haben. Neben diesem Heere verfügt unsere Verwaltung noch über 70000 Reservetauben.« Wissenschaft und Krieg, November 1914, S. 482–485

### Lebensfreude dank Herzschrittmacher

»Zustände mit anfallsweisem Herzstillstand oder extrem langsamer Schlagfolge der Herzkammern stellen das Indikationsgebiet für die elektrischen Schrittmacher. Es handelt sich um Impulsgeneratoren, die, in Kunstharz vergossen, in die Bauch- oder Brustwand implantiert werden. Die Zuführung des Spannungsimpulses zum Herzen erfolgt über Elektroden. Die Elektrodenspitze wird in die Muskulatur der Herzkammern versenkt. An der Chirurgischen Klinik in Düsseldorf wurde von 1961 bis 1963 bei 45 Patienten ein derartiger Schrittmacher operativ eingepflanzt. Die Patienten betonen die Lebenssicherheit und Lebensfreude, die sie wiedergewonnen haben.« Die Umschau 21, November 1964, S. 671

### Gesundheitsrisiko Milch

»Ein großer Teil der Milch auf dem englischen Markt enthält Spuren von Penicillin und anderen Antibiotica, hauptsächlich hervorgerufen durch die erschreckend große Zahl der Fälle von Mastitis bei den Kühen. Eine Anzahl Menschen wird durch den Genuß solcher Milch sensibilisiert. Solche Reaktionen



können fatal sein, da diesen Menschen die lebensrettende Behandlung mit Antibiotica versagt ist. Das Problem läßt sich nur lösen durch bessere Hygiene in den Kuhställen.« Naturwissenschaftliche Rundschau, November 1964, S. 449

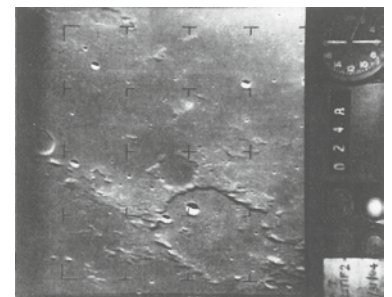
### Scharfe Bilder vom Mond

»Am 31. Juli 1964 schlug die mit sechs Fernsehkameras sehr gut ausgerüstete Raumsonde Ranger VII auf der Oberfläche des Mondes auf. Die Bilder werden helfen, einen sicheren Landungsplatz für die im Apollo-Programm

konstruierten Mondfahrzeuge zu ermitteln. Das Fernsehsystem übertrug 4316 erstklassige Aufnahmen – nicht ein einziges Bild war fehlerhaft! An Bord befanden sich drei Sender-Empfänger. Das Telemetersystem ermöglichte

te 110 Arten von Meßwerten (Temperatur, Spannungen, Drücke) für Ingenieuraufgaben.« Elektronik, November 1964, S. 321–322

Der Mond aus  
750 Kilometer Höhe.





# Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft  
in die schulen!

## AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

### Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

### Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projektes nicht möglich, und deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: [www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de)

## TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebnitzer Agrarbetriebsgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymsnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Förderverein des Thomas-Mann-Gymnasium Stutensee | Förderverein der Leibnizschule Wiesbaden e. V. | KIT Karlsruhe | Volksbank Bigge-Lenne eG | Meissner AG | Förderverein der Justus-Liebig-Schule Darmstadt | Dominique Mayer | Rotary Club Buchloe | Förderverein des Johanneum-Gymnasiums Herborn | Freundeskreis der Konrad-Duden-Realschule Mannheim | Förderverein des Eichsfeld-Gymnasiums Duderstadt | Albertus-Magnus-Gymnasium Stuttgart



# Wenn die Blätter fallen ...



STEHT WEIHNACHTEN BALD VOR DER TÜR!

*Sorgenfrei in die Weihnachtszeit mit einem Geschenkabonnement!*



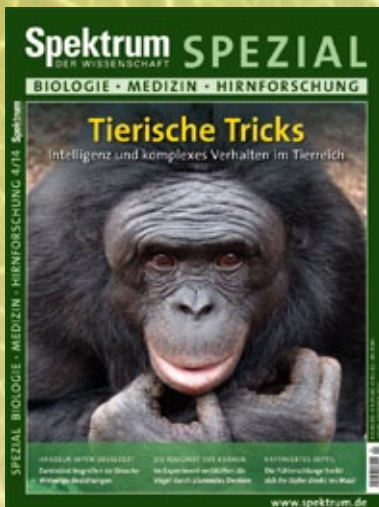
Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie.  
12 Ausgaben, € 89,- (ermäßigt € 69,90)



Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung.  
12 Ausgaben, € 85,20,  
(ermäßigt € 68,40)



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung.  
12 Ausgaben, € 89,- (ermäßigt € 67,80)



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



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften.  
4 Ausgaben, € 29,60  
(ermäßigt € 25,60)



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

*Bestellen Sie für sich oder als Geschenk:*

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

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

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

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogstraße 3-5 | 69126 Heidelberg





## IHRE VORTEILE IM GESCHENKABO:

- *Ein ganzes Jahr Freude: Schenken Sie ein Magazin mit anspruchsvollen Artikeln über die neuesten internationalen Entwicklungen aus allen Bereichen der Wissenschaft und Forschung.*
- *Mit Grußkarte: Der Beschenkte erhält das erste Heft mit einer Grußkarte in Ihrem Namen. Auf Wunsch auch zu Weihnachten.*

## PLUS GESCHENK ZUR WAHL:

- 1 *Kalender »Himmel und Erde 2015«* •
- 2 *Sudoku Holzspiel* •
- 3 *LOQI Taschenset »Pop-Prism« und »Artists Moon«* •
- 4 *Buch »Rotkäppchen und der Stress« von M. Spitzer* •
- 5 *DVD »Die Zelle«* •
- 6 *Lamy Füllhalter »pur«*





# Antike Farbenspiele

Mit Röntgenstrahlen beleuchten Forscher die Oberflächen jahrtausendealter Elfenbeinschnitzereien. Eine spezielle Kamera analysiert dann die Reste längst verwitterter Farbschichten, was deren Rekonstruktion ermöglicht.

Von Ina Reiche und Katharina Müller

**S**ehr farbenfroh ist die Antike gewesen, das gängige Bild eines marmorweißen Altertums gilt seit einigen Jahren als überholt. Für das alte Ägypten existierte es ohnehin nie, da sich Farben in dessen trockenem Klima gut erhalten haben. Doch obwohl Historiker wussten, dass der Nilstaat griechische und vorderasiatische Kulturen beeinflusst hatte, taten sie sich lange schwer damit, den reichlichen Gebrauch von Farben als damals üblich zu erachten. Inzwischen werden nicht nur auf marmornen Skulpturen und Friesen Pigmente nachgewiesen, sondern auch auf kunstvollen Elfenbeinschnitzereien des 9. Jahrhunderts v. Chr. aus dem östlichen Mittelmeerraum und aus Mesopotamien.

Als die schönsten Elfenbeinschnitzereien dieser Zeit gelten mehr als 100 Figuren und Plaketten, die das Team des französischen Archäologen François Thureau-Dangin 1928 in den Ruinen eines Gebäudes der assyrischen Handelsstadt Hadatu, heute Arslan Tash im Norden Syriens, barg. Die meisten sind Reliefs von »Frauen am Fenster«, geflügelte Sphingen, Löwen, szenische Darstellungen der Geburt des Horus und geometrische Ornamente. Experten halten die Stücke für das Dekor eines prunkvollen Holzbetts.

Thureau-Dangins Funde gelangten in die Sammlungen des Pariser Louvre und des syrischen Nationalmuseums in Aleppo – das Schicksal der letzteren Stücke ist in Folge des Bürgerkriegs ungewiss. Zudem gibt es mehrere Dutzend vergleichbare Schnitzereien, die über den internationalen Kunstmarkt und auf mitunter ungeklärten Wegen in verschiedene Museen gelangten. Farbfassungen und Vergoldungen einiger solcher Stücke erforscht nun eine Forschungs-kooperation des Louvre, des Badischen Landesmuseums in Karlsruhe und des Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale (LAMS) an der Université Paris 06; Leiterin ist Élisabeth Fontan, Kuratorin des Louvre in der Abteilung »Antiquités Orientales«.

## Aufschlussreiche Elemente

Allenfalls Spuren der mineralischen Pigmente lassen sich heute noch nachweisen. Das organische Bindemittel, mit dem sie einst wohl angerührt wurden, ist längst vergangen. Die gebräuchlichsten Pigmente der fraglichen Epoche waren Ägyptisch-Blau (die auf einer Kupferverbindung beruhende Farbe wurde in Mesopotamien erfunden und verwendet), roter Zinnober, verschiedenfarbige Ocker und Bleiweiß; es gab zudem viele Alternativen (siehe Kasten S. 62/63).

Doch Elfenbein enthält ebenfalls eine mineralische Komponente: das Hydroxylapatit als spezielle Form von Kalziumphosphat, eingebettet in eine Matrix aus dem Strukturprotein Kollagen. Der Nachweis von Kalzium (Ca) und Phosphor (P) darf also bei den Analysen nicht irritieren: Diese Elemente stammen vom Grundmaterial selbst, Kupfer (Cu), Blei (Pb) oder Eisen (Fe) weisen dagegen auf eine frühere Bemalung hin, wobei Eisen auch aus dem Erdreich stammen könnte.

Um die fraglichen Elemente nachzuweisen, verbietet sich bei solch einzigartigen Zeugnissen des Altertums freilich jegliche Probenentnahme. Zum Glück gibt es heutzutage eine Reihe zerstörungsfrei einsetzbarer Techniken. Insbesondere die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) dient routinemäßig dazu, Materialien zu identifizieren, deren Herkunft zu be-

## DIE SERIE IM ÜBERBLICK

### NATURWISSENSCHAFT IM DIENST DER ARCHÄOLOGIE

- |        |  |                      |
|--------|--|----------------------|
| Teil 1 | ▶ <b>Antike Farbenspiele</b><br><i>Ina Reiche und Katharina Müller</i>     | <b>November 2014</b> |
|        | <b>Dem Eisen auf der Spur</b><br><i>Philipp Dillmann und Roland Schwab</i> |                      |
| Teil 2 | ▶ <b>Der Denisova-Kode</b><br><i>Michael Marshall</i>                      | <b>Dezember 2014</b> |
|        | <b>Elektroden statt Spaten</b><br><i>Stefan Hecht</i>                      |                      |
| Teil 3 | ▶ <b>Datieren nach dem Magnetfeld</b><br><i>Elisabeth Schnepf</i>          | <b>Januar 2015</b>   |

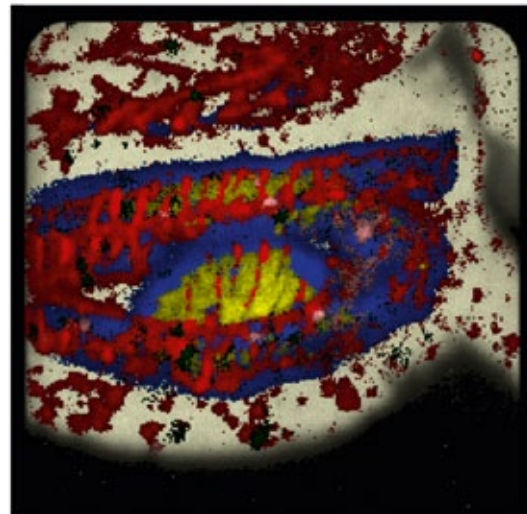


Der »Genius vor dem Sakralbaum« (links) – das 18 Zentimeter große Elfenbeinrelief eines König oder einer Gottheit – wurde wahrscheinlich in der assyrischen Handelsstadt Arslan Tash ausgegraben und später vom Badischen Landesmuseum in Karlsruhe erworben. Unter ultraviolettem Licht (rechts) erscheinen Restaurierungen dunkelgrau und grünlich. Für die Rekonstruktion der ursprünglichen Farben wählten die Autoren daher den Bereich um das Auge (siehe unten).

stimmen, mehr über die Herstellungstechniken zu erfahren oder um geeignete Konservierungsmethoden zu entwickeln.

In der RFA beleuchtet ein Röntgenstrahl das Objekt und versetzt dessen Atome in einen angeregten Zustand: Elektronen aus kernnahen Schalen werden von ihren Plätzen katapultiert, andere nehmen diese aber sogleich wieder ein. Das funktioniert, weil die Neuankömmlinge dabei Energie abgeben können. Diese wird als Fluoreszenzstrahlung im Röntgenbereich frei, hat also Wellenlängen von Nanometern bis zu Pikometern (millionstel beziehungsweise milliardstel Millimeter). Welche Energien mit welcher Intensität im Fluoreszenzspektrum auftauchen, verrät die Elektronenkonfiguration der bestrahlten Atome – und damit, welche Elemente in welcher Konzentration vorkommen.

Werden Strahl und Detektor schrittweise über das fragile Objekt geführt, lassen sich sogar zweidimensionale Bilder der Elementverteilung gewinnen. Die »Scanning Makro-RFA« vermag Oberflächen bis zu 80 mal 60 Zentimeter Größe in einem Raster von 0,01 Millimeter Maschenweite abzutasten. Weil Luft die Strahlung absorbiert, muss der Messkopf aber einen Abstand von wenigen Millimetern einhalten. Das ist nicht nur riskant – bei direktem Kontakt kann das Kunstwerk



Die spektroskopische Analyse des Augenlids ergab Konzentrationsverteilungen der Elemente Kalzium (Ca, weiß), Blei (Pb, gelb), Kupfer (Cu, blau), Titan (Ti, rosa), Eisen (Fe, rot) und Mangan (Mn, grün), die eine Bemalung mit dem Pigment Ägyptisch-Blau nahelegen.



Schaden nehmen –, sondern bei einer komplex geformten Oberfläche wie der einer Elfenbeinschnitzerei auch schwierig umzusetzen.

Die Röntgenfarbkamera SLcam®, die von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), dem Institut für angewandte Photonik eV (IAP) und den Unternehmen Institute for Scientific Instruments GmbH (IfG) und PN Sensor entwickelt wurde, bietet eine Lösung, da sie eine Fläche von etwa zwölf mal zwölf Millimetern mit guter Auflösung auf einmal betrachten. Der Trick besteht darin, das punktweise Abtasten mit einem Detektor durch ein Raster von gleichzeitig messenden Röntgendetektoren zu ersetzen. Diese sind in einem CCD-Chip (charged coupled device) integriert, der 264 mal 264 Pixel gleichzeitig aufnimmt.

Eine Herausforderung ist die Optik, denn Glas und Kunststoff absorbieren Röntgenlicht zu stark, als dass es Linsen daraus bündeln und auf den Sensor abbilden könnten. Fällt Röntgenlicht aber im flachen Winkel auf eine Oberfläche aus solchem Material, wird es vollständig reflektiert. Daher vermögen hauchdünne Röhrchen aus Glas, so genannte Kapillaren, die Fluoreszenzstrahlung zu bündeln. Die in ihrem Spektrum enthaltenen Wellenlängen, die jeweils unterschiedlichen chemischen Elementen entsprechen, werden für die Darstellung verschiedenen Farben zugeordnet.

### Elfenbein im Synchrotronstrahl

Mit dieser »Full-field Mikro-RFA« haben wir die Spuren ursprünglicher Polychromie auf den Arslan-Tash-Elfenbeinschnitzereien wieder ans Licht gebracht. Weil wir mit marginalen Pigmentresten im Konzentrationsbereich von einem Mikrogramm pro Gramm Probenmaterial rechneten, trimmten wir die Methode auf maximale Empfindlichkeit. Wie auch herkömmliche Fotografien am besten gelingen, wenn die Szenerie gut ausgeleuchtet ist, benötigten wir Röntgenlicht hoher Intensität. Das liefert die so genannte Synchrotronstrahlung, die spezielle Teilchenbeschleuniger erzeugen. Eine solche Einrichtung steht mit der Karlsruher Ängstromquelle (ANKA) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zur Verfügung. Ein großer Vorteil, besitzt doch

#### AUF EINEN BLICK

##### VERGOLDETE GÖTTER

**1** Im einstigen assyrischen Kulturraum standen **Elfenbeinschnitzereien** hoch im Kurs. Die oft mythologischen Darstellungen waren nicht nur kunstvoll geschnitzt, sondern auch bunt bemalt, wie winzige **Farbreste** zeigen.

**2** Mit der **Röntgenfluoreszenzanalyse** lassen sich die chemischen Elemente auf den Oberflächen ermitteln. Weil die in der Antike verwendeten Farben gut bekannt sind, können Forscher aus dem Spektrum auf die einstige **Bemalung** schließen.

**3** Eine **spezielle Kamera** wurde entwickelt, um das Objekt beim Scannen der Oberfläche nicht unnötig zu gefährden. Damit wiesen die Autorinnen an Darstellungen von Gottheiten mitunter sogar den Auftrag von **Goldfolien** nach.

## Die wichtigsten Farbpigmente in der Antike

### BLAU

- Azurit ( $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ )
- Ägyptisch-Blau, das erste künstlich hergestellte Mineralpigment (Cuprorivaire mit der chemischen Formel  $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$ )
- Lapislazuli ( $(\text{Na}, \text{Ca})_8(\text{Al}, \text{Si})_{12}\text{O}_{24}\text{S}_2 \cdot \text{FeS} \cdot \text{CaCO}_3$ )

### ROT

- Zinnober ( $\text{HgS}$ )
- Realgar (Rubinschwefel,  $\text{As}_4\text{S}_4$ )
- Mennige (Bleirot  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ )
- Hämatit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )
- roter Ocker (besteht aus Brauneisenstein, Tonmineralen, Quarz und Kalk)



GEBURT DES HORUS, BADISCHES LANDESMUSEUM (INV.-NR. 72.938), UV-AUFNAHME: GIORGIO AFANNI; MIT FRÜHLICHEN VON INA REICHE UND KATHARINA MÜLLER



#### GELB

- Auripigment ( $\text{As}_2\text{O}_3$ )
- gelber Ocker
- Goethit ( $\alpha\text{-FeOOH}$ )

#### GRÜN

- Malachit ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$ ), ein Verwitterungsprodukt von Azurit
- Chrysozell ( $\text{Cu}_4\text{H}_4[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ )

#### SCHWARZ

- organische kohlenstoffhaltige Pigmente (C)
- Antimonschwarz ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ )
- Galena  $\text{PbS}$  (für Augenschminke)

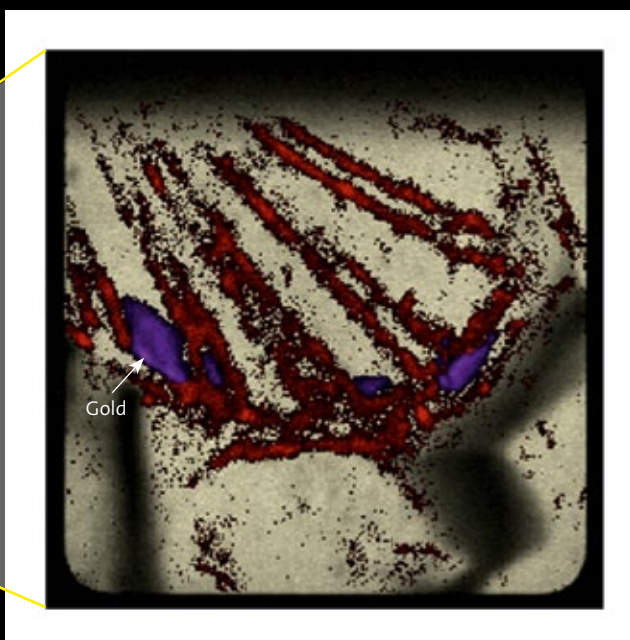
#### WEISS

- Bleiweiß  $2 \text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb(OH)}_2$

Dieses gut zehn Zentimeter hohe Fragment zeigt eine weibliche Figur mit ägyptischer Krone und Flügeln, möglicherweise die Göttin Isis, die eine Lotusblüte in den Händen hält (links, UV-Aufnahme). Insbesondere auf den Flügeln fallen violette Flecken auf, in denen spektroskopisch Gold nachgewiesen wurde (unten). Dort war vermutlich Blattgold aufgetragen worden (rechts).



MARIE ALBERIC, MIT FELDGEH VON INA REICHE UND KATHARINA MÜLLER



INA REICHE UND KATHARINA MÜLLER

auch das Badische Landesmuseum dort etliche Elfenbeinschnitzereien aus Arslan Tash. Allerdings musste der Messplatz umgerüstet werden, damit der austretende Strahl eine Breite von zwölf und eine Höhe von zwei Millimetern hatte. Verfahren des Objekts über einen motorisierten Tisch in jeder Richtung ermöglichte es, die gesamte zur Verfügung stehende Aufnahmefläche von zwölf mal zwölf Millimetern zu nutzen.

Wir haben 13 Schnitzereien ausgewählt, die unter dem Lichtmikroskop und mit ultraviolettem Licht fotografiert die größten Erfolgsaussichten versprachen. Beispielsweise entdeckten wir auf Grund unterschiedlicher Oberflächenstrukturen in wichtigen Teilen der Schnitzereien, was wir als Hinweis auf eine Bemalung deuteten.

### Kontamination aus dem Erdreich

Die aufgenommenen RFA-Spektren zeigen anschaulich, welche Elemente in welchen Mengen derzeit auf den untersuchten Oberflächen vorhandenen sind. Wenig überraschend fanden wir überall Kalzium, einen Hauptbestandteil von Elfenbein, dessen Verteilung aber immerhin die Morphologie des Objekts spiegelte. Bei der Schnitzerei »Genius vor dem Sakralbaum« (siehe S. 61) – einem gut 18 Zentimeter hohen Fragment, das einen König oder eine männliche Schutzgottheit vor einem aus Ornamenten bestehenden Baum zeigt – ergab die Analyse zudem in den Konturen des untersuchten Auges, in der Braue und in der Pupille erhöhte Kupfer- und Arsengehalte. In den letzten beiden Bereichen fanden sich außerdem höhere Bleiwerte. Nichts davon konnte vom Grundmaterial herrühren. Die recht homogene Verteilung dieser Elemente in den drei Bereichen bestätigte die Vermutung, dass sie bei der Farbfassung aufgebracht worden waren.

Des Weiteren bemerkten wir ungewöhnliche Mengen an Eisen am Auge. Doch ein linienförmiges Verteilungsmuster sprach gegen den Auftrag mit dem Pinsel: Das Eisen konzentrierte sich offenbar in Rissen und Furchen, stammt also wohl aus den Sedimenten, die das Objekt jahrtausendlang bedeckt hatten. Titanspuren in den gleichen Linien bestätigten diese Annahme.

Inzwischen ist die Zusammensetzung der meisten antiken Pigmente so gut bekannt, dass wir die einstigen Farbfassungen rekonstruieren können. Wo man Kupfer findet, befand sich entweder ein blaues oder grünes Pigment. Im vorliegenden Fall eines Königs oder Gottes dürfte es das besonders leuchtstarke Ägyptisch-Blau gewesen sein (siehe Bild S. 61 unten). Das Arsen kam vermutlich beim Herstellungsprozess zufällig dazu. Das Blei stammt von einem Pigment, mit dem die antiken Künstler den Blauton variierten. In Frage kommen daher die Farben Weiß oder Schwarz.

An einem elfenbeinernen Löwenkopf fiel auf, dass er um Augenbrauen, Nase und Maul gelblich gefärbt, aber hier auch stärker gerissen ist als in anderen Bereichen. Im Umfeld einer Braue stießen wir auf erhöhte Eisengehalte, die homogen verteilt waren, was auf eine rote, hämatithaltige Bemalung hinwies. Die Annahme liegt nahe, dass auch andere Parteien



Ein etwa acht Zentimeter hoher Löwenkopf erscheint in manchen Partien verfärbt und stärker gerissen als in anderen (ganz oben: UV-Aufnahme). Der Analyse zufolge war dort eine eisenhaltige, also vermutlich rote Farbe aufgetragen worden (unteres Bild: Rekonstruktion).

gleicher Oberflächenbeschaffenheit einst diese Farbe trugen (siehe Bilder links).

Auf dem Fragment einer »Göttin am Sakralbaum«, die als geflügelte Göttin Isis gedeutet wird (siehe Bilder S. 62/63), interessierten wir uns für einige violette Flecken. Die Voruntersuchungen ergaben keinerlei Hinweise auf Restaurierungen, die Verfärbung rührte also mutmaßlich von einer Farbfassung her. Die RFA wies das Element Gold nach, andere Verfahren bestätigten, dass es dort in Nanopartikeln vorlag, was das Aussehen erklärt – bei Teilchenabmessungen unter einem Tausendstel Millimeter erscheint Gold aus physikalischen Gründen in dunklen Rottönen. Offenbar hatte es sich während 2800 Jahren Bodenlagerung aus einer Vergoldungsschicht gebildet.

Noch können wir den genauen Farbton der Pigmente beziehungsweise der Pigmentmischungen nicht rekonstruieren. Manche Beobachtungen ließen sich zudem fundierter deuten, wenn wir die genauen quantitativen Elementverhältnisse der Pigmentspuren wüssten. Derzeit läuft eine vergleichende Studie mit den Arslan-Tash-Elfenbeinobjekten aus dem Louvre. Besonders spannend ist die Frage, wie sich die von den Kunsthandwerkern in der Antike aufgebrauchten Goldfolien in Nanopartikel umwandeln konnten. Noch ist es nicht gelungen, diesen Prozess im Labor nachzustellen. Daher ergaben unsere Studien als Nebenresultat ein Kriterium für die Echtheit antiken vergoldeten Elfenbeins. Letztlich dürfte die Methode auch dazu taugen, die Farbfassungen anderer Trägermaterialien wie Marmor zerstörungsfrei zu ermitteln. ~

#### DIE AUTORINNEN



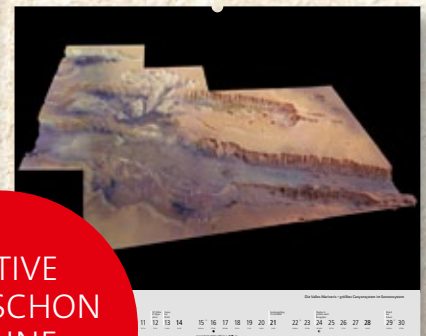
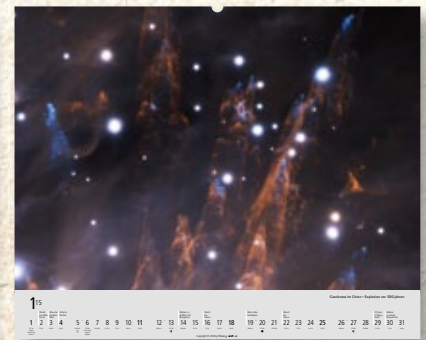
Die habilitierte Chemikerin **Ina Reiche** (links) ist Forschungsdirektorin des Centre nationale de la recherche scientifique (CNRS) und leitet das Rathgen-Forschungslabor der Staatlichen Museen zu Berlin. **Katharina Müller** promovierte in Chemie an der Technischen Universität Berlin und forscht am Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale der Université Pierre et Marie Curie (UPMC) Paris 06 in Paris.

#### QUELLEN

- Alfeld, M., Broekaert, J.A.C.** : Mobile Depth Profiling and Sub-Surface Imaging Techniques for Historical Paintings – A Review. In: Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy 88, S. 211–230, 2013
- Fontan, E., Reiche, I.**: Les ivoires d'Arslan Tash (Syrie) d'après une étude de la collection du Musée du Louvre: mise en œuvre du matériau, traces de polychromie et de dorure, état de conservation. In: ArchéoSciences 35, S. 283–295, 2011
- Reiche, I.**: Röntgenblick auf Kunstwerke. In: Physik-Journal 12, S. 31–37, 2013
- Reiche, I. et al.** : Discovering Vanished Paints and Naturally Formed Gold Nanoparticles on 2800 Years Old Phoenician Ivories Using SR-FF-MicroXRF with the Color X-Ray Camera. In: Analytical Chemistry 85, S. 5857–5866, 2013

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1309288](http://www.spektrum.de/artikel/1309288)

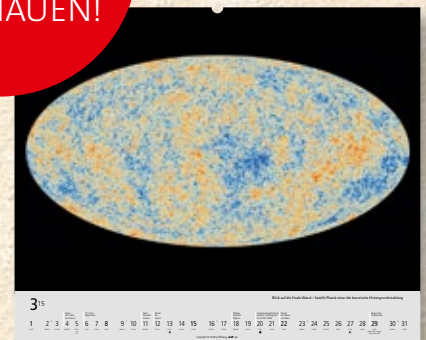




**MOTIVE  
JETZT SCHON  
ONLINE  
ANSCHAUEN!**

## DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2015

**Sterne und Weltraum** präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« insgesamt 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Vom Valles Marineris auf Mars geht es zu Gas- und Staubnebeln im Milchstraßensystem, von fernen Galaxien bis hin zur Finalen Wand, als die Strahlung nach dem Urknall von der Materie entkoppelte. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2015 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte. *14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand*



So einfach erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**

**[sterne-und-weltraum.de/kalender2015](http://sterne-und-weltraum.de/kalender2015)**

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



Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!



# Dem Eisen auf der Spur

Seit dem 8. Jahrhundert v. Chr. wird Eisen in Europa gefördert, verhüttet und spätestens seit keltischer Zeit auch gehandelt. Besondere Isotope und chemische Analysen verraten nun, welche Wege Erz und Metall einst nahmen.

Von Philippe Dillmann und Roland Schwab

**W**o immer Menschen lernten, Eisen aus Erzen zu gewinnen, um daraus Werkzeuge und Waffen zu formen, beeinflusste diese Technologie die kulturelle Entwicklung nachhaltig. So prägte ab dem 8. Jahrhundert v. Chr. die nach dem ersten Fundort im heutigen Österreich benannte Hallstatt-Kultur ganz Mitteleuropa. Eherne Rüstungen symbolisieren geradezu unser Mittelalter, dessen Ende nicht zuletzt durch eine Weiterentwicklung der Eisentechnologie besiegelt wurde: Mit Kanonen und Handfeuerwaffen ausgerüstete Söldnertruppen bedeuteten das Aus für die Ritterheere. Aber auch andere Kennzeichen des Mittelalters basierten maßgeblich auf dem Metall: Verband man bereits in der Antike Steine und Werkstücke mit eisernen Klammern und Dübeln, so benötigte die Architektur der Gotik zusätzlich Querstangen, Anker und Armierungen daraus, um ihre filigranen Säulen, Maßwerfenster und Portale zu stabilisieren.

Zu allen Zeiten diente Eisen überdies zur Demonstration von Macht und Wohlstand der gesellschaftlichen Eliten. Das Wissen, auf welche Weise es produziert, gehandelt und genutzt wurde, vermittelt Altertumsforschern daher Einblicke in die ökonomische und politische Situation früherer Gesellschaften. Archäologische Methoden wie Ausgrabung und

Stilvergleich liefern dafür wichtige Informationen, die zudem mehr und mehr durch naturwissenschaftliche Verfahren ergänzt werden.

So arbeiten französische und deutsche Forscher daran, die in Metallfunden enthaltenen chemischen Bestandteile zu identifizieren. Gerade so genannte Spuren- und Nebenelemente können Aufschluss darüber geben, woher das Eisen ursprünglich stammt. Nichtmetallische Einschlüsse im Metall liefern ebenfalls derartige Hinweise und verraten außerdem einiges über den jeweiligen Herstellungsprozess.

## Die Kunst der Verhüttung

Schon im pharaonischen Ägypten wurde manchmal Eisen verarbeitet, doch das stammte aus Meteoriten, dem einzigen Vorkommen dieses Metalls in reiner, also elementarer Form. Vermutlich genauso wie die Inuit in Grönland schlugen die Ägypter aus großen Eisenmeteoriten kleinere Fragmente heraus, die sie durch Hämmern in Form brachten. Normalerweise aber kommt Eisen als Mineral vor, das heißt als chemische Verbindung mit Sauerstoff (Oxid), Kohlensäure (Karbonat) oder Schwefel (Sulfid) in Erzen. Diese Erze haben naturgemäß geringe Eisengehalte und enthalten vor allem andere Minerale und Gesteine, die so genannte Gangart. Um das Eisen verarbeiten zu können, muss es möglichst weit gehend aus dem Erz entfernt werden.

Dafür benötigt man zunächst viel Energie, damit eine als Reduktion bezeichnete chemische Reaktion die Minerale aufspaltet. Sulfide und Karbonate müssen zudem erst geröstet werden, weshalb man früher die einfacher zu verarbeitenden Eisenoxide bevorzugte. Für deren Verhüttung war Holzkohle notwendig, weil bei ihrem Verbrennen Kohlenmonoxid entstand, das die Oxide zu Eisen reduzierte. Allerdings wird dieser Prozess erst ab Temperaturen über 1150 Grad Celsius wirklich effizient, was sich nur durch Zufuhr von Sauerstoff erreichen lässt.

Gelang die Reduktion zum reinen Eisen, stellte sich ein weiteres Problem: Dessen Schmelztemperatur liegt bei 1535 Grad Celsius. Eine so hohe Temperatur konnten erst Hochöfen im Mittelalter dauerhaft erreichen, indem Wasserräder größere Blasebälge kontinuierlich betrieben. In früherer Zeit benutzte man hingegen so genannte Rennöfen (siehe

## AUF EINEN BLICK

### NÄGEL FÜR DEN PAPSTPALAST

**1** Das seit dem 8. Jahrhundert v. Chr. begehrte **Eisen** wurde in einem mehrstufigen Prozess aus dem Erz gewonnen. Dabei verblieben andere chemische Elemente sowie Reste des Gesteins im Material. Mit Hilfe dieser **chemischen Signatur** lassen sich Mine und Metall einander zuzuordnen.

**2** Mit der **Rasterelektronenspektroskopie** untersuchten Forscher Erz- und Schlackenproben eines mittelalterlichen Erzabbaugebiets in den Nordpyrenäen und verglichen sie mit Eisenfunden. Demnach wurden beispielsweise Nägel des Papstpalastes von **Avignon** aus diesem Eisen hergestellt.

**3** Ein aufwändigeres, dafür aber noch empfindlicheres Verfahren vergleicht die **Isotopenverhältnisse** des seltenen Edelmetalls **Osmium** in Erz und Eisen. Damit ließ sich vor Kurzem eine Verbindung zwischen dem keltischen **Hochdorf** und Verhüttungsplätzen im Nordschwarzwald nachweisen.



ISTOCKPHOTO / PHOTOVIDEOSTOCK

Monumentale Bauten wie der Papstpalast in Avignon mit seinen wehrhaften Mauern und Türmen sind steinerne Wahrzeichen des Mittelalters. Ohne eine gut funktionierende Eisenindustrie wären sie unvorstellbar. Herkunftsanalysen an Nägeln des Tour de Trouillas (rechts) verraten viel über damalige Handelsbeziehungen.

Bild S. 70), in denen Eisen nur reduziert, nicht geschmolzen wurde.

Als »Rennen« bezeichnete man das Zerrinnen der Schlacke, also des aus der Gangart stammenden Abfalls. Den Öfen entnahm man dann die so genannte Luppe, einen festen Eisenschwamm, der immer noch Schlackenreste enthielt. Schmieden bei 900 bis 1300 Grad Celsius verdichtete den Schwamm und verschweißte ihn. Weil die unerwünschten Bestandteile bei diesen Temperaturen teigig bis flüssig wurden, quetschte das Schmieden verbliebene Gangart heraus. Je nach Bedarf hat man Zwischenprodukte in Form von Barren hergestellt. Herrschte im Ofen ein Überschuss an Kohlenstoff, der nicht mehr für die Reduktion gebraucht wurde, konnte sich überdies eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung bil-



FOTOLIA / ANA ELAVKER

den – der begehrte, da härtere und leichter zu schmiedende Stahl.

Für die Herkunftsanalyse bieten die Verhüttung im Rennofen und die Weiterverarbeitung in der Schmiede einen großen Vorteil: Auf Grund der niedrigeren Temperaturen im Vergleich zum Hochofen enthielten die resultierenden Werkstoffe nämlich weiterhin vergleichsweise viele maximal einige hundert Mikrometer große Einschlüsse von Schlacke. In dieser finden sich Elemente der Gangart wie Aluminium, Silizium, Kalzium oder Titan sowie Spurenelemente, etwa Seltene Erden. Die Verhältnisse zueinander entsprechen denen des ursprünglichen Erzes und eignen sich daher als chemische Signatur zur Herkunftsbestimmung.

### Pyrenäeneisen im Fokus der Forscher

Die genannten Hauptelemente der Gangart lassen sich mit dem Strahl eines Rasterelektronenmikroskops bestimmen. Der Beschuss mit Elektronen verursacht eine Röntgenstrahlung, deren Spektrum viel über die Elemente verrät. Für die Bestimmung der Spurenelemente verdampft ein Laserstrahl einen Teil der Einschlüsse, ein Massenspektrometer identifiziert die enthaltenen Stoffe.

Dieses Prinzip wurde unter anderem im heutigen Département Ariège in den Nordpyrenäen eingesetzt. Das Gebiet war im Mittelalter für sein »Fer de Foix« bekannt – Eisen und Stahl aus eisenreichen manganhaltigen Hämatit-Erzen, die sich leicht verhütten ließen. Weil die Hüttenwerke mittels Wasserkraft über ein hydraulisches Gebläse betrieben wurden, nannte man sie Mühlen (»moulines«). Dokumente belegen ein Handelsabkommen des Grafen von Foix mit seinem Verwandten, dem Grafen von Couserans, das bis ins 19. Jahrhundert in Kraft blieb. Dieser Vertrag von 1347 regelte die Lieferung von Eisenerz aus Foix gegen Holzkohle aus dem Couserans.

Die chemische Signatur des Hauptabbaugebiets auf dem Mont Rancié im Tal Vicdessos wurde durch mehr als 100 Erz- und Schlackenproben aus den Minen wie auch von den Produktionsstandorten ermittelt. Dabei entdeckte Schlacken und Eisenobjekte lieferten weitere Informationen. Dass die so bestimmten Elementverhältnisse das Gebiet charakterisieren, zeigte ein Abgleich mit Schlacken aus dem Couserans selbst. Insbesondere Grabungen an dem dortigen Produktionsplatz in Castel-Minier durch Florian Téreygeol vom Institut de Recherche sur les Archéomatériaux CNRS in Saclay haben hier entscheidende Daten geliefert.

Außerdem untersuchten CNRS-Forscher Nägel, Hufeisen, Armbrustbolzen und vergleichbare Gebrauchsgegenstände aus Burgen des Ariège, um die Verbreitung des »Fer de Foix« dort zu ermitteln. Weil der Graf von Foix mit etlichen Hochmögenden Frankreichs wirtschaftliche und politische Beziehungen unterhielt, liegt die Vermutung nahe, dass sein Eisen auch in deren Herrschaftsgebieten eingesetzt worden ist. Die Untersuchungen konzentrierten sich hier auf Konstruktionsteile mittelalterlicher Bauwerke wie der Kirche St. Etienne in Capestang und dem Tour de Trouillas im Papstpalast von Avignon.

Die Spurenelementanalyse, durchgeführt von Stephanie Leroy (CNRS), lieferte ein differenzierteres Bild, als die historische Überlieferung erwarten ließ. Zwar wurde im Couserans tatsächlich Erz vom Mont Rancié verhüttet, aber nur von grenznahen Mühlen. Weiter von Foix entfernte Mühlen bezogen ihren Rohstoff von woanders. Castel-Minier im Couserans (Bild rechts) hingegen lag abgelegen und war stärker auf die Lieferungen von Eisenerz aus dem Tal Vicdessos angewiesen.

Auch die Nutzung in den Burgen hing von der geografischen Lage ab, und das galt sogar für die Grafschaft Foix selbst: Das Château de Montréal-de-Sos etwa lag an einem







Schon im Mittelalter konnten Wirtschaftsbeziehungen verzwickelt sein: Weil die Grafschaften Couserans und Foix, beide in den Nordpyrenäen, den Austausch von Holzkohle gegen Eisenerz vereinbarten, verhüttete man in der Couserans-Siedlung Castel-Minier Erz aus Foix (Bild: Ausgrabung in Castel-Minier).

Kreuzungspunkt verschiedener Handelswege, so dass es Eisen aus unterschiedlichen Quellen ankaupte; lediglich 42 Prozent stammten aus heimischer Produktion.

Die Untersuchungen in den Partnerstädten bestätigten die historisch verbrieften Kontakte: Ein großer Teil der eisernen Konstruktionsteile der Kirche St. Etienne wie auch im Papstpalast von Avignon war aus »Fer de Foix« geschmiedet worden. Letzteres ist besonders interessant, da erhaltene Unterlagen zeigen, dass Eisen auch aus der Lombardei in die Papststadt importiert worden war. Für den Tour de Trouillas jedoch bevorzugten die Baumeister die Armireisen aus Foix.

Weil die Bedingungen für eine Herkunftsbestimmung nicht immer so gut sind wie im Département Ariège, wo sich Erzabbau und Produktion historisch und archäologisch untersuchen lassen, haben wir ein weiteres Verfahren entwickelt, das sich auf die Analyse von Osmiumisotopen stützt. Wie die meisten chemischen Elemente gibt es auch von diesem seltenen Edelmetall Atome, die sich in den Neutronenzahlen des Atomkerns unterscheiden, insbesondere  $^{186}\text{Os}$ ,  $^{187}\text{Os}$  und  $^{188}\text{Os}$ . Wie bei anderen Elementen auch sind einige

Osmiumisotope instabil, zerfallen also im Laufe der Zeit, was sich für Datierungen nutzen lässt. Der große Vorteil dieses Elements ist zudem, dass es »siderophil«, das heißt Eisen liebend ist. Es gelangt deshalb bei der Verhüttung nicht in die Schlacke wie die Seltenen Erden, sondern wandert direkt ins Metall. Das Mischungsverhältnis der Isotope ändert sich dabei nicht, weshalb das Eisen weiterhin die Signatur des Erzes aufweist, aus dem es entstand.

Osmium kommt in der Regel in Konzentrationen von wenigen ppt (parts per trillion = 1 Teil pro Billion) vor. Die Analysen durch Michael Brauns vom Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie (CEZA) erfordern daher einen erheblichen Aufwand, zumal bei archäologischen Objekten nur Mengen von wenigen Milligramm bis Gramm entnommen werden dürfen. Die Probe wird aufgelöst, das Edelmetall zu dem flüchtigen Osmiumtetraoxid oxidiert, dieses aus der Probenlösung destilliert und dann mit gekühlter Schwefelsäure wieder kondensiert. Ein spezielles Massenspektrometer unterscheidet die drei Isotope. Alle Analyseverfahren setzen eine metallografische Untersuchung voraus, um bei-



In schachtartigen »Rennöfen« aus Lehm oder Steinen – hier experimentelle Nachbauten – wurde Eisenerz verhüttet. Dabei entstand Eisenschwamm, der unter Hitze verdichtet wurde.

spielsweise Schweißnähte zu erkennen – ein Schmied konnte für ein Werkstück Eisen unterschiedlicher Quellen verwendet haben, die es bei der Analyse zu unterscheiden gilt.

Mit diesem Verfahren ließen sich etwa Eisenobjekte und Luppenreste aus der keltischen Siedlung Eberdingen-Hochdorf in Beziehung zu gut 40 Kilometer davon entfernt gelegenen Verhüttungsplätzen im Nordschwarzwald setzen. Die Karlsruher Denkmalpfleger Guntram Gassmann und Günther Wieland haben seit 1995 etliche Anlagen bei Neuenbürg ausgegraben, die aus dem 5. Jahrhundert v. Chr. stammen und damit die ältesten in Deutschland sind. In den umliegenden Wäldern haben sie zudem über 80 Schlackenhalden entdeckt, wo sie weitere Rennöfen vermuten.

Verhüttet wurde mit Reihen kleiner Kuppelöfen, wie sie während der Eisenzeit im ganzen keltischen Europa verbreitet waren. Hangwinde lieferten den nötigen Sauerstoff; mitunter blies man über eine Öffnung oberhalb des Windkanals wohl mit einem Balg zusätzlich Luft ein. Das Verfahren war einfach und praktikabel. Es erforderte nicht mehr als die Anlage kleiner Terrassen, sei es durch Eintiefung in den Hang, sei es durch Aufschütten von Podien. Schlichte Holzbauten, die heute noch anhand von Pfostenlöchern nachweisbar sind, dienten als Lager für Erz und Holzkohle. Auf flachen Steinen wurde das Erz zerkleinert.

Die Eisenreste rund um die Anlagen entpuppten sich als Stahlluppen, in denen häufig auch Gusseisen auftrat. Letzteres unterscheidet sich vom Stahl durch einen höheren Kohlenstoffgehalt, wodurch es nicht mehr schmiedbar ist, allerdings auch schneller schmilzt. Dem Archäometallurgen

verrät das Metallgefüge etwas über den Herstellungsprozess: Die Atmosphäre in den Öfen war manchmal so stark reduzierend, dass sich das Eisen teilweise verflüssigte und noch im glühenden Zustand aus dem Ofen genommen werden konnte, wo es rasch abkühlte. Da Gusseisen für den Schmied nicht nutzbar war, hat man es abgeschlagen und den Rest zur Weiterverarbeitung weggebracht. Luppenreste mit hohem Gusseisenanteil fanden Archäologen auch in der Siedlung von Hochdorf, was vermuten lässt, dass das Eisen aus dem Nordschwarzwald über die Enz dorthin gelangte.

Experimente in Neuenbürg mit originalgetreuen Nachbauten der Kuppelöfen und dem dort vorkommenden Erz bestätigten, dass die Osmiumisotopenverhältnisse des Erzes in das produzierte Eisen übergehen. Gleichzeitig wiesen alle archäologischen Luppen des Fundorts die Signatur der dortigen Erze auf. Des Weiteren wurden diese auch an einer Stahlluppe aus Hochdorf und einigen Eisenobjekten von dort ermittelt. Schließlich bestätigte eine ergänzende Analyse der Spurenelemente die chemische Übereinstimmung mikroskopischer Schlackeneinschlüsse mit den im Schwarzwald gefundenen Schlacken. Neuenbürger Eisen wurde also tatsächlich über größere Strecken transportiert.

Das deutsch-französische Forschungsprojekt »Circulation of iron products in the Iron-age of Eastern France and Southern Germany« (CIPIA) versucht derzeit Genaueres über die Art des Handels in der Eisenzeit zu ermitteln. So waren Doppelspitzbarren – mehrere Kilogramm schwere Eisenblöcke mit ausgeschmiedeten Enden – als Zwischenprodukte in Ostfrankreich, Süddeutschland und in der Schweiz verbreitet. Die Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass Varianten davon verschiedene Eisenqualitäten repräsentierten. Das wiederum lässt auf eine komplexe technologische und ökonomische Struktur schon in dieser frühen Zeit schließen. Neben analytischen Verbesserungen wird es daher eine Aufgabe für die Zukunft sein, eine Datenbasis für die verschiedenen Produktionsregionen in Europa aufzubauen. ~

#### DIE AUTOREN



**Roland Schwab** (links) studierte Restaurierung und Archäometrie in Berlin und Freiberg. Am Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie in Mannheim leitet er die deutsche Arbeitsgruppe im CIPIA-Projekt.

Der habilitierte Materialwissenschaftler **Philippe Dillmann** leitet das Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération (CNRS und CEA) in Saclay. Die Herkunftsbestimmung archäologischer Metallfunde gehört zu seinen Forschungsschwerpunkten.

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1311012](http://www.spektrum.de/artikel/1311012)



LINEARE ALGEBRA

# Kartenspielen in vier Dimensionen

Eigentlich geht es bei dem Spiel um schnelle Auffassungsgabe. Dass es auch noch auf einem vierdimensionalen Torus stattfindet, merkt man gar nicht.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Das Spiel gibt es in verschiedenen Varianten. Die Genetikerin Marsha Jean Falco hat es 1974 erfunden, und nach seiner Veröffentlichung 1990 fand es bald eine große Fangemeinde. In den USA kennt man es unter dem Namen »Set«, die Teilnehmer des Wettbewerbs »Känguru der Mathematik« bekamen 2011 eine Version namens »Trifix« geschenkt, und das Prinzip lässt sich noch auf viele andere Weisen realisieren.

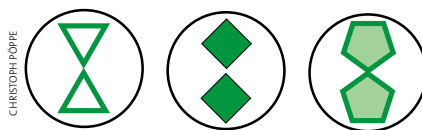
81 Karten zeigen jeweils ein einfaches Bild. Dieses hat vier verschiedene Merkmale, die jedes in drei Varianten auftreten können. In der hier gezeigten Version sind das

- Form: Dreieck, Viereck oder Fünfeck;
  - Farbe: rot, grün oder blau;
  - Anzahl: ein, zwei oder drei Stück;
  - Einfärbung: vollfarbig, leer oder blass.
- Jede Kombination dieser Ausprägungen kommt genau einmal vor.

Das Ziel des Spiels besteht nun darin, »Sets« zu finden. Ein Set besteht aus drei Karten, die in jedem Merkmal entweder alle gleich oder alle verschieden sind. Dies hier ist ein einfaches Set:



Die drei Karten sind gleich in den Merkmalen Form (Dreieck), Anzahl (zwei) und Einfärbung (voll) und verschieden in dem Merkmal Farbe. Etwas komplizierter wird es, wenn zwei Merkmale verschieden sind,



in diesem Fall Form und Einfärbung, während die drei Karten die Farbe (grün) und die Anzahl (zwei) gemeinsam haben. Und ein Set wie dieses zu erkennen, in dem alle vier Merkmale sich unterscheiden, erfordert bereits richtig Mühe:



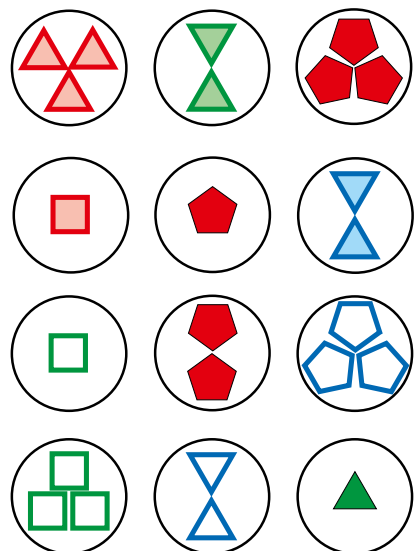
Wo sich die drei Karten eines Sets unterscheiden, müssen alle Varianten des entsprechenden Merkmals auch vorkommen. Rot, Rot, Grün ergibt nie ein Set, einerlei wie die Figuren sonst aussehen.

Die Mitspieler setzen sich im Kreis um den Tisch, und einer von ihnen legt aus dem gut gemischten Stapel zwölf Karten aus (Bild rechts). Wer ein Set gefunden hat, ruft »Set« und darf die drei Karten einsammeln – wer zuerst schreit, kommt zuerst. Daraufhin werden die drei Lücken mit Karten aus dem Vorrat aufgefüllt, und weiter geht das Spiel in derselben Weise. Wer am Ende, wenn der Vorrat erschöpft ist, die meisten Karten sein Eigen nennt, hat gewonnen.

Es kommt vor, dass unter den zwölf ausliegenden Karten kein Set ist – oder zumindest die Beteiligten keines fin-

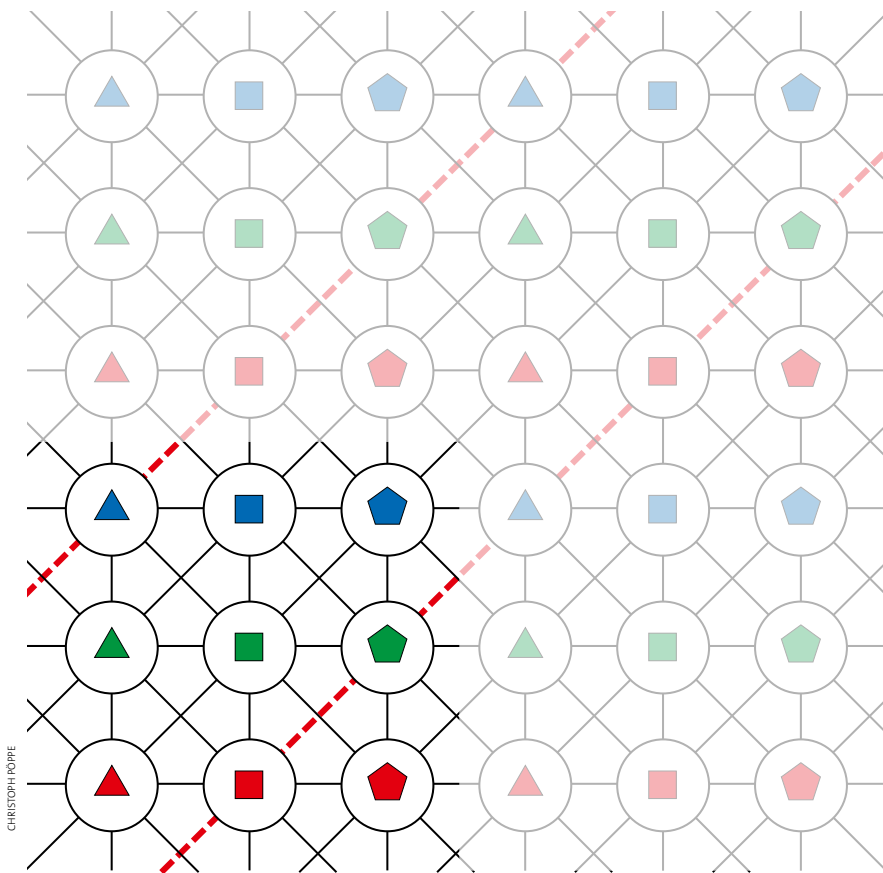
den. Nach einer angemessenen Wartezeit legt man drei Karten aus dem Vorrat dazu; aber wenn unter diesen 15 Karten ein Set entdeckt und abgeräumt wird, füllt man nicht wieder auf 15 auf, sondern sucht erst einmal weiter. Notfalls muss man zu den 15 Karten noch einmal drei dazulegen; das kommt aber extrem selten vor.

Wenn die Spieler, wie in der offiziellen Spielregel vorgesehen, ihre Entdeckungen durch Ausrufen kundtun, hindert einen der Lärm nicht nur am Nachdenken; relativ häufig ist auch die



Eine mögliche Anfangsstellung für »Set«. Dass die vollfarbigen roten Fünfecke (ein, zwei und drei Stück) ein Set bilden, ist nicht schwer zu entdecken. Versuchen Sie ein weiteres zu finden! (Auflösung am Ende des Artikels)





CHRISTOPH HOPE

Unter den neun Karten mit nur einer vollfarbigen Figur gibt es zwölf Sets, deren Mitglieder durch ebenso viele Geraden verbunden sind, zum Beispiel die rot gestrichelt eingezeichnete.

Priorität unklar. Nach meiner Erfahrung geht es deutlich konfliktärmer zu, wenn der Entdecker eines Sets je einen Finger auf die drei Karten legt und die Bestätigung der Mitspieler abwartet, bevor er sie abräumt.

**Geometrie im Set-Raum**

Wer ein Weilchen gespielt hat, merkt bald, dass es zu zwei beliebigen Karten stets genau eine dritte gibt, die diese zu einem Set ergänzt. »Zwei Punkte bestimmen stets eindeutig eine Gerade«, sagt ein Satz der elementaren Geometrie, und siehe da: Man kann die Karten des Spiels als Punkte und die Sets als Geraden auffassen. Allerdings ist die zugehörige Geometrie etwas gewöhnungsbedürftig.

Wir geben den drei Varianten jedes Merkmals die Nummern 0, 1 und 2 und können daraufhin jede Karte durch vier Zahlen beschreiben. Wenn wir uns

beim Nummerieren an die oben angegebene Reihenfolge halten, wäre zum Beispiel (2, 0, 2, 1) zu verstehen als »Fünfecke, rot, drei Stück, leer«. Diese Zahlen interpretieren wir nun als Koordinaten; aber da es vier sind, liegen unsere Punkte in einem vierdimensionalen Raum. Das stellt unser Vorstellungsvermögen auf eine harte Probe, und dass der Raum nicht besonders ausgedehnt ist – jede Gerade besteht nur aus drei Punkten –, ist dabei ein eher schwacher Trost.

Denken wir uns für den Anfang die dritte und die vierte Dimension weg, indem wir die entsprechenden Koordinaten gleich null setzen. Wir denken also ausschließlich über Karten mit nur einer vollfarbigen Figur nach, das sind neun Punkte in der übersichtlichen zweidimensionalen Ebene. Aber Geraden gibt es unübersichtlich viele (Bild oben). Das blaue Dreieck, das rote Vier-

eck und das grüne Fünfeck bilden ein Set; sie sind auch durch eine (rot gestrichelt eingezeichnete) Gerade verbunden. Das sieht man allerdings nur, wenn man dem Quadrat aus den neun Punkten verschobene Kopien seiner selbst anfügt oder – was auf dasselbe hinausläuft – die rechte und die linke sowie die obere und die untere Seite des Quadrats miteinander identifiziert. Dafür muss man sich das Quadrat sehr dehnbar vorstellen; am Ende hat es sich in ein autoschlauchförmiges Gebilde verwandelt, das die Mathematiker einen Torus nennen.

Dasselbe in drei Dimensionen überfordert bereits unser Vorstellungsvermögen. Wie soll man einen Würfel so deformieren, dass jeweils zwei gegenüberliegende Seitenflächen aufeinander zu liegen kommen? Und ein vierdimensionaler Torus erst! Der würde dadurch entstehen, dass man die acht »Seitenflächen« eines vierdimensionalen Würfels – die ihrerseits gewöhnliche dreidimensionale Würfel sind – paarweise miteinander identifiziert. Immerhin lässt sich der (nicht deformierte) Viererwürfel in die dritte Dimension herunterprojizieren und damit der Vorstellung zugänglich machen (Spektrum der Wissenschaft 11/2004, S. 101). Das gibt zumindest einen gewissen Eindruck von der Struktur des Spiels (Bild rechts).

Kann man denn in einem derart exotischen Raum mit herkömmlichen geometrischen Begriffen überhaupt etwas anfangen? Erstaunlicherweise ja. So gibt es Ebenen, und die einfachsten sehen so aus wie die im Bild links oben: eine Menge aus neun Punkten, die in Bezug auf zwei der vier Merkmale gleich sind. Aber selbstverständlich dürfen Ebenen auch schräg liegen. Allgemein nehme man zwei Geraden – sprich Sets –, die sich in einem Punkt schneiden. Diese fünf Punkte, der Schnittpunkt und je zwei andere, definieren eine Ebene, ganz wie zu Hause im euklidischen Raum. Es genügen auch schon drei Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen.

Da unsere Ebenen nur aus endlich vielen Punkten bestehen, kann man sie

vollständig aufzählen. Aus einem Sortiment von mindestens drei Punkten, die nicht auf einer Geraden liegen, ergänze man je zwei Punkte zu einer Geraden, indem man den eindeutig bestimmten dritten Punkt hinzunimmt, und fahre mit dem Ergänzen fort, bis keine neuen

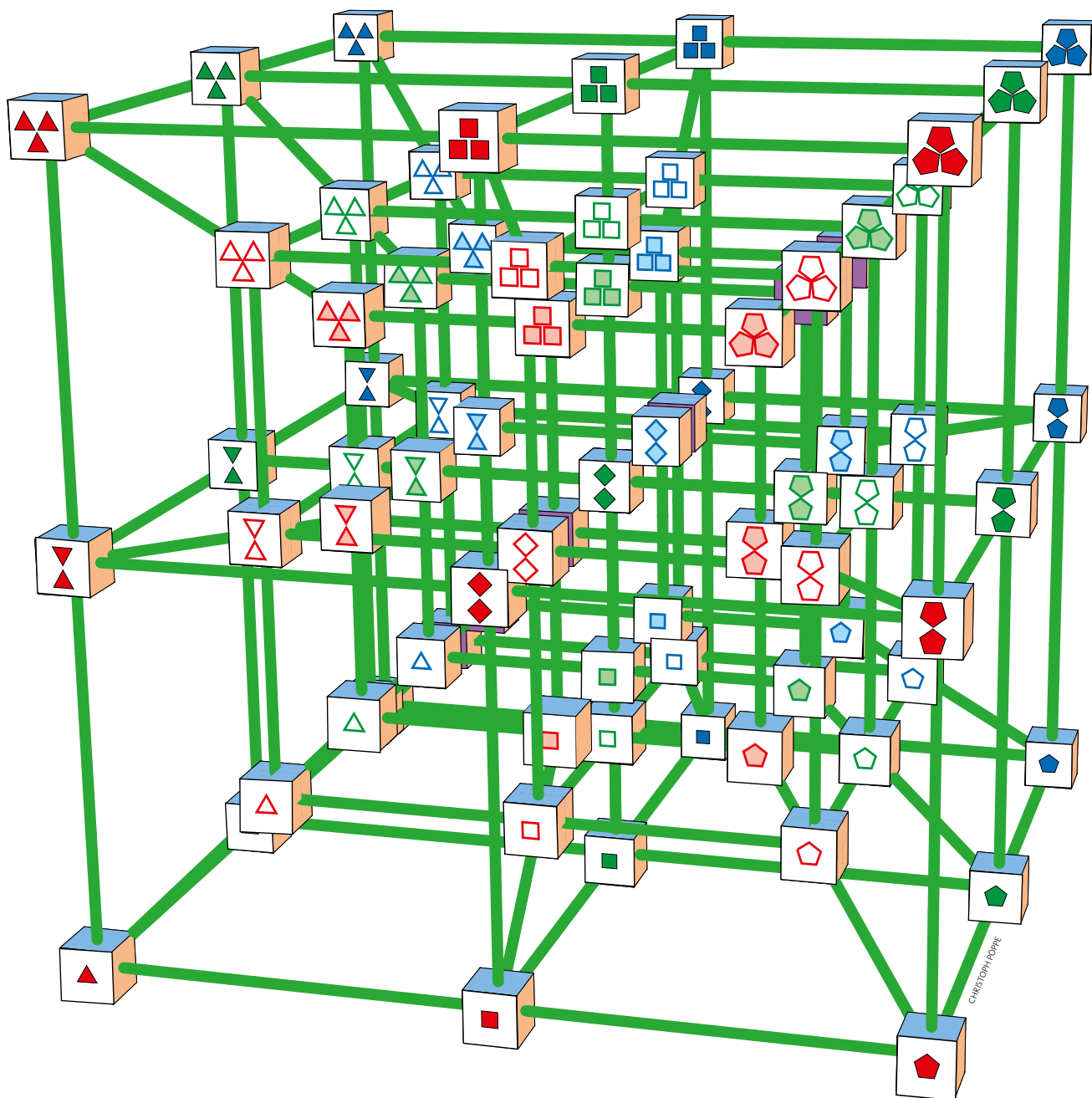
Punkte mehr hinzukommen. Dabei ergeben sich stets insgesamt neun Punkte, und die bilden eine Ebene.

Zwei Ebenen können eine ganze Gerade gemeinsam haben oder zueinander parallel liegen, wie im gewöhnlichen Raum. Zusätzlich kann es vorkom-

men, dass sie sich nur in einem einzigen Punkt treffen – oder überhaupt nicht, ohne parallel zu sein. Wir sind ja in vier Dimensionen; da ist Platz für zwei zueinander windschiefe Ebenen.

Ein »Math Teachers' Circle«, eine Gruppe amerikanischer Mathematiklehrer, zu der auch einige begeisterte Außenseiter gestoßen sind, hat mit Hilfe des Ebenenkonzepts eine interessante Erweiterung des Spiels »Set« erdacht. Sie nennen eine Menge von vier Punkten – sprich Karten –, die in einer Ebene

Alle 81 Karten des Spiels im projizierten vierdimensionalen Würfel. Die vier Geraden, die in dieser Darstellung durch jede Karte gehen, sind nur diejenigen, die zu den vier Koordinatenachsen parallel sind. Jede Gerade durch zwei beliebige Karten trifft genau eine dritte – möglicherweise nach Verlängerung wie im Bild links.



MEHR WISSEN BEI [Spektrum.de](http://Spektrum.de)



**Räumliche Geometrie**

*Eine Reise durch die anschauliche und doch überraschende Welt der dreidimensionalen Geometrie*



Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter

[www.spektrum.de/artikel/773614](http://www.spektrum.de/artikel/773614)

liegen, ein »Plättchen«, im Original »planet«, was aber offensichtlich nicht als Planet zu verstehen ist, sondern als Verkleinerungsform von »plane« wie Ebene.

Wenn es darum ginge, nach Plättchen an Stelle von Sets um die Wette zu grapschen, wäre das Spiel noch nicht besonders reizvoll: Ein Set plus eine beliebige andere Karte ist ja schon ein Plättchen. Entsprechend lautet die Regel, dass der Spieler in diesem Fall nur die Karten des Sets abräumen darf. Aber das erweiterte Spiel enthält noch eine weitere Zutat, für die ich etwas weiter ausholen muss.

Wenn man in einer zufällig ausgelegten Menge von – zum Beispiel –

zwölf Karten ein Set findet, hat man zugleich auch ein Plättchen, nicht aber umgekehrt. Allgemein kommen Plättchen häufiger vor als Sets.

Mitglieder des Lehrerkreises haben durch erschöpfende Suche mittels Computer festgestellt, dass jede Menge von zehn Karten unvermeidlich ein Plättchen enthalten muss. Neun Karten ohne Plättchen kommen vor, aber mit der verschwindend geringen Wahrscheinlichkeit von 1 zu 19117 – und es gibt kein einfaches Kriterium, mit dem man eine plättchenlose Anordnung als solche erkennen könnte.

Um dagegen mit Sicherheit ein Set im Sortiment zu haben, muss man mindestens 21 Karten auslegen, und es

gibt Kombinationen von 20 Karten, unter denen kein einziges Set ist. Allerdings sind die nicht einfach zu finden.

Alle Teilmengen mit 20 Elementen durchzuprobieren ist eine schlechte Idee; dafür sind es einfach zu viele. Ein Computerfachmann namens David van Brink hat 1997 die Anzahl der Möglichkeiten drastisch reduziert – und mit den verbleibenden seinen damals aktuellen Pentium-Prozessor immerhin eine Woche lang beschäftigt.

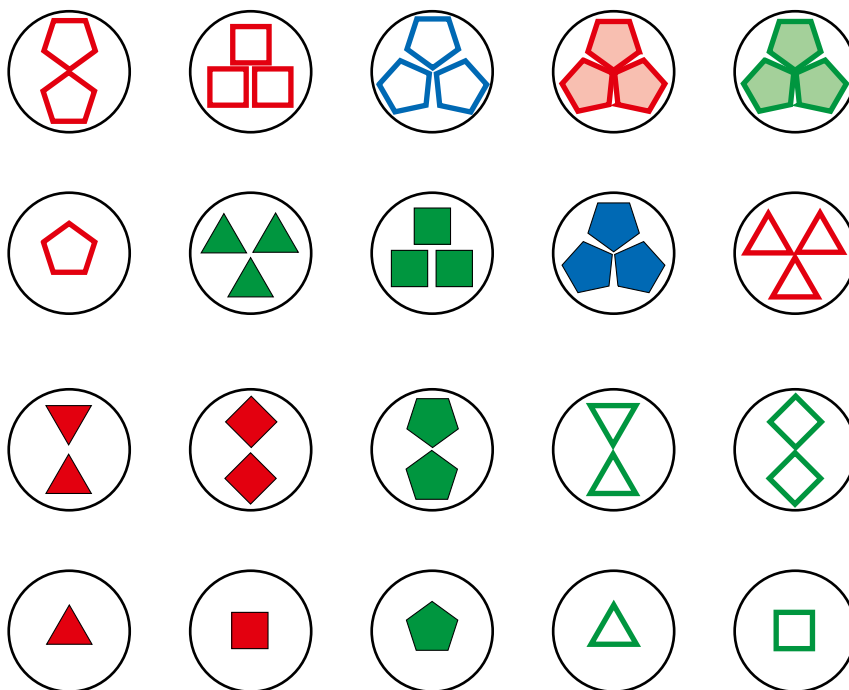
Es geht deutlich geschickter. Wolf Behrenhoff, Felix Krahermer und Andreas Sorge haben 1999 als Schüler ein Suchverfahren entwickelt, das sich von zwei auf drei und dann auf vier Dimensionen hocharbeitet, und es damit bis in den Bundeswettbewerb von »Jugend forscht« geschafft. Ihr Computer fand eine Lösung in wenigen Sekunden (Bild unten).

**Plättchen und Kometen**

Theoretisch ist es also denkbar, dass sich selbst unter 15 ausgelegten Karten kein Set findet und dass man einmal oder gar zweimal drei Karten nachlegen muss. Aber das ist offensichtlich selten – ich habe es noch nie erlebt. Auch das andere Extrem, dass am Ende des Spiels keine Karte mehr auf dem Tisch liegt, ist theoretisch denkbar, kommt aber praktisch kaum vor.

Die entsprechende Frage lässt sich für Plättchen stellen: Wie sieht eine plättchenlose Menge aus neun Karten aus? Die Mitglieder des Lehrerkreises haben eine gefunden (Bild rechts oben) und festgestellt, dass sie über eine besondere Regelmäßigkeit verfügt. Sie enthält zwar kein Set, zerfällt aber in jeweils drei Sets, wenn man immer nur ein Merkmal ohne Rücksicht auf die anderen betrachtet. So sind zum Beispiel beim Merkmal »Stückzahl« die Karten der oberen beiden Zeilen im Bild rechts oben sämtlich verschieden und in der untersten Zeile stets gleich. Entsprechendes gilt für die anderen drei Merkmale – allerdings im Allgemeinen nicht mit derselben Aufteilung.

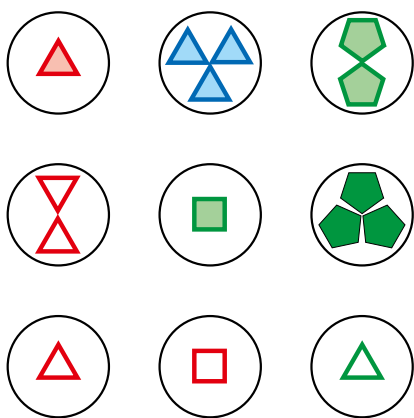
Eine Menge mit dieser Eigenschaft nennt der Lehrerkreis einen Kometen (comet). Und siehe da: Jede Menge von



CHRISTOPH PÖPPE

Wolf Behrenhoff, Felix Krahermer und Andreas Sorge entdeckten 1999 als Schüler dieses Ensemble aus 20 Karten, unter denen es kein einziges Set gibt.





Diese neun Karten zerfallen in drei Sets, wenn man jeweils nur ein Merkmal isoliert von den anderen betrachtet; aber ein Set ist in ihnen nicht enthalten.

neun Karten ist entweder ein Komet, oder sie enthält ein Set oder ein Plättchen, wie sich durch erschöpfende Computersuche herausstellt.

Das motiviert die folgenden Regeln für das erweiterte Spiel: Der Austeiler legt anfangs neun Karten aus und füllt immer wieder nur auf neun Karten auf. Die Spieler suchen um die Wette nach Sets, Plättchen (ohne Set) oder Kometen. Wer ein Objekt seiner Begierde gefunden hat, räumt es ab – bei einem Kometen also alle Karten auf einmal.

Die Lehrer rühmen an dieser Variante des Spiels, dass es auch Neulingen eine Chance gibt, weil der Erfahrungsvorsprung geübter Setspieler kaum eine Rolle spielt, und dass es nicht so hektisch zugeht wie beim Original; man braucht ja viel mehr Zeit zum Nachdenken.

### Die algebraische Sichtweise

Zugegeben: Der vierfach torusförmig verwundene Raum stellt unsere gewohnte Anschauung auf eine harte Probe. Wer den Überblick behalten und Sicherheit gewinnen will, kann sich mit Gewinn auf den algebraischen Standpunkt zurückziehen.

Eine »Set«-Karte ist schließlich vollständig beschrieben durch die vier Zahlen  $(a, b, c, d)$ , von denen jede den Wert 0, 1 oder 2 annehmen darf. Ein solches Zahlenquadrupel nennt man einen »Vektor« und denkt dabei an einen

Punkt, der in einem vierdimensionalen Raum diese Koordinaten hat; aber mit Vektoren kann man auch rechnen, insbesondere sie addieren. Das geht wie im gewöhnlichen Raum komponentenweise:  $(a_1, b_1, c_1, d_1) + (a_2, b_2, c_2, d_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2)$ .

Allerdings gelten für die Koordinaten unserer Vektoren ungewöhnliche Rechenregeln. Da jede der vier Dimensionen zu einem Kreis aufgewickelt ist, kommt beim Zählen nach der Zwei wieder die Null; 3 ist dasselbe wie 0,  $4 = 1$  und so weiter. Wir rechnen »modulo 3«, das heißt, wir behalten von jedem Rechengesetz nur das, was als Rest bei der Division durch 3 übrig bleibt.

Die Theorie der Vektorräume, mit offiziellem Namen Lineare Algebra, gibt uns die Gewissheit, dass bei dieser Rechenweise nichts schiefgehen kann. Die Komponenten eines Vektors müssen nicht gewöhnliche reelle Zahlen sein. Es genügt, wenn sie Elemente eines Körpers sind, das heißt einer Menge, in der man uneingeschränkt addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren kann und die üblichen Rechengesetze gelten. Die Menge  $\{0, 1, 2\}$  der natürlichen Zahlen modulo 3 ist ein solcher Körper, und an Rechenregeln wie  $1+2=0$ ,  $2+2=1$  und  $2 \cdot 2=1$  kann man sich gewöhnen.

Mit dieser speziellen Arithmetik können wir die wesentliche Bedingung auf überraschend einfache Weise charakterisieren: Drei Vektoren (Karten) bilden ein Set genau dann, wenn ihre Summe gleich null ist, genauer: gleich dem Vektor  $(0, 0, 0, 0)$ . In der Tat addieren sich drei gleiche Ausprägungen stets zu null, denn  $0+0+0=1+1+1=2+2+2=0$ , und drei verschiedene ebenfalls, denn  $0+1+2=0$ .

Entsprechend ist ein Komet nichts weiter als eine Menge von neun Vektoren, die sich zu null addieren.

Mit Linearer Algebra lässt sich auch eine andere Variante des Originalspiels bewältigen: Der Austeiler hält die allerletzte Karte zurück. Kann man sie aus den Karten erschließen, die dann noch auf dem Tisch liegen?

Die Antwort ist ja. Alle 81 Karten zusammen haben die Summe null, jedes

abgeräumte Set ebenfalls, somit muss auch die Summe der übrig gebliebenen Karten gleich null sein. Also ist die zurückgehaltene Karte gleich minus der Summe der auf dem Tisch liegenden und ist mit Hilfe der Rechenregeln  $-1=2$  und  $-2=1$  leicht zu berechnen.

Wie steht es um den praktischen Nutzen der ganzen schönen Vektorraumtheorie? Hilft sie einem etwa, ein besserer Setspieler zu werden?

Nicht wirklich. Dort kommt es vor allem auf schnelles Erfassen von Gelegenheiten an – einfacheren oder auch komplizierteren. Bemerkenswerterweise sind Kinder darin häufig besser als Erwachsene, was das Spiel im Familienkreis zu einer erfreulich ausgeglichenen Angelegenheit macht.

Hier noch die Auflösung der Frage aus dem Bild S. 71: Ein volles grünes Dreieck, zwei leere blaue Dreiecke und drei blaue rote Dreiecke bilden ein weiteres Set.  $\approx$

### DER AUTOR



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

### QUELLEN

**Baker, M. et al.:** Sets, Planets, and Comets. In: The College Mathematics Journal 44, S. 258–264, September 2013

**Conrey, B., Donaldson, B.:** SET. <http://www.mathteacherscircle.org/resources/materials/BConreyBDonaldsonSET.pdf>

**Davis, B. L., Maclagan, D.:** The Card Game Set. In: The Mathematical Intelligencer 25, S. 33–40, 2003.

Online unter <http://www.math.rutgers.edu/~maclagan/papers/set.pdf>

**Behrenhoff, W. et al.:** SET! – Ein mehrdimensionales Kartenspiel. Jugend-forscht-Arbeit 1999. <http://www.behrenhoff.de/set>

### WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1309287](http://www.spektrum.de/artikel/1309287)

# Tauchroboter erkunden die Meere

Autonome Unterwasserfahrzeuge erreichen für Menschen unzugängliche Stellen in den Tiefen der Ozeane und liefern wichtige Informationen über Stürme, bedrohte Ökosysteme und den Klimawandel.

Von Oscar Schofield, Scott Glenn und Mark Moline

Die Ozeane haben großen Einfluss auf Klima und Chemie der Erde, beherbergen Ökosysteme von beispielloser Vielfalt und enthalten gewaltige natürliche Ressourcen. Seit Jahrhunderten werden sie daher erkundet. Trotzdem wissen wir nach wie vor wenig über die rund 1,3 Milliarden Kubikkilometer Wasser, die mehr als zwei Drittel der Oberfläche unseres Planeten bedecken. Nur etwa fünf Prozent davon wurden bisher erforscht. Auch viele grundsätzliche Fragen sind noch offen: Wie hoch ist die biologische Produktivität der Ozeane? Welche Prozesse stecken hinter der Vermischung von Wasserschichten? Wie groß ist die Artenvielfalt? Wie beeinflussen die Ozeane die Erdatmosphäre? Wie wandeln sie sich, und wie wirkt sich das auf die Menschheit aus?

Viele Beobachtungen legen nahe, dass sich momentan bedeutende Veränderungen in den Meeren vollziehen. Diese mögen zum Teil auf natürlichen Zyklen beruhen. In zunehmendem Maß aber sind sie die Folge menschlicher Aktivitäten. Örtlich begrenzte Effekte umfassen Veränderungen der Zirkulation, den erhöhten Eintrag von Nährstoffen und Verunreinigungen, die Ausbreitung fremder Arten und eine veränderte Dynamik der Nahrungsketten durch Übernutzung

kommerziell verwertbarer Fischarten. Das Herausfischen räuberischer Spezies, die in der Nahrungspyramide ganz oben stehen, wirkt sich inzwischen aber auch weltweit auf die Biologie der Meere aus. Andere globale Effekte betreffen grundlegende physikalische und chemische Eigenschaften wie Temperatur, Salzgehalt und Meeresspiegelhöhe beziehungsweise pH-Wert und Sauerstoff- sowie Nährstoffkonzentration.

Nur mit detaillierten Informationen über die Physik, Geologie, Chemie und Biologie der Ozeane lassen sich Ausmaß und Folgen all dieser Veränderungen abschätzen. Auf der elementarsten Ebene geht es dabei um physikalische Transportvorgänge. Zu deren Verständnis ist es nötig, Bewegungen und Inhaltsstoffe des Wassers im Zeitverlauf zu verfolgen. Doch angesichts der Weite der Ozeane und der begrenzten Datensammelkapazität traditioneller ozeanografischer Instrumente ist dies schwierig. Hinzu kommt die stetige Durchmischung des Wassers auf unterschiedlichsten Größen- und Zeitskalen – von Zentimetern bis zu Tausenden von Kilometern und von Minuten bis zu Jahrzehnten (siehe Grafik S. 78). Indem unregelmäßige Küstenlinien und Unebenheiten am Meeresboden die Strömungen stören, modifizieren sie diese Transportvorgänge zusätzlich.

Wirft es schon enorme Probleme auf, die Bewegung und Durchmischung des Wassers zu verfolgen, so gilt das umso mehr für seine chemischen und biologischen Veränderungen. Zu den ungeklärten Fragen zählt hier, wie viel anorganischer Kohlenstoff in organische Verbindungen eingebaut wird und wie lange es dauert, bis diese sich in anorganische Moleküle zurückverwandeln – Prozesse, die von marinen Nahrungsketten gesteuert werden. Viele der chemischen Umwandlungen spiegeln die »Geschichte« einer Wassermasse wider, verraten also, wo sie sich einst befand und wann sie zuletzt in Kontakt mit der Meeresoberfläche war.

Ozeanografen sammeln Daten gewöhnlich von Schiffen aus. Durch solche Messfahrten, die seit gut einem Jahrhundert üblich sind, haben sie eine Menge über die Weltmeere gelernt. Doch Schiffe bewegen sich meist nicht schneller als ein Fahrrad und sind höchstens einige Monate unterwegs.

## AUF EINEN BLICK

### EIN HEER VON SUBMARINEN SPÄHERN

**1** Vom Schiff aus oder mit Satelliten lassen sich die Meere nur ungenügend erforschen, weshalb die riesigen Weiten der Ozeane noch größtenteils der Erkundung harren.

**2** Autonome Unterwasserfahrzeuge (AUVs) versprechen hier Abhilfe. Im Rahmen des internationalen Projekts Argo wurden bereits mehr als 3500 Tiefendrifter rund um die Welt ausgebracht. Ohne eigenen Antrieb bewegen sie sich über Jahre auf und ab und sammeln dabei Daten.

**3** Solche AUVs liefern unter anderem wertvolle Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Meere und davon abhängige Ökosysteme. Ebenso könnten sie helfen, die Stärke von Wirbelstürmen genauer vorherzusagen.

Außerdem steht wegen des hohen Preises immer nur eine begrenzte Anzahl von ihnen für Forschungszwecke zur Verfügung. Ein mittelgroßes modernes Schiff verursacht Betriebskosten von etwa 40 000 Euro am Tag, die Ausgaben für die Wissenschaft noch nicht gerechnet. Die Erkundung entlegener Ozeanregionen erfordert lange Anfahrten. Am Ziel hängt es dann von Wind und Wellen ab, wann sichere Arbeitsbedingungen herrschen.

So forscht einer von uns (Schofield) regelmäßig vor der Westküste der Antarktischen Halbinsel. Die Fahrt von New Jersey dorthin kann über eine Woche dauern: zwei Reisetage in der Luft und an Land, ein bis zwei Tage Hafenaufbereitung und vier Tage auf dem Schiff. Während dieser Artikel entstand, befand sich Schofield auf See vor der Antarktis, wo der Schiffsbetrieb wegen Starkwind, heftiger Wellen und vereis-

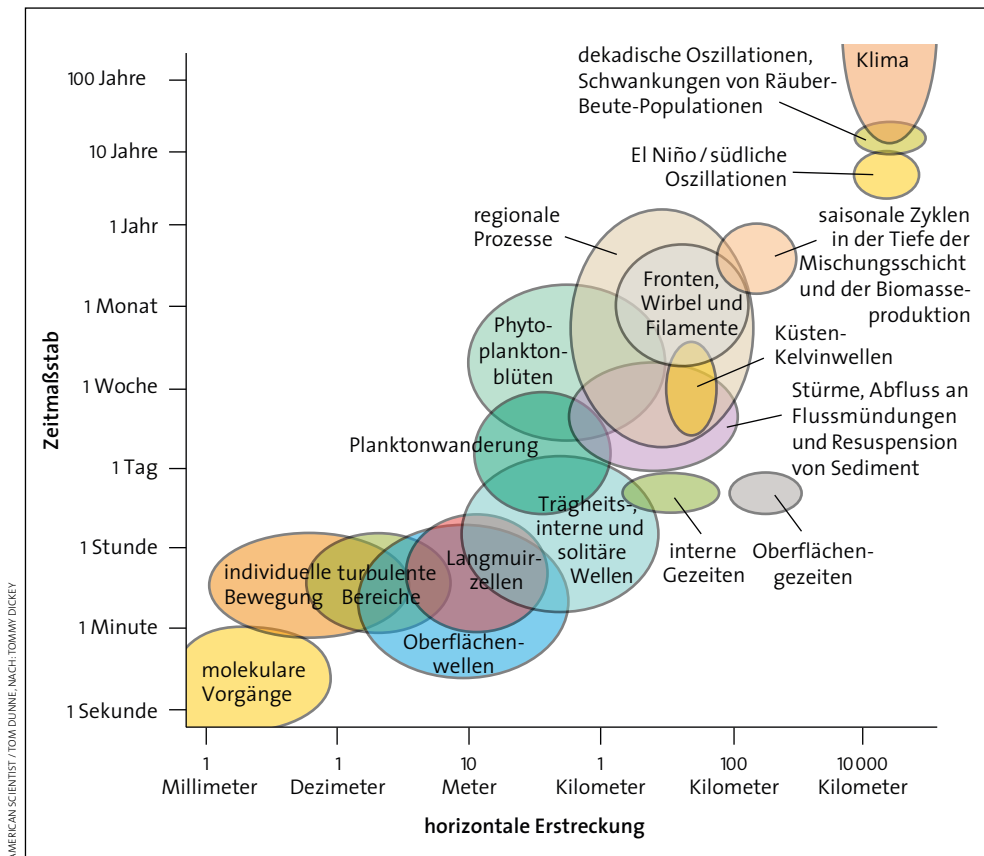
ter Decks für einige Tage zum Stillstand kam. Alle drei lernen wir wiederholt die »rustikale« Arbeitsatmosphäre an Bord von Schiffen kennen, bei der Knochenbrüche oder Platzwunden keine Seltenheit sind. Zwar bleiben Schiffe trotz allem das wichtigste Werkzeug der Ozeanografie; sie bieten die beste Plattform, um Menschen in das zu erkundende Gebiet zu transportieren. Allerdings gibt es schon seit Jahrzehnten Bemühungen, neue Formen der Datensammlung auf See zu erschließen.

Satelliten spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie liefern ungefähre globale Werte für Oberflächentemperatur, Salzgehalt, Meeresspiegelhöhe und pflanzliche Biomasse. Ihre räumliche Auflösung ist jedoch ziemlich gering; sie liegt zwischen einigen und mehreren hundert Kilometern. Zudem können Satelliten bei Bewölkung keine oder nur begrenzt



Wissenschaftler setzen einen Unterwassergleiter aus. Solche autonomen Fahrzeuge sammeln Daten über den physikalischen Zustand der Ozeane, die sich per Schiff oder Satellit nicht erheben lassen.





Vorgänge im Meer laufen auf sehr unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen ab, wobei sie sich oft gegenseitig beeinflussen. Nur ein Teil lässt sich deshalb mittels traditioneller Forschungsmethoden erfassen. AUVs können dank ihrer langen Einsatzzeiten und ihrer Mobilität etliche Lücken schließen.

Daten erfassen. Vor allem aber bleibt ihnen das Innere der Ozeane verschlossen.

Um Informationen von dort zu erhalten, verwenden Forscher traditionell so genannte Moorings. Dabei sind an einem Seil, das im Meeresboden verankert und mit einem Auftriebskörper versehen ist, vertikal übereinander Instrumente angebracht, die Zeitserien von verschiedenen Messgrößen an einer bestimmten Stelle im Ozean liefern. Wegen der hohen Kosten, die zwischen 200 000 und mehreren Millionen Dollar liegen, ist ihre Zahl allerdings begrenzt.

Angesichts dieser unbefriedigenden Situation plädierte der Ozeanograf Henry M. Stommel (1920–1992) schon vor 24 Jahren für die Einrichtung eines weltweiten Netzes mobiler Sensoren, die sich autonom durch die Ozeane bewegen. Nur so lasse sich herausfinden, was in den Tiefen der Meere passiert. Stommels Vision ist inzwischen in Teilen verwirklicht. Tausende von autonomen Unterwasserfahrzeuge oder kurz AUVs (nach englisch: autonomous underwater vehicles) steuern heute durch die Ozeane. Sie können selbst unter härtesten Bedingungen bis zu mehrere Jahre am Stück im Einsatz sein und kommen fast ohne externe Steuerung aus. Dabei messen sie nicht nur Basisgrößen wie Temperatur und Salzgehalt, sondern liefern auch spezifischere Informationen – unter anderem zu so brennenden Fragen wie die nach der Dynamik von Stürmen oder den Folgen des Klimawandels.

Die anhaltende Miniaturisierung der Elektronik im letzten Jahrzehnt führte zur Entwicklung kompakter Sensoren.

In Verbindung mit verbesserten Batterien ließen sich so Roboterplattformen entwerfen, die ein breites Spektrum von Missionen durchführen können. Durch den Aufbau eines kostengünstigen globalen Telekommunikationsnetzes steht heute zudem eine ausreichende Bandbreite zur Verfügung, um von jedem Punkt der Erde Daten herunterzuladen und AUVs fernzusteuern.

### Treibend, gleitend oder propellergetrieben

Die autonomen Unterwasserfahrzeuge gliedern sich in drei Typen: profilierende Tiefendrifter, Gleiter und Propellerfahrzeuge. Tiefendrifter stellen wegen ihres relativ niedrigen Preises von 15 000 Dollar das Hauptkontingent. Mehr als 3500 wurden im Rahmen des internationalen Programms Argo überall in den Meeren ausgebracht. Die 1,3 Meter langen Bojen verringern ihren Auftrieb mit einer elastischen Gummiblase und sinken so bis zu einer zuvor festgelegten Tiefe – oft mehr als 1000 Meter – ab, wo sie um die zehn Tage bleiben und sich mit den Strömungen treiben lassen. Dann erhöhen sie ihren Auftrieb wieder und kehren zur Oberfläche zurück.

Während des Ab- und Wiederaufstiegs erfassen Sensoren vertikale Profile von Größen wie der Temperatur und dem Salzgehalt. Zudem messen sie Farbe und Fluoreszenz des Wassers – manchmal auch pH-Wert und Nährstoffkonzentrationen. Nach dem Aufstieg übermitteln die Drifter die Daten per Satellit und beginnen einen neuen Zyklus.

Obwohl sich die Fahrzeuge nicht unabhängig horizontal fortbewegen können, sind sie extrem nützlich. Mit einem einzigen Satz Batterien kommt ein Drifter vier bis sechs Jahre aus. Insgesamt liefern die mehr als 3500 Geräte ein umfassendes Bild der Bedingungen in den oberen 1000 Metern der Weltmeere. In Verbindung mit weltumspannenden Messungen der Meeresspiegelhöhe und Oberflächentemperatur durch Satelliten lassen sich so erstmals vom Klimawandel bewirkte Veränderungen der Temperatur, des Salzgehalts und der Zirkulation im Meer rund um den Erdball verfolgen.

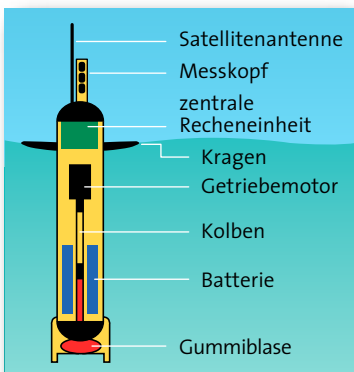
Auch die Unterwassergleiter verändern ihren Auftrieb. Bei ihnen lenken Flügel jedoch die resultierende Vertikalbewegung um und erzeugen einen Vorschub, der zu Horizontalgeschwindigkeiten von 20 bis 30 Zentimetern pro Sekunde führt. Ein Heckruder sorgt für die Steuerung, während der Gleiter sägezahnartig durch die Wassersäule ab- und aufsteigt. Dadurch lassen sich die meist ein bis zwei Meter langen Geräte gut dirigieren. Mit etwa 125 000 Dollar pro Stück sind sie allerdings deutlich teurer als Drifter. Daher kommen sie nur bei speziellen Forschungsmissionen zum Einsatz, während sie in Stommels ursprünglicher Vision die Hauptrolle spielten.

Zum Navigationssystem eines Gleiters gehört ein GPS-Empfänger, der mit einem Lage- und Tiefensensor sowie einem Altimeter verbunden ist; Letzteres ermittelt den Abstand zum Meeresboden. Mittels dieser Ausstattung kann das Fahrzeug anhand des Kurses und der bekannten oder ge-

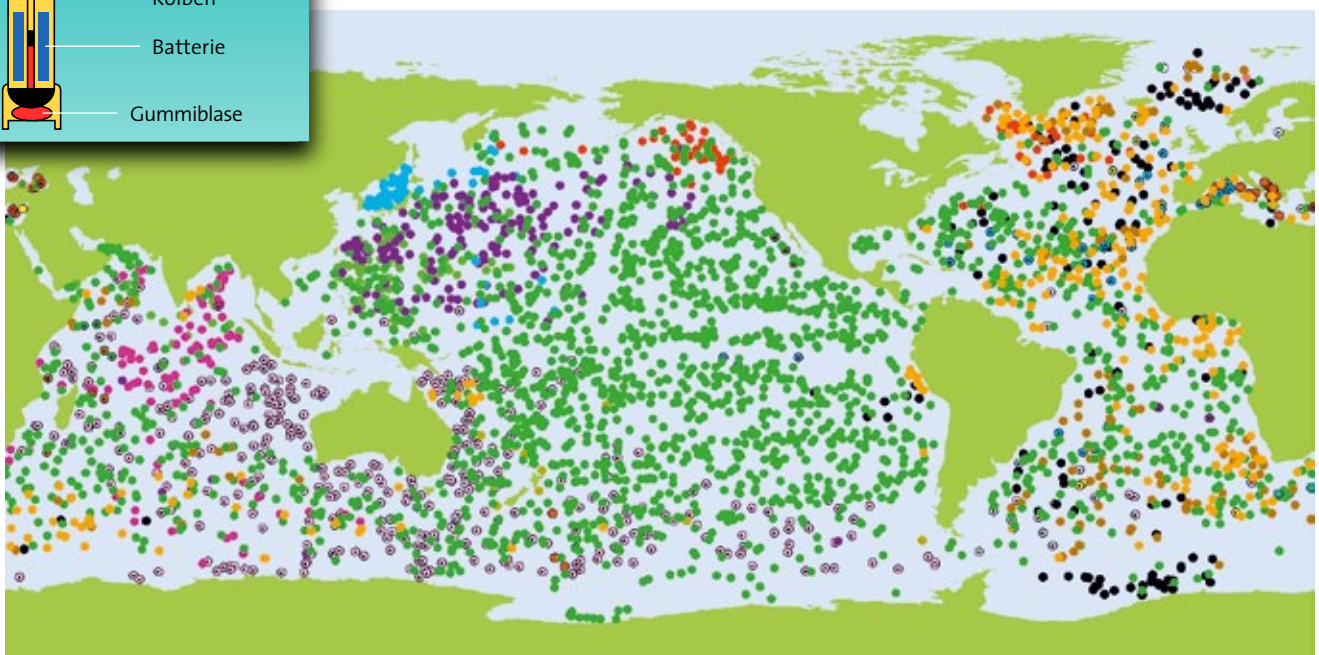
schätzten Geschwindigkeit aus einer zuvor ermittelten Position jeweils berechnen, wo es sich gerade befindet. Dies wiederholt es in regelmäßigen Zeitabständen. Altimeter und Tiefensensor lassen sich auch dazu benutzen, die exakte Stelle in der Wassersäule zu programmieren, an der das Fahrzeug Daten sammeln soll. In vorbestimmten Intervallen steigt es an die Oberfläche und schiebt eine Antenne aus dem Wasser, um seine genaue Position per GPS zu bestimmen, Daten an Land zu übermitteln und eventuell neue Befehle entgegenzunehmen.

Da der Auftrieb für die Vorwärtsbewegung sorgt, verbrauchen die Gleiter nur wenig Energie und können bis zu ein Jahr lang mit Batteriestrom unterwegs sein. Ihr modularer Aufbau aus austauschbaren Komponenten erlaubt es, jeweils genau die Sensoren zu installieren, die zu einer bestimmten Forschungsmission passen. Zudem besteht die Möglichkeit, die Geräte später anhand der erhaltenen Messergebnisse ferngesteuert fast in Echtzeit umzuprogrammieren, so dass sie andere Daten sammeln.

Am höchsten entwickelt, aber auch am teuersten sind AUVs mit Propellerantrieb. Ihre Kosten reichen von 50 000 bis 5 Millionen Dollar, je nach Größe und maximaler Tauchtiefe. Durch Batterien oder Brennstoffzellen angetrieben, können sie bis in 6000 Meter Wassertiefe vordringen. Wie Drifter und Gleiter tauchen sie regelmäßig auf, um mittels GPS ihre Position zu bestimmen und per Satellit Daten sowie Informationen zu ihrer Mission zu übermitteln.



Die Weltkarte (unten) zeigt die Positionen der 3561 autonomen »profilierenden Tiefendrifter«, die im Rahmen des Argo-Programms im Februar dieses Jahres im Einsatz waren. Farben signalisieren das Herkunftsland. Die übliche Version eines Argo-Drifters (links) ist 1,3 Meter hoch. Die Fahrzeuge sinken und steigen, indem sie mittels einer Hochdruckpumpe das Volumen einer außen angebrachten Gummiblase – und damit ihren Auftrieb – verändern. Sie bleiben zehn Tage in der Tiefe, um Daten zu sammeln. Während des Auf- und Abstiegs erstellen sie vertikale Profile von Größen wie Temperatur und Salzgehalt – daher ihr Name.

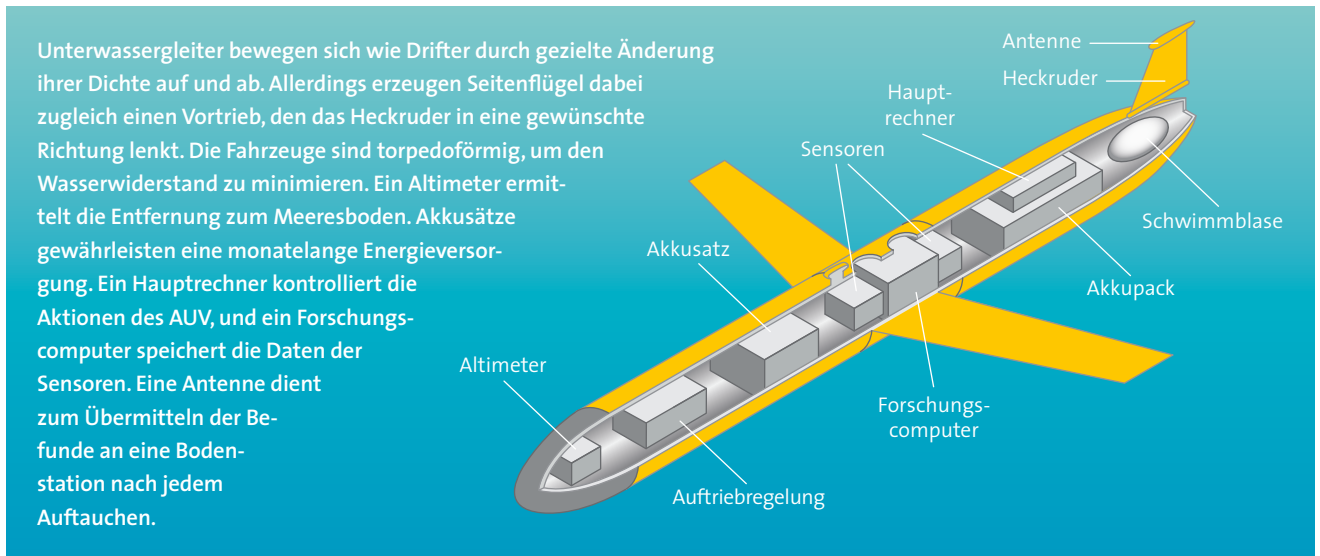


Mit Geschwindigkeiten von fünf bis zehn Kilometern pro Stunde kommen propellergetriebene AUVs gegen die meisten Strömungen an. Dadurch können sie systematisch eine Linie, ein Areal oder ein Volumen abfahren und vermessen. Präzises Navigieren ist besonders wichtig beim Erkunden des Meeresbodens und bei Operationen in küstennahen Gewässern mit starkem Schiffs- und Bootsverkehr.

Für die Navigation unter Wasser existieren verschiedene Methoden. So können die Geräte ein Netzwerk akustischer Signalstationen oder ihre relative Position zu einem Schiff

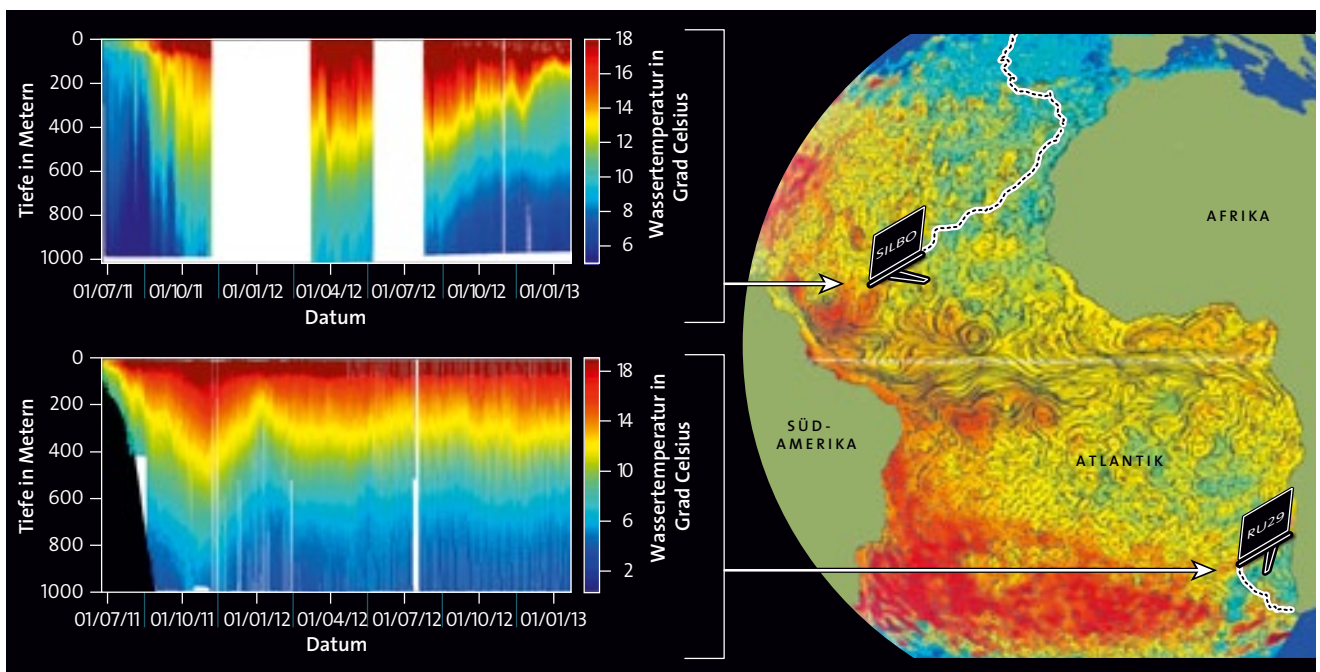
an der Oberfläche zur Ortsbestimmung heranziehen. Zum Einsatz kommen auch Trägheitsnavigationssysteme, welche die Beschleunigung des Fahrzeugs mit einem Akzelerometer und die Fahrtrichtung mit einem Gyroskop messen. Zum Ermitteln der Geschwindigkeit dient der Doppler-Effekt: die akustische Verschiebung von Schallwellen, die vom Meeresboden oder anderen ortsfesten Objekten reflektiert werden. Ein Drucksensor liefert die vertikale Position.

Die meisten heute eingesetzten propellergetriebenen AUVs arbeiten mit wiederaufladbaren Batterien – etwa Li-



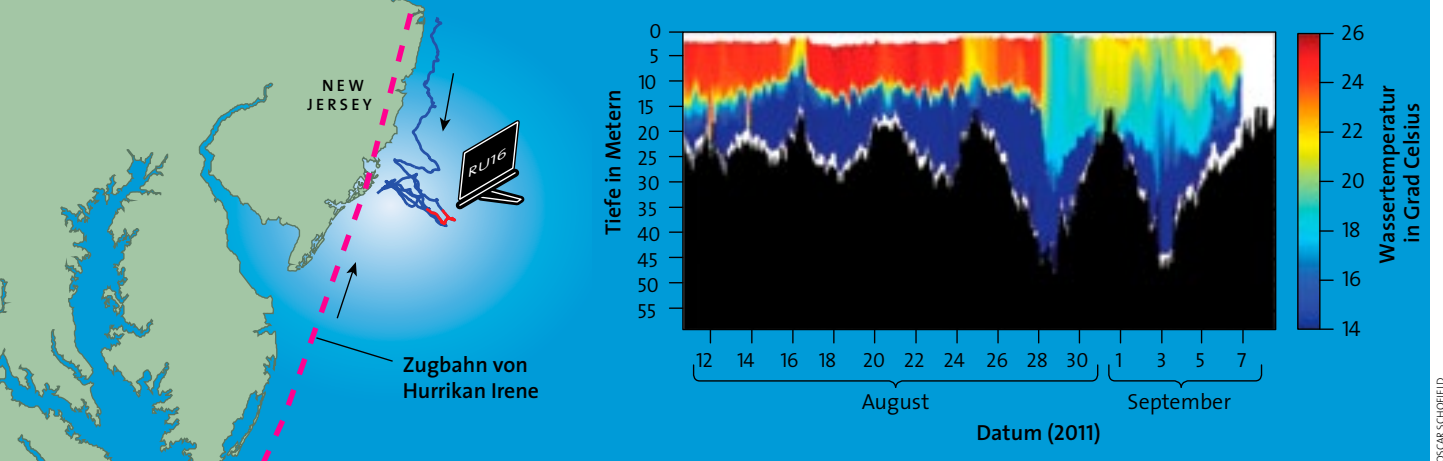
AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE

Globale numerische Modelle der Ozeanzirkulation dienen zur Fernsteuerung von zwei Unterwassergleitern (rechts). Strömungen sind durch Wellenlinien angezeigt, während die Farbe die Höhe des Meeresspiegels kennzeichnet. Das Heckrudder markiert jeweils die Position des Gleiters; einer hält auf Brasilien zu, der andere entfernt sich von der südafrikanischen Küste. Die Diagramme (links) zeigen die von den Fahrzeugen aufgenommenen Temperaturprofile.



OSCAR SCHOFIELD





Als Hurrikan Irene am 28. August 2011 New Jersey streifte (links), bewegte sich ein Gleiter namens RU16 die Küste entlang (blaue Linie). Er sollte im Auftrag des Umweltministeriums die Wasserqualität bestimmen, registrierte auf Grund seiner Position (rote Linie) aber auch Daten über den Sturm. Seine Messwerte (rechts) zeigten, dass sich die oberflächennahe Wasserschicht schlagartig abkühlte, als der Hurrikan durchzog. Das könnte erklären, warum er schwächer ausfiel als vorhergesagt. Anhand solcher Daten lässt sich in Zukunft die Stärke von Wirbelstürmen vielleicht genauer prognostizieren.

thium-Ionen-Akkus ähnlich denen in Laptops. Eine Ladung reicht je nach Größe des Fahrzeugs und seinem Stromverbrauch in der Regel für 6 bis 75 Arbeitsstunden, wobei in diesem Zeitraum 70 bis 400 Kilometer zurückgelegt werden.

Dank des aktiven Antriebs können Propeller-AUVs wesentlich mehr Sensoren mitführen als Gleiter und stellen die wichtigste autonome Plattform für die Fortentwicklung von Messsystemen dar. Einige hundert wurden in den letzten zwei Jahrzehnten konstruiert, die meisten für militärische Zwecke. Ihre Länge reicht von 0,5 bis 7 Meter, ihr Durchmesser von 0,15 bis 1 Meter. Obwohl bisher nur wenige in der Wissenschaft zum Einsatz kamen, dürften sie gegen Ende des Jahrzehnts in den meisten ozeanografischen Labors und in den Regierungsbehörden, die für die Kartierung und Überwachung mariner Systeme verantwortlich sind, zum Standardinventar gehören.

### Einblicke in einen Hurrikan

Gemeinsam eröffnen diese verschiedenen Typen von Tauchrobotern der Ozeanografie Möglichkeiten, die weit über das hinausgehen, was herkömmliche Methoden zu leisten vermögen. Zum Beispiel können sie die Wechselwirkung des Meeres mit Wirbelstürmen ergründen. Wir, die Autoren, wohnen alle drei in der mittelatlantischen Region der USA und haben die Hurrikane Irene und Sandy erlebt, so dass uns deren Auswirkungen nur allzu vertraut sind.

Hurrikan Irene gehörte, bevor er aufs Festland traf, noch zur Kategorie 1, war also relativ schwach. Während er im August 2011 rasch entlang der Ostküste der USA nordwärts zog, führte er jedoch zu sintflutartigen Regenfällen und erheblichen Überschwemmungen an den Binnengewässern. Hurrikan Sandy war offshore ein deutlich stärkerer Sturm der Kategorie 2. Nach einer untypischen Wendung nach links traf er im Oktober 2012 im rechten Winkel auf die Küste und richtete in den Ortschaften in Meeresnähe schwere Verwüstungen an. Das National Hurricane Center der Vereinigten Staaten führt Sandy als zweitstärksten Hurrikan aller Zei-

ten – bei einer Schadenssumme von über 60 Milliarden Dollar. Irene folgt auf dem achten Platz mit Kosten in Höhe von mindestens 15 Milliarden Dollar.

Das National Hurricane Center hatte die Zugbahnen der beiden Stürme schon einige Tage im Voraus sehr genau vorhergesagt. Durch Evakuierungen konnten daher viele Menschenleben gerettet werden. Die Prognose der Sturmstärken war weniger präzise. So wurde Irene beträchtlich überschätzt. Dagegen unterschätzte die Wetterbehörde die rasche Beschleunigung und Intensitätszunahme von Sandy kurz vor Erreichen der Küste. Bei einer genaueren Vorhersage hätten wirksamere Vorkehrungen getroffen werden können, so dass die Schäden wohl geringer ausgefallen wären.

Die Entwicklung globaler Atmosphärenmodelle in den letzten 20 Jahren hat die Fehlerquote bei der Vorhersage von Hurrikan-Zugbahnen um den Faktor zwei bis drei gesenkt. Bei der Prognose der Sturmstärke gab es viel geringere Fortschritte. Als möglicher Grund dafür gilt, dass in diesem Fall mehr Informationen über die Wechselwirkung zwischen dem Ozean und der Atmosphäre benötigt werden, weil hohe Temperaturen in den oberen Meeresschichten einen Hurrikan zusätzlich anheizen. AUVs bieten die Chance, die Interaktionen zwischen dem Sturm und küstennahen Gewässern zu untersuchen – was mit traditionellen ozeanografischen Methoden nicht möglich ist.

Im Sommer bildet sich im Mittelatlantik in 10 bis 20 Meter Tiefe eine ausgeprägte Thermokline: eine scharfe Trennlinie zwischen der 24 bis 26 Grad Celsius warmen Oberflächenschicht und dem Wasser darunter, das mit acht bis zehn Grad Celsius viel kälter ist. Als sich die Hurrikane Irene und Sandy der US-Küste näherten, navigierten Gleiter durch die betreffenden Meeresregionen und erstellten hydrografische Profile. Diese Daten sind sehr aufschlussreich. Demnach kompensierte bei Irene eine von Starkwinden verursachte, seewärts gerichtete Abwärtsströmung unterhalb der Thermokline den Zustrom von Oberflächenwasser, das der Hurrikan gegen die

Küste drückte. Die Sturmwellen blieben dadurch relativ niedrig, und es kam nicht zu Überflutungen vom Meer aus.

Durch die vom Hurrikan bewirkte Vermischung der Wasserschichten verbreiterte sich zudem die Thermokline. Infolgedessen kühlte die Meeresoberfläche vor Irene innerhalb weniger Stunden um bis zu acht Grad Celsius ab, ehe das Auge des Hurrikans durchzog. Das schwächte den Sturm, als er auf die Küste traf. Als die Gleiterdaten nachträglich in die Wettermodelle eingegeben wurden, sagten sie die Stärke von Irene korrekt voraus.

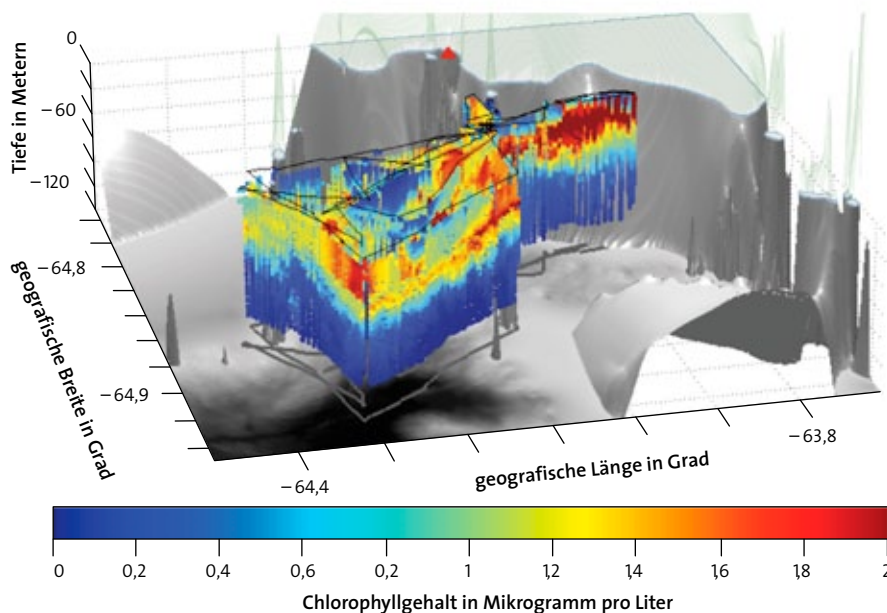
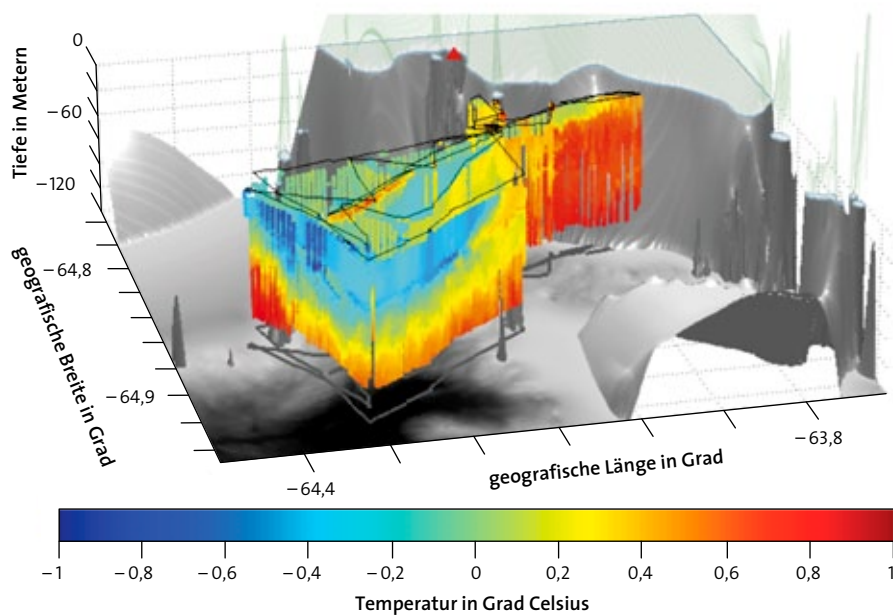
Hurrikan Sandy trat dagegen erst im Spätherbst auf. Da hatte sich die Meeresoberfläche jahreszeitlich bedingt schon um acht Grad Celsius abgekühlt. Ihre Temperatur nahm deshalb durch die sturmbedingte Vermischung mit kaltem Wasser aus tieferen Schichten nur um etwa ein Grad Celsius ab.

Das reichte nicht, den Hurrikan nennenswert zu schwächen, als er sich der Küste von New Jersey und New York näherte.

Damit ist bewiesen, dass AUVs bei Orkanen wertvolle Daten liefern können, die vielleicht zu einer genaueren Prognose der Sturmstärke führen und Küstengemeinden helfen, Schäden vorzubeugen. Den Unterwasserrobotern macht das Wüten der Elemente nichts aus, vor dem Schiffe kapitulieren müssen. Dank ihrer Mobilität können sie der Zugbahn des Sturms folgen und wegen ihrer langen Einsatzzeit schon Tage vor Ankunft des Hurrikans am Ort des Geschehens sein sowie auch nach seinem Abzug noch Messungen vornehmen.

### Erwärmung der Antarktis

So kompliziert die Hurrikan-Vorhersage sein mag, erscheint sie als Kinderspiel im Vergleich zu der Aufgabe, die globalen



Messungen eines Unterwasser-gleiters geben Einblick in Vorgänge in einem Tiefseecanyon im Westen der Antarktischen Halbinsel. Temperaturdaten (oben) zeigen einen Aufstieg warmen Wassers, wahrscheinlich bedingt durch die Verlagerung des Zirkumpolarstroms zur Küste hin. In der betroffenen Region ist, wie die ebenfalls ermittelten Chlorophyllwerte (unten) deutlich machen, auch die Phytoplanktonkonzentration erhöht. Damit ließ sich erstmals ein Zusammenhang zwischen Warmwasseraufstieg und erhöhter Produktivität des Ozeans nachweisen.

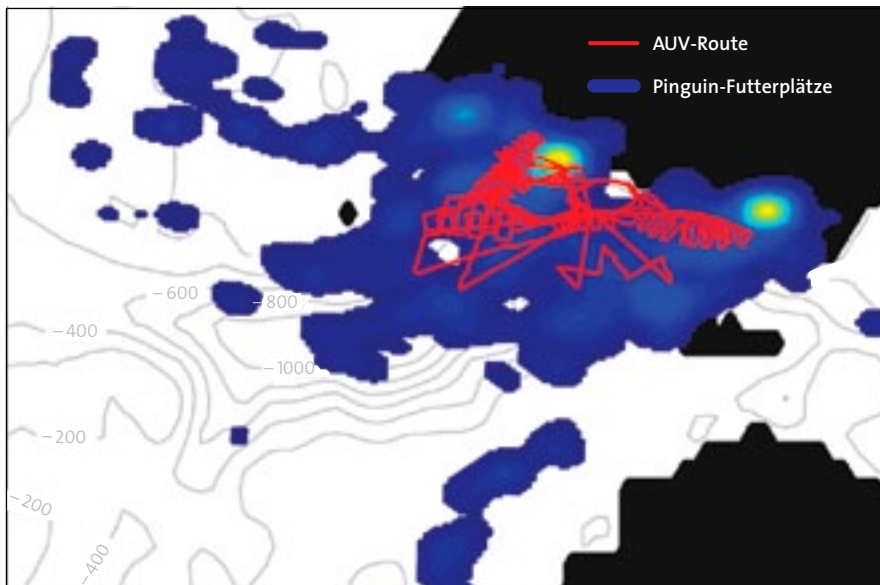
Veränderungen der Ozeanphysik zu ermitteln und mit lokalen Phänomenen wie der Meereisbedeckung oder dem Artenschwund in Verbindung zu bringen. Dazu bedarf es einer Vielzahl unterschiedlicher Daten, welche die volle räumliche und zeitliche Bandbreite mariner Ökosysteme abdecken. Sie mit konventionellen Methoden zu sammeln, wäre extrem schwierig, wenn nicht unmöglich.

Als Beispiel sei die Antarktische Halbinsel genannt. Sie durchläuft eine der dramatischsten klimabedingten Veränderungen auf der Erde. Die mittlere Lufttemperatur im Winter ist seit 1951 um über sechs Celsiusgrade gestiegen – 5,4-mal so stark wie im weltweiten Durchschnitt. Stärkere Westwinde und Veränderungen der regionalen atmosphärischen Zirkulation, die wahrscheinlich zum großen Teil von menschlichen Aktivitäten herrühren, haben dazu beigetragen, dass mehr

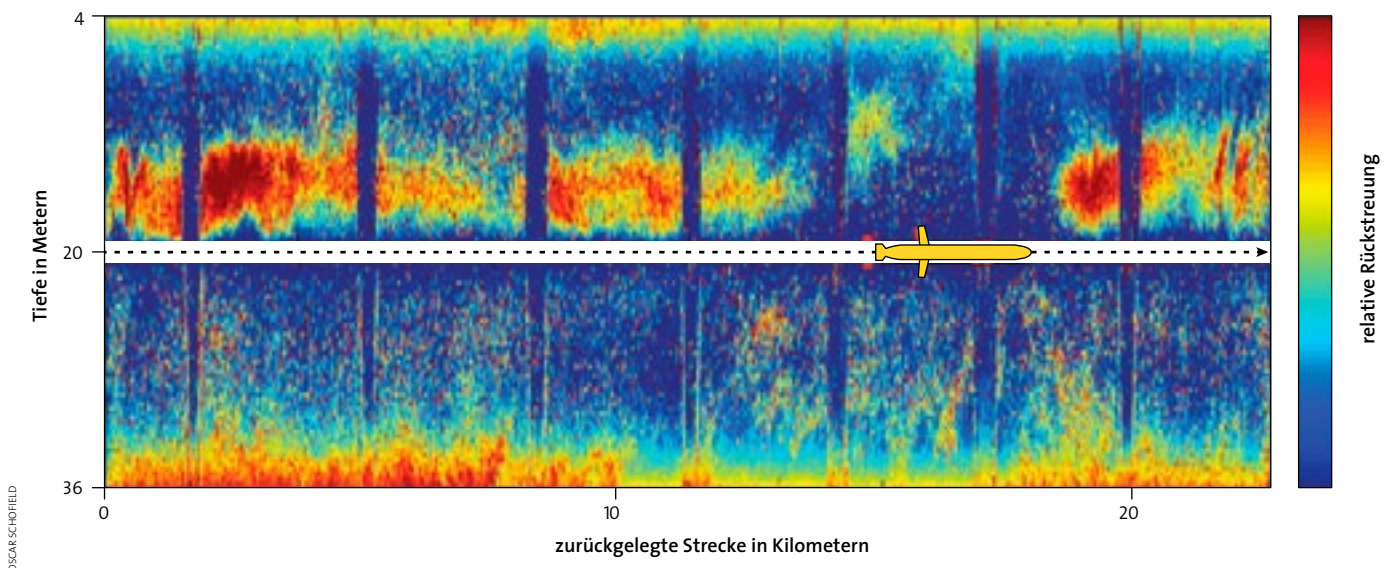
relativ warmes Tiefenwasser zum Kontinentalschelf gelangt. Es stammt aus den küstennahen Gewässern des antarktischen Zirkumpolarstroms, der größten Meeresströmung der Welt.

Diese warme Tiefenströmung, welche die wichtigste Wärmequelle der Halbinsel darstellt, hat sich verlagert, was einer der Hauptgründe für die Erwärmung der Atmosphäre und den rapiden Gletscherschwund in der Region ist. Ihre Dynamik zu überwachen und zu verfolgen, erfordert den ununterbrochenen Einsatz eines weltumspannenden Netzes von Messgeräten, wie es inzwischen die Argo-Drifter darstellen. Aus deren Daten ergibt sich für den antarktischen Zirkumpolarstrom ein seit Jahrzehnten anhaltender Erwärmungstrend.

Die Veränderungen im Meer und in der Atmosphäre wirken sich auch auf die lokale Nahrungskette aus. Im Westen der Antarktischen Halbinsel gibt es große Brutkolonien des



Die Satellitenüberwachung radiotelemetrisch markierter Pinguine zeigte deren Futterplätze (links, blau; gelb: höchste Aktivität). Ein dorthin gesteuertes Propeller-AUV (rote Linien) war mit einem akustischen Sensor ausgestattet, der die Hauptnahrungsquelle der Pinguine aufspüren kann: Antarktischen Krill. Die anhand seiner Messdaten erstellte Karte (unten) verrät, dass sich in der Nähe von Canyons mit aufsteigendem warmem Wasser Krillschwärme in etwa 18 Meter Tiefe aufhalten.





Adeliepinguins (*Pygoscelis adeliae*). Die Tiere nisten aber nur an wenigen Stellen, obwohl entlang des gesamten inneren Kontinentalschelfs Nahrung im Überfluss vorhanden ist. Schon lange rätseln Biologen über den Grund dafür.

Die Standorte der Adelie-Kolonien scheinen mit submarinen Canyons zusammenzuhängen, die den Kontinentalschelf der Halbinsel durchschneiden. Das hat zu der Hypothese geführt, dass wegen besonderer physikalischer und biologischer Bedingungen im Umkreis der Schluchten dort ausnehmend viele Beutetiere vorkommen. Laut einer anderen Vermutung bilden sich oberhalb der Canyons immer wieder Polynjas – eisfreie Flächen –, die den Pinguinen ganzjährig Zugang zum offenen Wasser für die Nahrungssuche verschaffen. Beides ließ sich jedoch nicht überprüfen, weil wegen der harschen Umweltbedingungen die benötigten Daten per Schiff nicht zu gewinnen waren.

### Schlaraffenland für Pinguine

AUVs bieten jetzt bessere Möglichkeiten dazu. Wir selbst setzten während der letzten sechs Jahre sowohl Gleiter als auch ein propellergetriebenes Fahrzeug ein, um zu ergründen, ob und wie die Standorte der Pinguinkolonien mit Besonderheiten der küstennahen zirkumpolaren Strömung zusammenhängen. Indem unsere Gleiter den Großteil des Kontinentalschelfs überwachten, dokumentierten sie das Eindringen warmen Tiefenwassers. Dieses stieß innerhalb der Canyons bis in die Nähe der Pinguin-Brutkolonien vor. Allerdings scheinen die Vorstöße vorübergehende Erscheinungen zu sein, die im Mittel nur sieben Tage dauern. Das ist wohl der Grund, warum sie bei früheren, unregelmäßigen Untersuchungen per Schiff verborgen blieben. Wo das zirkumpolare Tiefenwasser an den Flanken küstennaher Canyons empordrang, fanden die Gleiter erhöhte Konzentrationen pflanzlichen Planktons. Damit lieferten sie den Beweis für einen Nahrungsketten-Hotspot, der die Pinguinkolonien offenbar mit Futter versorgt.

Tatsächlich suchten die Tiere, wie ihre radiotelemetrische Überwachung per Satellit ergab, vorwiegend an den Hängen eines Canyons nach Nahrung. Um letzte Klarheit zu erlangen, zogen wir daraufhin ein Propeller-AUV heran; denn die Unterwassergleiter hatten gegen die starken Küstenströmungen keine Chance. Von ihm gelieferte Daten zeigten an den Futterplätzen der Pinguine Schwärme von Antarktischem Krill, der sich seinerseits von dem pflanzlichen Plankton am Schelfhang ernähren dürfte.

Unter Einsatz aller drei Klassen von AUVs gelang es so schließlich, ein altes Rätsel zu lösen. Ein besseres Verständnis solcher Zusammenhänge zwischen geografischen und biologischen Gegebenheiten ist nötig, um den Grund für den dramatischen Rückgang der Pinguinpopulationen in letzter Zeit zu ermitteln. So ist die Gesamtzahl der Tiere in den Kolonien nahe der Palmer-Antarktisstation in den vergangenen 30 Jahren von 16000 auf 2000 geschrumpft. Mit Hilfe von Unterwasserrobotern sollte sich klären lassen, welche Rolle die klimatisch bedingten lokalen Veränderungen in den Tiefseecanyons dabei gespielt haben.

Solche Untersuchungen werden von weiteren technischen Fortschritten bei den AUVs profitieren. So werten die neuesten Typen ihre Daten bereits selbst aus und treffen auf dieser Grundlage unterwegs von sich aus Entscheidungen. In Entwicklung sind ferner Verfahren, durch die Unterwasserroboter miteinander kommunizieren und so ihre Arbeit aufeinander abstimmen können. All das dürfte die Möglichkeiten zur Erforschung der Ozeane erheblich erweitern.

Doch die größte Bedeutung von AUVs liegt wahrscheinlich darin, dass sie offen zugängliche Echtzeitdaten liefern. Ozeanografische Forschung war in der Vergangenheit einer geringen Zahl von Wissenschaftlern vorbehalten, die an Schiffsexpeditionen teilnehmen konnten. Dank der Verwirklichung von Stommels Traum kann sie jetzt jeder betreiben, der Interesse daran hat. Durch diese Demokratisierung des Gebiets sollte das Wissen über die Meere stark zunehmen.

Das sind erfreuliche Aussichten gerade zu einer Zeit, da der Klimawandel in den ozeanischen Ökosystemen offenbar deutliche Spuren hinterlässt. In der Vergangenheit gingen, wie paläontologische Befunde lehren, einschneidende Veränderungen in den Meeren stets mit weltweiten Umbrüchen in der Tier- und Pflanzenwelt einher. Der Zustand der Weltmeere dürfte für das gesamte irdische Leben also von erheblicher Bedeutung sein. Je genauer wir ihn kennen, desto besser stehen unsere Chancen, das Raumschiff Erde durch das derzeit schwierige Fahrwasser zu steuern. ~

### DIE AUTOREN



**Oscar Schofield** (links) ist Professor für Ozeanografie und leitet die Abteilung für Meeres- und Küstenwissen-

schaften an der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey). Auch **Scott Glenn** (Mitte) lehrt dort Ozeanografie. Beide befassen sich hauptsächlich mit der Entwicklung von Netzwerken zur Meeresbeobachtung. **Mark Moline** ist Direktor der Fakultät für Meereswissenschaften und Meerespolitik an der University of Delaware in Newark. Er interessiert sich vor allem für Plankton.

### QUELLEN

- Griffiths, G.:** Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles. Taylor & Francis, New York 2003
- Johnson, K.S. et al.:** Observing Biogeochemical Cycles at Global Scales with Profiling Floats and Gliders: Prospects for a Global Array. In: Oceanography 22, S. 216–225, 2009
- Moline, M.A. et al.:** Remote Environmental Monitoring Units: An Autonomous Vehicle for Characterizing Coastal Environments. In: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 22, S. 1797–1808, 2005
- Rudnick, D.L. et al.:** Underwater Gliders for Ocean Research. In: Marine Technology Society Journal 38, S. 48–59, 2004
- Wilson, S.:** Launching the Argo Armada. In: Oceanus 42, S. 17–19, 2000

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1309289](http://www.spektrum.de/artikel/1309289)

© American Scientist

Einbahnhof

Einblick

Einblick

Durchblick

Das Entscheidende im

**FOCUS**



# Die Geheimnisse des Lebens berechnen

Durch Computersimulationen gelingt es, komplizierte biologische Prozesse auf molekularer Ebene nachzuvollziehen und damit aufzuklären: wie ein Antibiotikum seine Wirkung entfaltet, wo der Aidserreger HIV Schwachpunkte in seiner Hülle hat, wie Purpurbakterien Fotosynthese betreiben und vieles mehr.

Von Till Rudack, Juan Perilla und Klaus Schulten

In den letzten 40 Jahren haben die Computer einen Faktor  $10^9$  (eine Milliarde) an Leistungsfähigkeit zugelegt. Damit sind sie zwar in der Lage, immer aufwändigere Berechnungen anzustellen; aber ist die Welt so komplex, dass man diese großen und teuren Geräte wirklich braucht?

Was die Lebenswissenschaften angeht, so können wir diese Frage mit einem klaren Ja beantworten. Wesentliche Prozesse finden auf der Ebene der Moleküle statt; die entscheidenden Akteure innerhalb einer Zelle sind die Proteine. Sie katalysieren chemische Reaktionen aller Art, zum Beispiel beim Verarbeiten der Nahrung, wandeln bei der Fotosynthese Licht in chemische Energie um, geben als Stützstrukturen einzelnen Zellen und ganzen Körpern Halt und erledigen noch viele andere Aufgaben. Unser Erbgut besteht zu einem wesentlichen Teil aus Bauanleitungen für Proteine.

In der Rohform bestehen sie aus Ketten von einigen hundert Aminosäuren mit insgesamt mehreren tausend Atomen.

Aber ihre Wirkungen entfalten sie erst, indem sie eine spezielle räumliche Struktur annehmen. Obendrein pflegen sie bei der Arbeit ihre Form zu ändern, und in aller Regel arbeiten mehrere Proteine in engem Kontakt an einer Aufgabe zusammen, gleichsam als molekulare Maschinen mit mehreren Bestandteilen. Schließlich spielt die Umgebung wie zum Beispiel die wässrige Lösung, in der sich die Reaktionen abspielen, eine wesentliche Rolle – und schon sind nicht nur einige tausend, sondern Millionen Atome beteiligt.

Die genaue Funktionsweise dieser Maschinen lässt sich mit einer einzelnen Methodik praktisch nicht aufklären. Wer die dynamischen Prozesse im Reagenzglas verfolgt, kann herausfinden, wie sich die Konzentration der Reaktionsteilnehmer mit der Zeit verändert. Wer misst, wie die Atome eines Proteins gegeneinander schwingen, kann aus der Veränderung des Schwingungsmusters erschließen, welche Bereiche des Moleküls sich verändern. Man kann es kristallisieren – was nur bei kleinen Proteinen gelingt – und das Beugungsmuster der Röntgenstrahlen analysieren; man kann es einfrieren und mit dem Elektronenmikroskop untersuchen. Die beiden zuletzt genannten experimentellen Verfahren liefern im günstigen Fall ein sehr genaues Bild von der räumlichen Gestalt (»Konformation«) des Moleküls, aber eben nur eine Momentaufnahme. Man kann also gewissermaßen studieren, was die molekulare Maschine herstellt und wie sie zu speziellen Zeitpunkten aussieht. Daraus zu erschließen, wie sie funktioniert, ist schon bei einer gewöhnlichen Maschine eine Herausforderung.

Genau das ist uns nun bei etlichen molekularen Maschinen gelungen – mit Hilfe der Computersimulation. Indem wir in engem Zusammenspiel mit den experimentellen Methoden den ganzen dynamischen Vorgang im Computer

## AUF EINEN BLICK

### SUPERCOMPUTER IN DER BIOLOGIE

- 1 Proteine im Inneren einer Körperzelle wirken in aller Regel zu mehreren als **molekulare Maschinen** zusammen.
- 2 Ein molekularbiologischer Prozess umfasst im Allgemeinen **mehrere Millionen Atome**. Um ihn detailliert zu erfassen, muss man **Milliarden einzelner Zeitschritte** berechnen. Das erfordert einen Höchstleistungsrechner.
- 3 Im Zusammenspiel von Experiment und Simulation gelingt es, neben vielen anderen Vorgängen die **Wirkungsweise eines Antibiotikums**, den **Infektionsmechanismus von HIV** und die **Fotosynthese bei Purpurbakterien** aufzuklären.

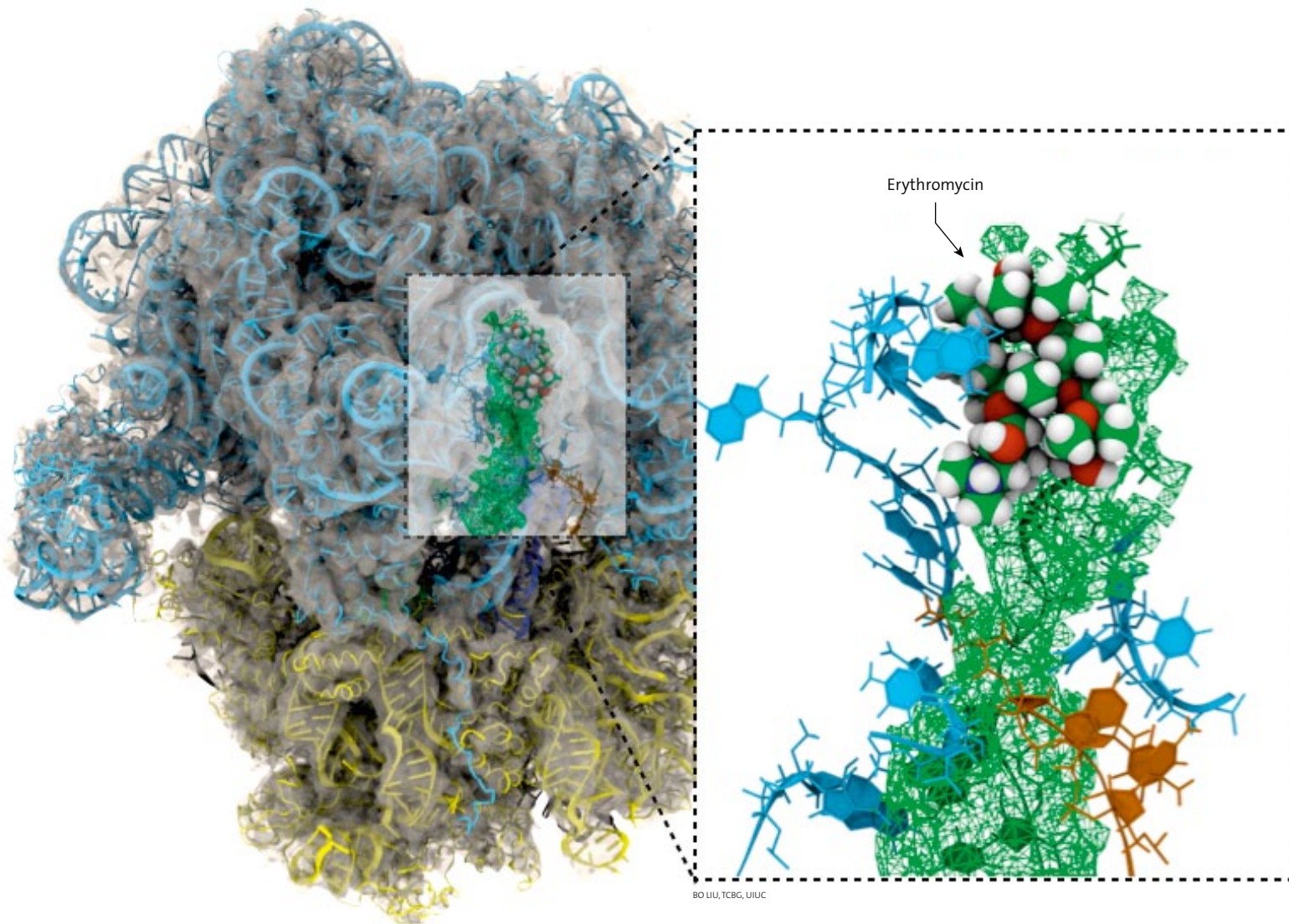


nachbilden, gewinnen wir gleichsam ein Video, das die einzelnen Schnappschüsse zu einem Ganzen verbindet. Unsere Arbeitsgruppe am Beckman Institute der University of Illinois in Urbana-Champaign hat in langjähriger Arbeit Softwarepakete entwickelt, die insbesondere das Verhalten von Systemen aus mehreren Millionen Atomen berechnen können. Über einige der Ergebnisse soll hier berichtet werden.

### Angriff auf die Proteinfabriken

Eines der bedeutendsten Mittel zur Bekämpfung bakterieller Infektionen ist das Antibiotikum Erythromycin. Es erwies sich als so erfolgreich, dass die Weltgesundheitsorganisation es in ihrer Liste der unentbehrlichen Arzneimittel aufführt. Bekannt geworden ist es als Alternative für Patienten mit Penicillin-Unverträglichkeit. Es handelt sich um den ältesten Vertreter einer Klasse von Medikamenten (der »Makrolide«),

Mittels Computersimulation lässt sich ein bakterielles Ribosom bis auf die Position jedes einzelnen Atoms genau bestimmen. Diese molekulare Maschine besteht aus einer großen (hellblau) und einer kleinen (gelb) Untereinheit, die ihrerseits aus RNA und Proteinen zusammengesetzt sind. In der Mitte sehr klein und dunkelblau ist die Boten-RNA (m-RNA) zu sehen, die dem Ribosom als Vorlage für die zu synthetisierende Aminosäurekette dient. Die Ausschnittvergrößerung zeigt verschiedene Stellen, die an der Proteinsynthese beteiligt sind (grün und braun), zum Teil mit angebundener Transfer-RNA. Das Antibiotikum Erythromycin (im Kalottenmodell dargestellt) bindet sich an die im Ribosom steckende RNA und blockiert dadurch die ganze Maschine.





NATIONAL CENTER FOR SUPERCOMPUTING APPLICATIONS (NCSA) AND THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS

welche die Ribosomen der Bakterien angreifen – das heißt jene Maschinen blockieren, die genetische Bauanleitungen in Gestalt der RNA in Proteine umsetzen. Da sich bakterielle Ribosomen in ihrer Struktur von den menschlichen unterscheiden, vergiften Makrolide gezielt die Bakterien, nicht aber den Patienten.

Etwa die Hälfte aller Antibiotika zählt zu dieser Klasse. Obwohl man ihre antibiotische Wirkung seit über 50 Jahren kennt, ist deren genaue molekulare Wirkweise bis heute unklar. Genau darüber möchte man dringend mehr wissen; denn wie alle Antibiotika drohen Erythromycin und seine Verwandten an Wirksamkeit zu verlieren, weil die Bakterien Resistenzen gegen sie entwickeln.

Im Zusammenspiel von Experiment und Computersimulation konnten wir zeigen, dass das andockende Erythromycin die Position entscheidender Bestandteile (»Struktur motive«) im bakteriellen Ribosom verändert, und zwar im Ausgangstunnel für die neu entstehenden Proteine (Bild S. 87). Damit haben wir zugleich einen neuen Angriffspunkt für Medikamente (ein Drug Target) identifiziert. In diesem Fall handelt es sich um eine Stelle an der RNA im bakteriellen Ribosom, an die ein geeignet geformtes Medikamentenmolekül andocken und damit den ganzen Molekülkomplex funktionsunfähig machen könnte.

Allgemein besteht der erste Schritt in der Medikamentenentwicklung darin, ein solches Drug Target zu finden. Das kann neben einem bakteriellen auch ein körpereigenes Protein sein, und der zu entwickelnde Wirkstoff kann das Protein in seiner Wirkung hemmen oder verstärken. Doch nur wenige Proteine kommen als Targets für Medikamente in Frage, und ihre Eignung beeinflusst maßgeblich den Aufwand und Erfolg der anschließenden Arbeitsschritte. Hier können Computersimulationen das bisherige, überaus zeit- und kostenintensive Durchprobieren der verschiedensten Stoffe durch ein gezieltes Vorgehen ersetzen.

### Atom für Atom die Bewegung berechnen

Wie klärt man mittels Computersimulation einen solchen dynamischen Prozess auf? Ein Programm vollzieht die Bewegung jedes einzelnen Atoms in dem Ensemble von aufeinander einwirkenden Molekülen nach. Dadurch kann man den komplexen molekularen Ablauf in allen Einzelheiten nachverfolgen und insbesondere studieren, was geschehen wür-

de, wenn man zum Beispiel in einem Antibiotikum eine kleine Atomgruppe durch eine andere ersetzt.

In diesem Fall gilt es, zunächst eine Konformation des bakteriellen Ribosoms – und des Antibiotikums – zu finden, die den Verhältnissen im natürlichen Milieu möglichst nahekommt. Dabei nehmen wir die oben genannten Momentaufnahmen zu Hilfe.

Bereits an deren Erstellung ist der Computer maßgeblich beteiligt. Das Elektronenmikroskop liefert ein Bild der Elektronendichte: für jeden Ort die Wahrscheinlichkeit, mit der dort ein Elektron zu finden ist. Allerdings ist das Bild sehr unscharf, da das Gerät bei dieser Aufgabe an seine technischen Grenzen stößt. Nur indem man Mittelwerte aus sehr vielen Aufnahmen bildet, kommt man zu brauchbaren Daten. Ein von unserer Arbeitsgruppe entwickeltes Programm namens MDFF (molecular dynamics flexible fitting) findet diejenige Anordnung der Atome, die unter Beachtung der Gesetze der Chemie und weiteren Wissens am besten zu den Daten passt.

Das Grundprinzip der Simulation ist geradezu irreführend einfach. Jedes Atom übt auf jedes andere eine Kraft aus. Also berechnet man für jedes einzelne Atom die Summe der Kräfte und damit – nach dem newtonschen Gesetz »Kraft ist Masse mal Beschleunigung« – die Beschleunigung, der es ausgesetzt ist. Beschleunigung ist Änderung der Geschwindigkeit; wenn sie einen gewissen Zeitraum lang einwirkt, hat sich die Geschwindigkeit des Atoms entsprechend verändert. Geschwindigkeit ist Änderung des Orts; damit kann man ausrechnen, wohin sich das Atom während dieses Zeitraums bewegt hat. Kennt man also die Orte und Geschwindigkeiten aller Atome zu einem gewissen Anfangszeitpunkt, so kann man diese Größen zu einem geringfügig späteren Zeitpunkt berechnen, daraus zu einem noch späteren Zeitpunkt und so weiter, bis nach hinreichend vielen Zeitschritten eine vollständige Wiedergabe des ganzen dynamischen Prozesses vorliegt und zum Beispiel als Film wiedergegeben werden kann.

In der Praxis ist die Aufgabe allerdings alles andere als einfach. Erstens unterstellt das Prinzip, Atome seien punktförmig, so dass die Bewegung eines Atoms zu jedem Zeitpunkt durch drei Orts- und drei Geschwindigkeitskoordinaten vollständig beschrieben wird. Wir betrachten also gewissermaßen nur die Atomkerne und fragen nicht, wo und wie schnell die Elektronen sind – eine Frage, die ohnehin nur über Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit Hilfe der Quantenmechanik





Der Supercomputer »Blue Waters« am National Center for Supercomputing Applications (NCSA) der University of Illinois wurde Ende März 2013 in Betrieb genommen, füllt eine Halle von 2000 Quadratmetern und enthält 22 640 »Rechenknoten« zu je 32 Einzelprozessoren sowie 4224 »Grafik-knoten«, deren jeweils 16 Einzelrechner durch ebenso viele Grafikprozessoren unterstützt werden.

zu beantworten wäre. Das ist im Prinzip möglich; allerdings sind quantenmechanische Rechnungen so aufwändig, dass selbst moderne Supercomputer nur Ensembles im Bereich von hunderten Atomen bewältigen.

Stattdessen beschreiben wir die Effekte der Elektronenhülle durch »klassische«, das heißt nicht quantenmechanische Näherungen. So geben wir zum Beispiel die Tatsache, dass sich im Wassermolekül die Elektronen bevorzugt in der Nähe des Sauerstoffatoms aufhalten, dadurch wieder, dass wir dem Sauerstoffatom die Ladung  $-0,82 e$  zuschreiben ( $e$  ist eine – positive – Elementarladung) und jedem der beiden Wasserstoffatome die Ladung  $0,41 e$ . Das ist eine von mehreren Beschreibungsmöglichkeiten, das einfache Punktladungsmodell (simple point charge, SPC). Allgemein bekommt jedes Atom in einem Molekül eine solche Ladung zugeschrieben, und zwar stets weniger als eine Elementarladung.

Durch die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Atomkernen haben je zwei aneinander gebundene Atomkerne einen »Lieblingsabstand« voneinander: den mit minimaler Energie. Wir modellieren das, indem wir zwischen die Atome eine gedachte Schraubenfeder (einen »harmonischen Oszillator«) setzen, deren Ruhelänge gleich dem Lieblingsabstand ist. Für geringe Auslenkungen von dieser Gleichgewichtslage gibt der harmonische Oszillator – mit der korrekt gewählten Federkonstante – den allergrößten Anteil der wirksamen Kräfte korrekt wieder. Mit ähnlichen Schraubenfedern beschreiben wir die Tatsache, dass gewisse Winkel zwischen Bindungen minimale Energie haben und die Moleküle daher diese Winkel bevorzugt einnehmen.

Zahlreiche Arbeitsgruppen haben solche klassischen Näherungen (»Kraftfelder«) erarbeitet und vor allem auf schnelle Berechenbarkeit optimiert; denn die Bestimmung der Kräfte nimmt den größten Teil der Rechenzeit in Anspruch. Heute stehen etliche Kraftfelder für jedermann in

Datenbanken zur Verfügung. Wenn allerdings eine Bindung aufbricht oder neu geknüpft wird oder ein Molekül ionisiert wird – ein Elektron verliert oder hinzugewinnt –, bricht die klassische Näherung zusammen, und man muss quantenmechanisch rechnen.

Zweitens ist es nicht einfach, von den möglichen Konformationen eines Proteins ein repräsentatives Bild zu gewinnen. Echte wie simulierte Proteine streben stets nach einem Zustand minimaler Energie, so wie eine Kugel, die man in einen Eierbecher wirft, automatisch an dessen tiefsten Punkt rollt. Leider läuft unsere Kugel, um im Bild zu bleiben, in einer

### Eine der schwierigsten Aufgaben bei der Simulation ist es, alle relevanten Proteinkonformationen zu erfassen

Landschaft mit vielen Kratern. Ist sie einmal in einem solchen Energietal gelandet, erfordert es zuweilen viel Energie und Zeit, wieder herauszukommen. Um der Realität hinreichend nahezukommen, müssen die simulierten Proteine möglichst alle relevanten Konfigurationen der echten annehmen, und zwar mit annähernd den richtigen Wahrscheinlichkeiten. Dieses Ziel zählt zu den schwierigsten, die bei einer Simulation zu erreichen sind.

Drittens führt die Berechnung des Systemzustands unweigerlich einen Fehler ein, dessen Folgen es in Grenzen zu halten gilt. Der Computer berechnet den Systemzustand nicht für jede Zeit, sondern nur für bestimmte Zeitpunkte, die durch ein gewisses Zeitintervall (die »Schrittweite«) voneinander getrennt sind. Dabei tut er so, als ob die Beschleunigungen während dieser Zeit unverändert bleiben würden – was nicht der Fall ist, denn mit den Positionen der Atome verändern sich auch die Kräfte zwischen ihnen. Man muss also darauf achten, dass der Fehler, der dadurch in die Rechnung gerät (der »Diskretisierungsfehler«), sich in erträglichen Grenzen hält. Je kleiner die Schrittweite, desto kleiner der Diskretisierungsfehler; andererseits ist der Rechenaufwand proportional der Gesamtzahl der Zeitschritte. Daher kommt es entscheidend auf die richtige Wahl dieses Werts an.



Jedenfalls muss die Schrittweite so klein sein, dass sie den am schnellsten veränderlichen Vorgang des Prozesses noch adäquat erfasst. Für die von uns studierten Vorgänge ist das die Streckschwingung einer OH-Bindung. Überall, wo ein Wasserstoff- an ein Sauerstoffatom gebunden ist, zum Beispiel im Wassermolekül  $H_2O$ , schwingen die beiden Atome gegeneinander mit einer Frequenz von ungefähr 100 Terahertz ( $10^{14}$ -mal pro Sekunde). Das erzwingt eine Schrittweite in der Größenordnung von  $10^{-15}$  Sekunden.

Biochemische Prozesse laufen zwar manchmal sehr schnell ab. Innerhalb einer Mikrosekunde ( $10^{-6}$  Sekunden) kann schon Wesentliches passieren: Ein kleines Protein, das als ausgestreckte Aminosäurekette aus dem Ribosom kommt, faltet sich zu seiner biologisch aktiven Struktur, ein Protein ändert seine Konformation beim Kontakt mit seinem Substrat, ein Molekül durchdringt eine Zellmembran. Aber selbst ein solch rascher Prozess erfordert eine Milliarde ( $10^9$ ) Zeitschritte!

Obendrein gibt es für jeden einzelnen Zeitschritt sehr viel zu rechnen. Das Simulationssystem für das bakterielle Ribosom umfasst ungefähr drei Millionen Atome und ist damit eines unserer kleineren. Wie im natürlichen Vorbild entfällt der größte Teil, fast 2,7 Millionen, auf Wasser. Die 56 Proteine des Ribosoms tragen 102 531 Atome bei, die RNA 147 372, ein paar tausend Natrium-, Chlor- und Magnesiumionen sowie

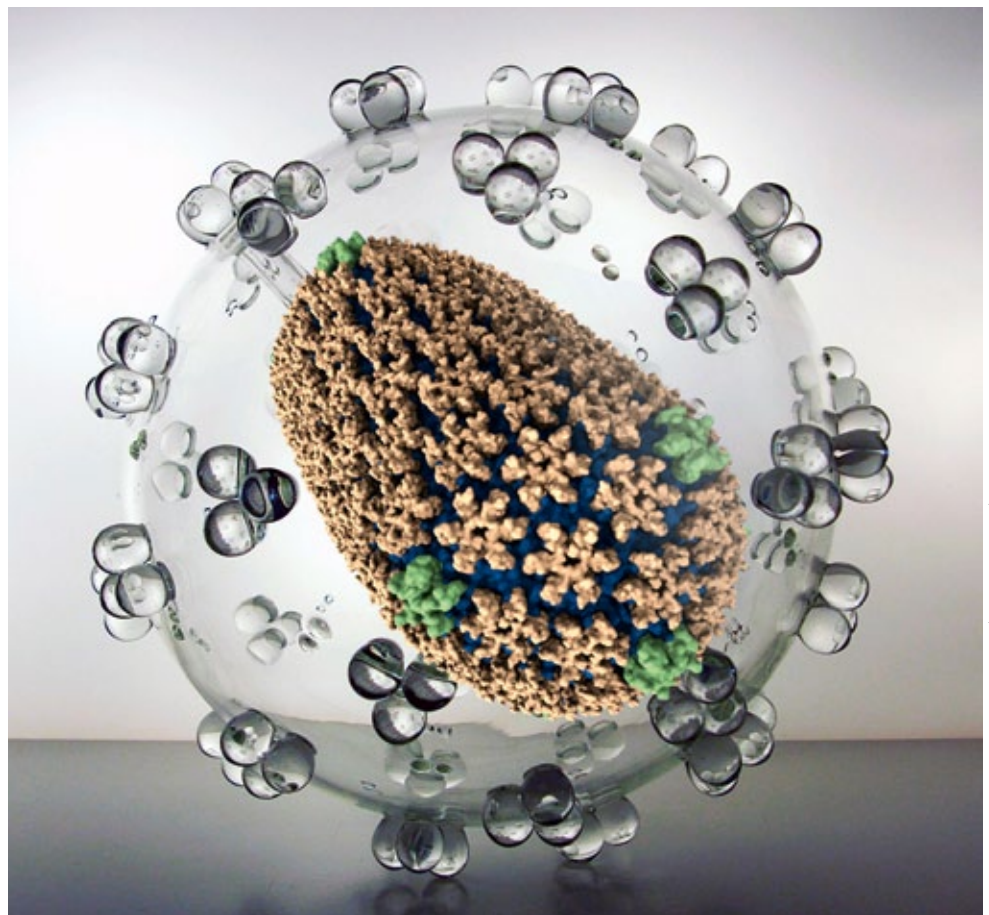
ein einziges Zinkion sind auch dabei. Das alles entscheidende Erythromycin fällt mit seinen 119 Atomen mengenmäßig gar nicht ins Gewicht.

Auch ein Supercomputer wäre hoffnungslos überfordert, wenn er alle Kräfte zwischen je zwei dieser Atome bestimmen sollte. Da diese Kräfte mit zunehmendem Abstand rasch absinken, kann man sich für größere Entfernungen mit Näherungen begnügen und die Kräfte mit geringerer räumlicher Auflösung berechnen.

Eine Simulationssoftware muss nicht nur die realen Prozesse hinreichend genau abbilden, sondern die unzähligen Berechnungen so gestalten, dass die vielen Einzelrechner (»Prozessoren«), die im Inneren eines Supercomputers parallel arbeiten, möglichst vollständig ausgelastet sind. Vor allem dürfen sie mit dem Warten auf Daten von anderen nicht allzu viel Zeit verschwenden. Darüber hinaus kommt es darauf an, die Grafikprozessoren (GPUs), die neben den Hauptprozessoren (CPUs) in großer Anzahl in die Supercomputer eingebaut sind, ausreichend zu beschäftigen. Ein Grafikprozessor ist in der Tat ein Chip von der Art, wie er in jedem PC den Bildschirm ansteuert, wird aber in einem Supercomputer für spezielle Rechenarbeiten zweckentfremdet, die er schneller erledigt als ein Hauptprozessor.

All diese Forderungen zusammen machen das Entwickeln eines Simulationsprogramms zu einer sehr komplexen An-

Die Hülle (das »Kapsid«) des Aidsvirus HIV, die das genetische Material im Inneren des Virus schützt, ist aus sternförmigen Komplexen zusammengesetzt, die ihrerseits aus sechs (braun) beziehungsweise fünf Proteinen (grün) bestehen. Umgeben ist das Kapsid von der Lipidmembran des Virus (hier als Glaskuppel dargestellt; die Dreifachtröpfchen sind Glykoproteine). Die zerklüftete Oberfläche des Kapsids bietet – abhängig von ihrem rasch veränderlichen Bewegungszustand – Angriffspunkte für kleine Moleküle und damit für noch zu entwickelnde Medikamente.



HIV: JUAN R. PERILLA, TERC, UIUC, GLASSKUPFUR; LUIKEFERRAM (WWW.LUIKEFERRAM.COM)

gelegenheit. Heute arbeiten praktisch alle Forscher mit einer Hand voll von Softwarepaketen, die über die letzten 40 Jahre in weltweiter Zusammenarbeit zu ihrer heutigen Größe herangewachsen sind. Die verbreitetsten sind

- GROMACS (GRoningen MACHine for Chemical Simulations), ursprünglich von Herman J. C. Berendsen von der Universität Groningen (Niederlande) entwickelt;
- CHARMM (Chemistry at HARvard Molecular Mechanics) von Martin Karplus von der Harvard University;
- AMBER (Assisted Model Building with Energy Refinement) von Peter Kollman von der University of California in San Francisco sowie
- NAMD (NANoscale Molecular Dynamics program), das an unserem Institut entwickelt wurde.

Jedes von ihnen hat seine Stärken in speziellen Anwendungen. So ist unser NAMD unter anderem auf sehr große Systeme spezialisiert.

Nach einer Milliarde Zeitschritte hat ein Simulationsprogramm ebenso viele Datensätze zu jeweils 18 Millionen Zahlen produziert: die Orts- und Geschwindigkeitskoordinaten von drei Millionen Atomen. Damit kann in dieser Form kein Mensch etwas anfangen. Vielmehr muss der Computer diese Daten zu Bildern oder auch Videos verarbeiten, auf denen der Betrachter die wesentlichen Strukturen erkennen kann.

Es genügt nicht, für jedes Atom ein farbiges Pixel an der richtigen Stelle auf den Bildschirm zu setzen; dann sieht man das Molekül vor lauter Atomen nicht. Vielmehr müssen Molekülstrukturen wie die berühmte Alpha-Helix, ein schraubenförmig verwundener Abschnitt der Aminosäurekette eines Proteins, als Ganzes sichtbar gemacht werden.

Neben die Simulation selbst tritt somit die Visualisierung als eigenständige Aufgabe. Auch hierfür gibt es verbreitete Programmpakete; die bekanntesten sind unser VMD (Visual Molecular Dynamics) und PyMOL, das von Warren L. DeLano entwickelt wurde und jetzt von der Firma Schrödinger LLC betreut wird.

Damit arbeitet der Supercomputer gleichsam wie ein klassisches Mikroskop: Die Simulationssoftware stellt wie die erste Linse (das Objektiv) ein Bild des unzugänglichen Objekts bereit; aber um es mit Gewinn zu betrachten, braucht man eine zweite Linse: das Okular beziehungsweise die Visualisierungssoftware.

Den Großteil unserer Rechnungen haben wir auf dem Computer »Blue Waters« am National Center for Supercomputing Applications (NCSA) der University of Illinois durchgeführt (Bild S. 88/89 oben). Das Gerät vollführt bei Vollauslastung 13,3 Petaflops (Billiarden Rechenoperationen pro Sekunde). Damit wäre es in der Rangliste der schnellsten Computer der Welt ungefähr auf Platz 4 einzuordnen und leistet deutlich mehr als die beiden größten deutschen Supercomputer JUQUEEN (5,9 Petaflops) und SuperMUC (2,9 Petaflops) zusammen.

Für unsere Ribosomensimulation konnten wir allerdings nur ein Fünfhundertstel der Gesamtkapazität nutzen. Mehr Prozessoren einzusetzen hätte nichts gebracht, weil die Kommunikation unter den Einzelrechnern überhandgenommen hätte. Damit schafft die Maschine an einem Tag nicht mehr als 0,01 Mikrosekunden simulierter Zeit. Ein Durchlauf unseres Programms, der 0,9 Mikrosekunden umfasst, dauert also drei Monate.

## Kampf gegen HIV

Das Problem der Medikamentenresistenz stellt sich verschärft bei dem Aidserreger HIV (humanes Immunschwächevirus). Auf Grund seiner hohen Mutationsrate ist das Virus sehr anpassungsfähig und entwickelt deshalb schnell eine Resistenz gegen Medikamente aller Art. Daher pflegt man Aidspatienten meistens eine Kombination mehrerer Medikamente zu verabreichen, in der Hoffnung, dass das Virus wenigstens gegen eines von ihnen nicht resistent wird.

In einer Zusammenarbeit mit experimentellen Forschern von der University of Pittsburgh ist es uns gelungen, die vollständige Hülle (das Kapsid) des HIV für eine Zeitdauer von 1,5 Mikrosekunden zu simulieren. Das Kapsid besteht aus über 1300 einzelnen Proteinen mit insgesamt etwa vier Millionen Atomen. Außerdem haben wir entsprechend den Ver-

hältnissen im menschlichen Körper das Virus »in Kochsalzlösung getaucht«, das heißt zu dem simulierten Kapsid noch Wassermoleküle sowie Natrium- und Chlorionen in einer Konzentration

## An der Oberfläche der Virushülle öffnen sich viele Nischen – Angriffspunkte für Medikamente

von 0,1 Prozent gegeben. Insgesamt umfasst das Simulationssystem 64 Millionen Atome und gehört damit zu den größten weltweit. Diesmal konnten wir bis zu 3500 Rechenknoten einschließlich der Grafikprozessoren und damit 80 Prozent der GPU-Kapazität von »Blue Waters« nutzen.

HIV ist ein Retrovirus, das genetisches Material in eine Körperzelle einschleust, diese zur Vermehrung missbraucht und anschließend zerstört. Opfer sind weiße Blutkörperchen (genauer: Lymphozyten) vom Typ CD4-T, auch bekannt als T-Helferzellen. Für das Virus und seine Fortpflanzung ist das Kapsid von entscheidender Bedeutung – und für seine Bekämpfung daher eine interessante Schwachstelle. Nach dem Eindringen in sein Opfer schützt die Hülle des Virus das in seinem Inneren befindliche genetische Material auf dem Weg zum Zellkern. Erst dort, wo es sein zerstörerisches Werk vollbringen soll, öffnet sie sich. Die heutigen HIV-Medikamente versuchen, das Virus bereits an der äußeren Membran der T-Helferzelle aufzuhalten.

Auf der Suche nach neuen Drug Targets haben wir mit Hilfe von Simulationen ein atomares Strukturmodell des Kapsids entwickelt (Bild links). Es besteht aus 186 Hexameren und 12 Pentameren (sternförmigen Komplexen aus sechs beziehungsweise fünf Proteinen). Die Computersimulation veranschaulicht das dynamische Zusammenspiel der Vielzahl an Proteinen und zeigt, dass sich in der Oberfläche des

Kapsids viele Nischen und Höhlen öffnen und wieder schließen. Dort könnten kleine Moleküle angreifen und die Anlagerung der Hülle an die T-Helferzellen verhindern oder ihre Öffnung innerhalb der Zelle blockieren.

Dass die HIV-Hülle ein viel versprechendes Drug Target ist, zeigt sich an Affen. Diese sind immun gegen HIV, da ihre Körperzellen in ihrem Inneren das Virus auf dem Weg zum Zellkern behindern.

In der Tat hat der Pharmakonzern Pfizer einen Wirkstoff entwickelt, der sehr effektiv das Kapsid angreift. Allerdings ist er als Medikament unbrauchbar, denn er ist so giftig, dass er den Patienten gleich mit umbringt. Gleichwohl können wir den Einfluss des Wirkstoffs auf die Struktur und Dynamik der Hülle unter dem Computermikroskop analysieren, um seine Funktionsweise zu verstehen und damit Ansatzpunkte für einen ungiftigen Wirkstoff zu finden. Damit eröffnen Computersimulationen die Möglichkeit, »sehenden Auges« die HIV-Hülle mit Medikamenten anzugreifen.

### Aufklärung der Fotosynthese

Die grünen Pflanzen und zahlreiche Bakterienarten beziehen ihre Energie, indem sie das Sonnenlicht in einem mehrstufigen Prozess in chemische Energie umwandeln. Am besten lässt sich die Fotosynthese in ihrer Urform studieren, die unter anderem die Purpurbakterien praktizieren.

Diese verfügen über eine Ausstülpung in ihrer Zellmembran, das so genannte Chromatophor. In dessen Oberfläche stecken mehrere Proteine, darunter als erste Stufe der Energiegewinnung die Antennen oder Lichtsammelkomplexe (light harvesting complexes, LH). Die häufigsten Varianten heißen LH2 und LH1, wobei LH1 einen Proteinkomplex mit dem Reaktionszentrum bildet. Die Antennen absorbieren das Licht und leiten die Energie in Form elektronischer Anregungen von Chlorophyll an das Reaktionszentrum weiter; dieser so genannte Förster-Prozess kann nur stattfinden, wenn die Beteiligten in sehr geringem Abstand (im Bereich zwischen einem und zwei Nanometer) zueinander sitzen. Das Reaktionszentrum wiederum befördert mit Hilfe der empfangenen Energie Elektronen mit Hilfe mobiler »Frachtschiff-Moleküle«, der Chinone, zum Cytochrom-BC1-Komplex. Dieser erzeugt zwischen der inneren und der äußeren Membran des Chromatophors einen Protonenüberschuss. Ein spezielles Enzym, die ATP-Synthase, fängt die Protonen ab, die auf Grund der Ladungsdifferenz ins Zellinnere zurückstreben, und nutzt die darin enthaltene Energie zur Herstellung von ATP, dem Energieträger der Zelle.

Unsere Arbeitsgruppe befasst sich seit mehr als vier Jahrzehnten in Zusammenarbeit mit vielen Experimentatoren damit, Struktur und Funktionsweise des Chromatophors aufzuklären. Das am genauesten untersuchte System ist das Purpurbakterium *Rhodobacter sphaeroides*, weil dazu die meisten experimentellen Daten vorliegen; aber wir haben die Fotosynthese in vielen anderen Spezies untersucht, darunter auch Zyanobakterien (Blualgen) und Grünpflanzen. Von den ersten Simulationen 1978, in denen wir den Einfluss magne-

tischer Felder auf die primären fotochemischen Reaktionen zur Messung funktionskritischer Eigenschaften ausnutzten, wuchsen unsere Systeme immer weiter an. Im Jahr 1996 konnten wir die Struktur des Lichtsammelkomplexes LH2 bestimmen; jüngst haben wir einen kompletten repräsentativen Ausschnitt (einen »Patch«) des Chromatophors simuliert (Bild rechts). Die über 23 Millionen Atome verteilen sich auf 39 LH2-Komplexe, sieben LH1-Komplexe, 150 Chinone, fast 15 000 Membranlipide, etwa sieben Millionen Wassermoleküle und an die 2500 Ionen.

Die Simulation umfasst einen Zeitraum von 150 Nanosekunden und liefert bereits einen ersten Einblick in das Zusammenwirken der einzelnen Untereinheiten für den Energietransfer. Zurzeit arbeiten wir daran, die Ergebnisse der letzten vier Jahrzehnte in einer Simulation des Gesamtkomplexes zusammenzuführen. Dadurch erwarten wir uns ein Gesamtbild der biologischen Maschine zur Energieumwandlung, deren viele Einzelkomponenten wie Zahnräder in einem Uhrwerk ineinandergreifen. Indem wir analysieren, wie sich die elektrostatischen Potenziale unter äußeren Einflüssen verändern, gewinnen wir ein besseres Verständnis dafür, wie effizient das Chromatophor auf Veränderungen seiner Umwelt und insbesondere auf schädigende Umwelteinflüsse reagiert.

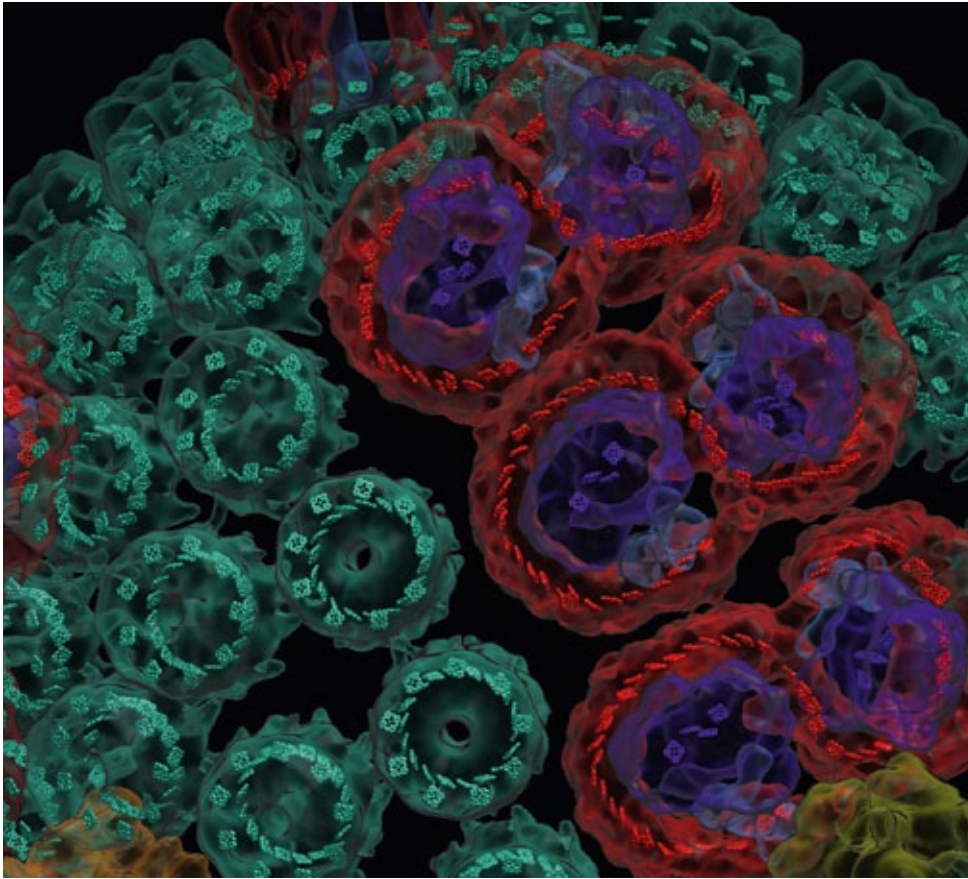
Wenn wir erst das natürliche Vorbild mit solcher Genauigkeit kennen, können wir auch daran denken, künstliche Sonnenlicht erntende Systeme zu bauen und zu optimieren und so die Erschließung nachhaltiger Energiequellen voranzutreiben.

### Neue Energieressourcen

Heute schon versorgt uns die natürliche Fotosynthese mit reichlich Energie, aber die ist nicht immer leicht verfügbar. Molekularbiologische Simulationen helfen auch hier, ein Problem von großer energiepolitischer Bedeutung zu lösen: die Versorgung mit Biokraftstoffen. Bisher gewinnt man den Alkohol, der dem Benzin zugesetzt wird, überwiegend aus essbaren Rohstoffen wie Zuckerrohr, Mais, Getreide oder Rapsöl. Damit tritt der Kraftstoffbedarf in unmittelbare Konkurrenz zum Nahrungsbedarf der Menschen, was in Form von Lebensmittelknappheit und steigenden Preisen überaus problematische Folgen hat. Daher suchen Forscher nach Biokraftstoffen der »zweiten Generation«, die ausschließlich aus organischen Reststoffen gewonnen werden. So hat die Fluggesellschaft British Airways den Vorsatz gefasst, bis Ende 2015 die gesamte Flotte mit Treibstoffen aus organischem Abfall zu betreiben.

Eigentlich bestehen Holz, Stroh und andere pflanzliche Reste aus denselben Zuckern wie die oben genannten Rohstoffe, die seit jeher zu Alkohol vergoren werden; nur sind diese Einfachzucker zu langen Kohlenhydratketten polymerisiert. Diese müssen erst aufgespalten werden, bevor die Bierhefe ihr nützliches Werk verrichten kann. Auch dafür finden sich Enzyme in der Natur (Bild S. 94 unten); so können zum Beispiel Termiten Holz verdauen. Für industrielle Zwecke muss allerdings diese Aufspaltung erheblich schneller





Das Chromatophor (oben das Gesamtbild, links ein Detailausschnitt) ist das molekulare Kraftwerk der Purpurbakterien, das Sonnenlicht erntet und in chemische Energie in Form von ATP umwandelt. Die Energie wandert nacheinander über die molekularen Maschinen LH2 (grün), LH1 (rot) im Komplex mit dem Reaktionszentrum (blau), den Cytochrom-BC1-Komplex (violett) und die ATP-Synthase (orange).

vonstattengehen. Hier hilft der Computer, die molekularen Vorgänge zu verstehen und zu optimieren.

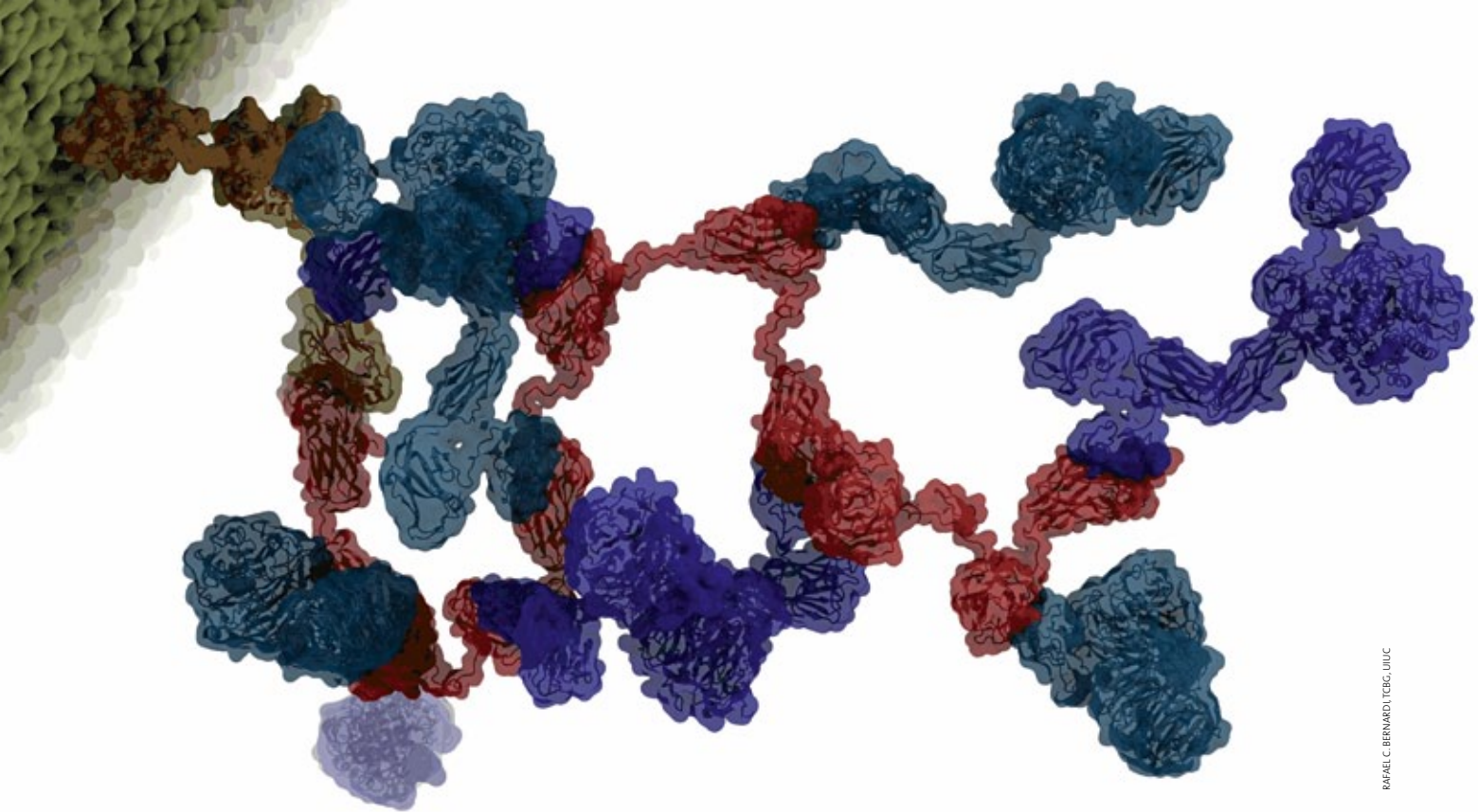
Es stellt sich heraus, dass in der Regel kein einzelnes Enzym eine lange Kohlenhydratkette in ihre monomeren Bestandteile zerlegen kann – jedenfalls nicht in kurzer Zeit. Vielmehr sind an solchen Prozessen zahlreiche Enzyme beteiligt, die jedes darauf spezialisiert sind, ein bestimmtes Strukturmotiv des Kohlenhydratpolymers zu erkennen und aufzuspalten. Darüber hinaus unterstützen sich verschiedene Enzyme gegenseitig: Zwei unterschiedliche Enzyme, die sich zu einem Komplex zusammenlagern, bauen ein Polymer schneller ab, als wenn beide zugleich, aber unabhängig voneinander arbeiten. Dies ergibt sich aus der Analyse mehrerer Experimente.

Diese Synergieeffekte verstärken sich noch bei mehr als zwei Enzymen. Organismen wie das Bakterium *Clostridium thermocellum* zerlegen Zellulose durch einen Enzymverbund, ein so genanntes Cellulosom. In der Natur kommen Cellulosome aus bis zu 200 Enzymen vor, und Organismen mit derartig gekoppelten Werkzeugen können das Polymer bis zu 50-mal so schnell abbauen wie andere mit frei beweglichen Einzelenzymen. Nach einer aktuellen, noch unbestätigten Hypothese erledigt jedes der aufgereihten Enzyme seine Aufgabe an dem Polymer und reicht es daraufhin an den Nachfolger in der Reihe weiter, ähnlich wie bei einer Produktionslinie.

In einer unserer laufenden Arbeiten simulieren wir ein spezielles Cellulosom. An ein Grundgerüst, seinerseits ein Protein mit elf Domänen, sind neun Enzyme angebunden (Bild S. 94 oben). Eine Domäne (domain) im Cellulosom lässt sich mit einem »Wollknäuel« in einem langen Faden vergleichen, ist also ein Bereich eines Proteins, in dem die Aminosäuren kugelförmig dicht gepackt sind, während sie zwischen den Domänen als einfache Kette vorliegen. Insgesamt enthält das Cellulosom etwa 40 Domänen. In diesem Fall umfasste das Simulationssystem 13 Millionen Atome, und 16 000 Computerkerne brauchten einen ganzen Tag, um die winzige Zeitspanne von 14 Nanosekunden ( $10^{-9}$  Sekunden) durchzurechnen.

In enger Zusammenarbeit mit Experimentalphysikern der Ludwig-Maximilians-Universität in München konnten wir den Zusammenhalt der Bausteine des Cellulosoms aufklären. Es handelt sich um eine der stärksten nicht kovalenten Bindungen, die bisher in der Natur beobachtet wurden. Ein Fünftel der Bindungskraft würde bereits eine einzelne Muskelzelle zerreißen.

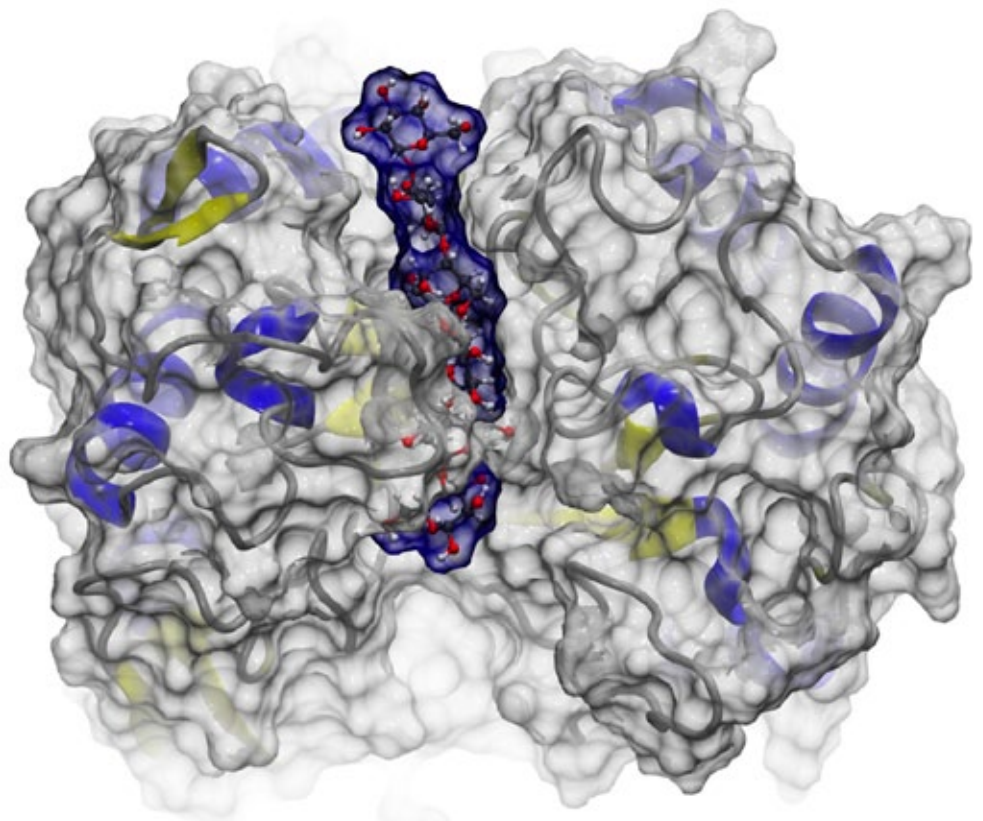
Die Computersimulationen visualisieren und erklären anschaulich den durch kraftmikroskopische Experimente beobachteten Effekt, dass sich die Wechselwirkung zwischen den Bausteinen unter Belastung verstärkt. So wie sich beim Auseinanderziehen gefalteter Hände die Kraft zwischen den Fingern zunächst erhöht, weil die Knöchel der Bewegung im



RAFAEL C. BERNARDI, TCBG, UIUC

Das Cellulosom ist eine molekulare Fabrik, die Kohlenhydratpolymere wie zum Beispiel Holz und Stroh in Kohlenhydratmonomere (Zucker) zerlegt. Sind die auf den Abbau von unterschiedlichen Kohlenhydratketten spezialisierten Enzyme (blau) über ein Proteingrundgerüst (rot) miteinander verbunden, spalten sie die Polymere schneller als allein. Hier gezeigt ist ein solcher Enzymverbund: ein Cellulosom des Bakteriums *Clostridium thermocellum*, das mit der bakteriellen Zellwand (grün) über die so genannte SdbA-Domäne (orange) verbunden ist.

Eine Kohlenhydratkette (blaue transparente Oberfläche mit den Atomen im Kugel-Stab-Modell) hat an die katalytisch aktive Bindungstasche eines Enzyms aus der Familie der Glykosidasen andockt.



RAFAEL C. BERNARDI, TCBG, UIUC; BERNARDI, R.C. ET AL.: MOLECULAR DYNAMICS STUDY OF ENHANCED MANSB ENZYMATIC ACTIVITY. I N: BIOTECHNOLOGY FOR BIOFUELS 7, 2014, FIG. 1A ([HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.0/LEGALCODE](http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode))



Weg stehen, beklemmen im Protein einzelne Aminosäuren einander über elektrostatische und Van-der-Waals-Kräfte.

Nachdem wir diese Art der Bindung genauer verstanden haben, können wir darüber nachdenken, ein künstliches Proteingerüst – ähnlich dem des Cellulosoms – mit Werkzeugen zu bestücken. Dies gilt nicht nur für Kohlenhydrate zerlegende Enzyme, sondern für beliebige Proteine verschiedenster Funktionsweise. Damit ist ein erster Schritt hin zu einer kleinen molekularen Fabrik geschaffen.

Simulationssysteme wie die beschriebenen sind der vorläufige Höhepunkt einer Entwicklung, die 1990 ihren ersten Durchbruch erzielte. Damals konnten wir mit 100 000 simulierten Atomen zahlreiche entscheidende Prozesse in der Zellmembran aufklären, zum Beispiel wie ein so genanntes Kanalproteinen in einer Membran, auf beiden Seiten umgeben von Wasser und Ionen, gewisse Moleküle durchlässt und anderen den Weg versperrt.

Inzwischen ist die Anzahl der simulierten Atome um den Faktor 1000 auf 100 Millionen angestiegen, dank der Rechenleistung der Supercomputer, die im gleichen Zeitraum von Gigaflops ( $10^9$ ) über Teraflops ( $10^{12}$ ) auf Petaflops ( $10^{15}$  Rechenoperationen pro Sekunde) zugelegt hat, also eine glatte Million.

### Simulationen der Zukunft

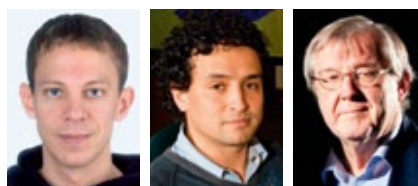
Damit kann man zum Beispiel die Hülle eines Virus in der Größenordnung von 0,1 Mikrometern simulieren. Sogar eine menschliche Körperzelle rückt allmählich in den Bereich des Möglichen. Die meisten ihrer ungefähr 100 Millionen Proteinmoleküle entfalten ihre vielfältigen Wirkungen erst zu mehreren, was entsprechend große Simulationen erfordert. Wenn wir von einigen wenigen Proteinen zu tausenden beziehungsweise von einer Million zu einer Milliarde Atome übergehen, können wir erstmalig ganze, wenn auch noch primitive Lebensformen wie Viren auf allein physikalischer Grundlage beschreiben.

Natürlich benötigen derartige Simulationen nach heutigen Maßstäben sehr hohe Rechenleistungen. Aber die Aussichten sind günstig: Die Hersteller der Superrechner erwarten, bis 2020 die ersten Exaflop-Rechner (eine Trillion oder  $10^{18}$  Rechenoperationen pro Sekunde) anbieten zu können. Mit der zusätzlichen Rechenkapazität hoffen wir an Stelle der Atomanzahl auch die Simulationsdauer erhöhen zu können. Statt im Mikrosekundenbereich könnten wir dann zum Beispiel die Aktivität des Ribosoms – insbesondere die Transkription von RNA zu Protein – für eine ganze Millisekunde unter dem »Computermikroskop« beobachten, eine Aufgabe, die einen heutigen Supercomputer noch 90 000 Tage oder reichlich 250 Jahre beschäftigen würde.

Die Ergebnisse der Simulationen rechtfertigen auch die hohen Kosten des Rechengenüßes. Immerhin hat der Supercomputer »Blue Waters« ungefähr 200 Millionen Dollar gekostet. Aber allein ein substanzieller Beitrag zum Problem der Antibiotikaresistenz würde diese Kosten wieder einspielen. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) berichtete im April

2014 über die weltweit ansteigende Medikamentenresistenz und warnte vor der Möglichkeit einer postantibiotischen Ära, in der gewöhnliche Infektionen und kleine Verletzungen sich wieder zu ernst zu nehmenden Bedrohungen für die Menschheit des 21. Jahrhundert entwickeln können. In den vergangenen 30 Jahren sind kaum neue Antibiotika entwickelt worden, während die sehr anpassungsfähigen Bakterien in dieser Zeit neue Antibiotikaresistenzen ausgebildet haben. Um diesen Trend zu stoppen, muss die Pharmaforschung einen Schritt tiefer als bisher in die atomare Ebene der molekularbiologischen Vorgänge eindringen. Dafür sind biomolekulare Computersimulationen ein viel versprechendes neues Werkzeug. ~

### DIE AUTOREN



**Till Rudack** (links) hat 2013 an der Ruhr-Universität Bochum am Lehrstuhl für Biophysik promoviert. Seit Anfang 2014 forscht der Physiker in Klaus Schultens Arbeitsgruppe an der atomaren Aufklärung von Struktur und Funktion des Proteasoms, der Recyclingmaschine der Zelle. **Juan R. Perilla** (Mitte) promovierte 2011 in Biophysik an der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland). Seitdem untersucht er in Schultens Arbeitsgruppe das HIV-1-Kapsid und dessen Wechselwirkung mit der Wirtszelle.

**Klaus Schulten** promovierte 1974 an der Harvard University. Seit 1988 ist er Professor an der University of Illinois in Urbana-Champaign. Am Beckman Institute dieser Universität gründete er 1989 die Theoretical and Computational Biophysics Group, in der die beschriebenen Arbeiten entstanden sind. Die Autoren danken Rafael C. Bernardi (Biokraftstoffe), Bo Liu (Ribosomen) und Melih Senar (Chromatophor) für die Unterstützung beim Beschreiben der Fallbeispiele.

### QUELLEN

**Bernardi, R. C. et al.:** Molecular Dynamics Study of Enhanced Man5B Enzymatic Activity. In: *Biotechnology for Biofuels* 7, 83, 2014

**Cartron, M. L. et al.:** Integration of Energy and Electron Transfer Processes in the Photosynthetic Membrane of *Rhodospirillum rubrum*. In: *Biochimica et Biophysica Acta – Bioenergetics* 1837, S. 1769–1780, 2014

**Chandler, D. et al.:** Light Harvesting by Lamellar Chromatophores in *Rhodospirillum rubrum*. In: *Biophysical Journal* 106, S. 2503–2510, 2014

**Sothilvelam, S. et al.:** Macrolide Antibiotics Allosterically Predispose the Ribosome for Translation Arrest. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 111, S. 9804–9809, 2014

**Zhao, G. P. et al.:** Mature HIV-1 Capsid Structure by Cryo-Electron Microscopy and All-Atom Molecular Dynamics. In: *Nature* 497, S. 643–646, 2013

### WEBLINKS

Dieser Artikel und zahlreiche Webhinweise im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1309290](http://www.spektrum.de/artikel/1309290)





Dave Goulson  
**Und sie fliegt doch**  
*Eine kurze Geschichte der Hummel*  
 Hanser, München 2014  
 320 S., € 19,90

BIOLOGIE

## Ode an die Hummel

Eine faszinierende Reise durch das Leben der pelzigen Insekten – trotz irreführenden Titels.

Es ist eine wahrlich große Liebe, die Englands führender Hummelforscher Dave Goulson in seiner »kurzen Geschichte« über die fliegenden Brummer offenbart. Schon früh entdeckte er sein Interesse für alles, was im heimischen Garten krabbelte und krechtete, und fing etliche Geschöpfe ein. Dass nicht jedes davon seine kindlich unbeholfenen Untersuchungen überlebte, gesteht er gleich am Anfang des Buchs. Umso mehr setzt er sich heute für die Hummeln ein, besonders in Großbritannien.

Mit britisch-trockenem Humor entführt er seine Leser auf eine faszinierende Reise durch das Leben der pelzi-

gen Insekten. Ohne allzu sehr ins Fachliche abzudriften, erläutert er, wie die Erbanlagen eine Hummelarbeiterin dazu bringen, sich lieber um ihre Schwestern als um den eigenen Nachwuchs zu kümmern – und wie die dicken Brummer anhand von Fußabdrücken auf einer Blüte erkennen, ob hier noch etwas zu holen ist. In Großbritannien ist die britische Erdbauhummel ausgestorben, was Goulson auf den Zweiten Weltkrieg zurückführt: Die damalige Isolation habe die Briten gezwungen, mehr Nutzpflanzen anzubauen, was wiederum die Lebensgrundlagen dieser Insektenart zerstörte. Zum Glück waren bereits seit den 1870er Jah-

ren dank einem Entomologen britische Hummeln nach Neuseeland eingeführt worden, wo sich die Nachkommen der Erdbauhummel noch heute beobachten lassen.

Immer wieder betont Goulson das ökologische Verdienst der Tiere: Jedes Jahr bestäuben die fleißigen Arbeiterinnen Abermillionen Blüten und erhalten so die enorme Vielfalt der Natur. Hummeln leisten nicht nur bei der Tomatenbestäubung wertvolle Dienste, auch viele Obstbäume profitieren von ihrem Wirken. Der Autor beschreibt, wie wichtig diese Insekten für Natur und Mensch sind und welche schwer wiegende Folgen ihr Verschwinden hätte.

Beim Lesen des Buches wird klar, dass wir noch zu wenig über die Hummeln und ihr kurzes Leben wissen, um effizient zum Erhalt ihrer Gattung beizutragen. Von 26 Arten in Großbritannien sind lediglich acht häufig anzutreffen. Umso nachdrücklicher engagiert sich Goulson auch privat. Er kaufte ein kleines Stück Land und versucht es durch vorsichtigen Rückbau in einen möglichst natürlichen Zustand zu überführen, in der Hoffnung, dass sich dort wieder Wildblumen ausbreiten und mit ihnen die Hummeln.

Ein Wermutstropfen bleibt nach der Lektüre jedoch. Anders als es der Buchtitel verspricht, bleibt das Werk die Antwort schuldig, warum die Hummel fliegt. Das ist nicht das Versäumnis des Autors, sondern geht auf einen Übersetzungspatzer zurück. Aus dem Originaltitel »A Sting in the Tale« (eine verbreitete Metapher im Sinne von »dickes Ende« oder »Pferdefuß«) machte der Verlag ohne jeden Zusammenhang »Und sie fliegt doch« – obwohl das Buch keine inhaltliche Grundlage dafür bietet. Dies sollte allerdings niemanden davon abhalten, die faszinierende Welt der fleißigen Bestäuber etwas näher kennen zu lernen und besser zu verstehen, welche wichtige Funktion sie in der Natur erfüllen.

**Janina Horst**

Die Rezensentin hat Biochemie studiert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



Weltweit gibt es etwa 250 Hummelarten. Die pummeligen Insekten fliegen täglich bis zu 1000 Blüten an und haben große Bedeutung als Obst- und Gemüsebestäuber.



LEE SMOLIN

## Im Universum der Zeit

Auf dem Weg zu einem  
neuen Verständnis des Kosmos

Aus dem Englischen von Jürgen Schröder

DVA, München 2014

416 S., € 24,99

PHYSIK

# Zeitlosigkeit gibt es nicht

Der US-Physiker Lee Smolin erklärt sein Weltbild – es unterscheidet sich fundamental von dem anderer großer Naturwissenschaftler.

U nauffhaltsam scheint die Zeit voranzuschreiten. Wir sehen, wie unsere Kinder wachsen, wie unsere Freunde und wir selbst altern. Eine Möglichkeit, dem zu enttrinnen, gibt es für uns nicht. Auch manch renommierter Wissenschaftler, etwa der theoretische Physiker Lee Smolin, betrachtet die Dominanz der Zeit als unanfechtbar. Für ihn ist die Zeit etwas Absolutes: Nicht einmal Naturgesetze stünden über ihr, wie er im vorliegenden Buch schreibt. Naturgesetze seien nicht zeitlos, sondern veränderten sich allmählich.

Smolin ist nicht irgendwer; er wirkte an Top-Einrichtungen des Wissenschaftsbetriebs: Harvard University (Cambridge), Institute for Advanced Study (Princeton), Yale University (New Haven), um nur einige zu nennen. Mit seinen Thesen nimmt er nicht unbedingt eine Außenseiterposition ein. Viele Physiker beschleichen mittlerweile Zweifel, ob etwa Naturkonstanten wirklich fixe Größen sind oder doch einer zeitlichen Entwicklung unterworfen. Mit seiner Vermutung einer alles dominierenden Zeit bezieht Smolin eine klare Gegenposition zu großen Denkern wie Isaac Newton (1642–1726) oder Albert Einstein (1879–1955), die die Welt von ewig geltenden Naturgesetzen beherrscht sahen.

Auch der Beschaffenheit des Raums widmet sich der Autor – ein Aspekt, der kaum weniger rätselhaft ist als die Zeit. Wahrscheinlich, so Smolin, werde sich

der Raum einmal als Illusion erweisen, als eine Art makroskopische Eigenschaft, die aus mikroskopischen Phänomenen resultiere, ähnlich wie Temperatur und Druck. Die Relativitätstheorie verschmolz den Raum mit der Zeit zur Raumzeit, ein Ansatz, den Smolin für falsch hält: Der Raum sei nicht fundamental.

Smolins Hypothesen sind nicht immer ganz leicht nachzuvollziehen; einige von ihnen erläutert er (in englischer Sprache) näher auf seiner Website [www.leesmolin.com](http://www.leesmolin.com). Nach eigenem Bekunden will der Wissenschaftler in eine »neue Richtung der Grundlagenphysik« weisen. Provokant behauptet er, sie sei der einzige Ausweg aus den gegenwärtigen Rätseln der theoretischen Physik und der Kosmologie. Der Autor hält den Gedanken für absurd, dass sich die Geschichte des Universums mit einer zeitlosen »Weltformel« beschreiben ließe. Ebenso gut könnten wir glauben, schreibt er, die Wahrheit über die Welt liege außerhalb von ihr. Wenn das Universum jedoch alles sei, was es gibt, könne nichts außerhalb von ihm existieren.

Die These einer alles dominierenden Zeit berge allerdings ein großes Dilemma, wie Smolin zugibt: die offene Frage nämlich, ob ein Metagesetz existiere, das die zeitliche Entwicklung der Naturgesetze vorgebe. Eine Lösung dieser Frage könnte sich als Schlüssel für große Durchbrüche in der Kosmologie und

der Grundlagenphysik erweisen, meint der Autor.

Die Lektüre des Werks verlangt hohe Aufmerksamkeit. Der Physiker behauptet zwar, dass er seine Ausführungen sehr leicht verständlich formuliert, was er aus seiner Sicht vielleicht auch tut. Doch tatsächlich sollten Smolins Leser eine gewisse Vorbildung in Sachen Relativitätstheorie, Quantentheorie und Kosmologie mitbringen.

**Thorsten Naeser**

Der Rezensent ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.



Laut den Thesen Lee Smolins verändern sich Naturgesetze mit der Zeit. Die Suche nach einer zeitlosen Weltformel zur Beschreibung des Universums hält der Physiker für unsinnig.



Michael Tomasello

**Eine Naturgeschichte  
des menschlichen Denkens**

Aus dem Englischen von Jürgen Schröder

Suhrkamp, Berlin 2014

256 S., € 32,-

ANTHROPOLOGIE

## Einsiedler bringen es nicht weit

Sprache und Denken entstanden nicht individuell, sondern in der Gemeinschaft, glaubt Michael Tomasello.



FOTOLIA / NICK BEEMANS

Schimpanzen kooperieren miteinander – doch laut dem Verhaltensforscher Michael Tomasello bei Weitem nicht so eng wie unsere Vorfahren vor bereits 400 000 Jahren.

Is vor zirka 200 Jahren herrschte die Auffassung vor, dass Menschen sich von Tieren durch auf Sprache gestütztes Denken unterscheiden. Laut dem amerikanischen Anthropologen Michael Tomasello rührt das daher, »dass es in den ersten paar tausend Jahren der abendländischen Zivilisation keine nichtmenschlichen Primaten in Europa gab. Aristoteles und Descartes konnten ohne weiteres solche Dinge postulieren wie »Nur Menschen haben Vernunft« (...), weil sie Menschen mit Vögeln, Ratten, verschiedenen Haustieren und gelegentlich mit Füchsen oder Wöl-

fen verglichen.« Erst im 19. Jahrhundert habe man Menschenaffen in zoologischen Gärten Europas präsentiert, und das habe zusammen mit den wissenschaftlichen Beiträgen Charles Darwins (1809–1882) die Perspektive verändert.

Menschenaffen sind durchaus in der Lage, sich etwas vorzustellen und rationale Schlüsse zu ziehen. Sie kooperieren auch miteinander, allerdings nur in egoistischer Absicht. Schimpanzen kreisen beispielsweise gemeinsam kleine Affen ein. Derjenige, der das Opfer fängt, frisst es aber weit gehend allein und rückt die Reste nur heraus,

wenn die anderen ihn bedrängen und anbetteln.

Da Kultur auf einer ausdifferenzierten Kooperation beruht, bei der Denken und Sprache wichtige Funktionen erfüllen, versucht Tomasello zu rekonstruieren, welche Entwicklungen bei Frühmenschen eingesetzt haben könnten, die zu einer Intensivierung der Kooperation führten. Der Autor geht davon aus, dass Frühmenschen vor etwa 400 000 Jahren erheblich enger zusammenarbeiteten als heutige Menschenaffen – vermutlich dazu gezwungen von Umwelteinflüssen bei der Nahrungssuche.

In Kleinstgruppen von zumeist zwei Menschen, von denen der Autor ausgeht, habe sich eine »geteilte Intentionalität« herausgebildet – der zentrale Begriff des Buchs. Tomasello definiert ihn folgendermaßen: »Denken, um zu kooperieren: das ist, in größten Zügen, die Hypothese der geteilten Intentionalität.« Dazu gehöre die gegenseitige Beurteilung bei den Frühmenschen: Wer gut kooperierte, sei anderen, weniger gut kooperierenden, vorgezogen worden. Sprache und Denken würden sich demnach dem Miteinander und der Kommunikation verdanken und könnten nicht individuell entwickelt worden sein. Das Denken besitze somit einen sozialen Charakter.

Damit widerspricht der Autor jenen Theorien, die Gesellschaft und Politik mit Egoismus, Macht und Gewalt erklären wollen. Tomasello versucht das Konzept des deutschen Philosophen Jürgen Habermas zu bekräftigen, dem zufolge Vernunft keine Gewalt ausübt, sondern grundsätzlich kommunikativ und kooperativ wirkt. Diese Rolle, so Tomasello, habe die Vernunft bereits bei den Frühmenschen gespielt. Alles in allem ein spannendes Buch mit konsequenter Argumentationslinie, auch wenn es andere Thesen zu wenig berücksichtigt.

**Hans-Martin Schönherr-Mann**

Der Rezensent ist Essayist und lehrt politische Philosophie an der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie Theorie der Bildung an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.





Peter Spork  
**Wake up!**  
*Aufbruch in eine ausgeschlafene Gesellschaft*  
Hanser, München 2014  
250 S., € 19,90

GESUNDHEIT

## Um den Schlaf gebracht

Warum unsere innere Uhr immer schlechter funktioniert.

Viele Blinde, so erfahren wir aus diesem Buch, leiden unter Schlafstörungen, weil ihre innere Uhr schlecht funktioniert. Denn die Ausschüttung des »Schlafhormons« Melatonin, das im menschlichen Körper den Tag-Nacht-Rhythmus steuert, werde von Lichtsensoren in der Netzhaut reguliert, die auf die Bewertung von Helligkeitsunterschieden spezialisiert sind. Bei mehreren Formen der Blindheit falle dieser Mechanismus aus, wodurch der Melatoninhaushalt durcheinandergerate.

Doch auch bei Menschen mit intakter Netzhaut kann es zu melatoninbedingten Schlafstörungen kommen. Dann nämlich, wenn sie – wie vielfach der Fall – tagsüber nur winzige Dosen

Sonnenlicht empfangen, abends und nachts hingegen gleißendem Kunstlicht ausgesetzt sind. Wie der Wissenschaftsjournalist Peter Spork in seinem Buch schreibt, sei dann die Gefahr groß, dass die »Hauptuhr« im Zwischenhirn aus dem Takt gerate und der Körper seine inneren Abläufe nicht mehr mit denen in der Außenwelt synchronisieren könne. In diesem Zustand hätte unser Organismus keinen Anhaltspunkt mehr, ob es gerade Morgen, Mittag, Abend oder Nacht sei.

Eigentlich, behauptet Spork, »weiß« der menschliche Körper ziemlich genau, welche Tageszeit gerade herrscht und wann welche physiologischen Funktionen Vorrang haben. Dieses intuitive Programm laufe allerdings ab,

ohne dass es uns bewusst werde. Außerdem müsse die innere Uhr, die ein Überbleibsel aus der Steinzeit sei, anhand bestimmter Stimuli aus der Außenwelt immer wieder neu gestellt werden.

Der Autor benennt Probleme, die seiner Meinung nach auftreten, wenn die innere Uhr aus dem Takt kommt. So habe der übliche Schulbeginn zwischen 7 und 8 Uhr zur Folge, dass die allermeisten Kinder und Jugendlichen permanent mit zu wenig Schlaf auskommen müssten. Spork vermutet, dass dieser chronische Schlafmangel viele Heranwachsende an ADHS oder Fettsucht erkranken lasse. In seinen Augen ist es zwingend erforderlich, Erkenntnisse aus der Chronobiologie zu berücksichtigen und den Unterricht für die Mittelstufe frühestens um 9 Uhr und denjenigen für die Oberstufe erst gegen 10 Uhr beginnen zu lassen.

Laut Spork gibt es Länder, in denen das – allerdings unfreiwillig – bereits heute zum Teil umgesetzt ist. In Kroatien, Island, Tansania oder Jamaika herrscht demnach ein solch gravierender Mangel an Lehrkräften beziehungsweise Schulen, dass man sich nicht anders zu helfen weiß, als die eine Hälfte der Schüler vormittags, die andere Hälfte hingegen nachmittags und abends zu unterrichten. Jeweils nach Ablauf einer Woche werden die Gruppen getauscht. Dieses rotierende Sys-

ANZEIGE



## DIE BÜHNE: DER HIMMEL

€ 39,90 [D] • ISBN 978-3-89225-728-8

€ 24,90 [D] • ISBN 978-3-7688-3910-5



Stephan Elbern

**Frieden – eine verlorene Kunst. Von Kadesch bis Camp David**

Nünnerich-Asmus, Mainz 2014. 200 S., € 24,90

Die Menschen hätten verlernt, Kriege diplomatisch beizulegen, lautet die Kernthese des vorliegenden Buchs. Stephan Elbern, Althistoriker und Sachbuchautor, stellt darin Friedensabkommen von den alten Pharaonen bis in die heutige Zeit vor. Er analysiert Inhalt und Vorgeschichte der Verträge und erörtert, was sie bewirkten. Elbern liefert damit zwar eine weit gehend konkurrenzlose Sammlung. Doch schafft er keine empirische Grundlage, um seine These zu begründen, die somit bloße Behauptung bleibt. Zudem verkürzt der Autor historische Vorgänge in einer Weise, die an Geschichtsklitterung grenzt. Seinen Anspruch, dem »weithin verkündeten Mythos Demokratie« entgegenzutreten, erläutert er nicht. Das Fehlen von Literaturangaben schränkt den Wert des Buchs zusätzlich ein.

THOMAS BROCK



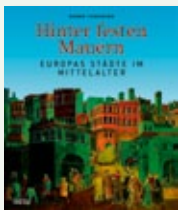
Wolfgang Tschirk

**Statistik: Klassisch oder Bayes. Zwei Wege im Vergleich**

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2014. 180 S., € 19,99

Was ist eigentlich Wahrscheinlichkeit? Dieser Frage widmet sich Wolfgang Tschirk, Leiter des »mathecampus« in Wien. Auf der Grundlage des Wahrscheinlichkeitsbegriffs stellt er sodann die klassische Statistik der Bayes-Statistik gegenüber. Während »klassische Statistiker« eher Objektivisten sind (sie interpretieren Wahrscheinlichkeiten als relative Häufigkeiten), kann man »Bayesianer« eher als Subjektivisten bezeichnen (es geht ihnen um Plausibilität auf der Grundlage von Vorwissen). Dies führt zu verschiedenen Methoden beim Schließen von einer Stichprobe auf die Gesamtheit. Tschirk macht die Unterschiede beider Lehren deutlich, aber auch ihre Gemeinsamkeiten, etwa die für beide gültigen Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie. Hierbei erörtert er zahlreiche Beispielaufgaben. Das Buch eignet sich am ehesten für (angehende) Naturwissenschaftler, Laien hingegen werden schnell überfordert.

ROLAND PILOUS



Bernd Fuhrmann

**Hinter festen Mauern. Europas Städte im Mittelalter**

Theiss, Stuttgart 2014. 288 S., € 49,95

Noch an der Schwelle zwischen Mittelalter und Neuzeit lebten hier zu Lande nur 15 bis 20 Prozent der Bewohner in Städten. Heute hingegen ist städtisches Wohnen die dominante Lebensform. Wie kam es zu diesem Wandel? Ausgehend vom Markt als Keimzelle urbaner Entwicklung beleuchtet der Autor die Geschichte der abendländischen Stadt im Mittelalter. Dabei lenkt er seinen Blick auf Zentren wie Augsburg, Nürnberg, Florenz, Rom oder Paris. Fuhrmann behandelt das Wirtschaftsleben und die Sozialstruktur der einzelnen Städte und berichtet über die Lebensbedingungen der dort wohnenden Menschen. Er erörtert, wie das Bürgertum zu Selbstständigkeit und Macht gelangte, wie Schulen und Universitäten entstanden und gewaltige Bauwerke, etwa die Kathedralen, errichtet wurden. Das Buch ist nicht nur kompetent geschrieben, sondern dank zahlreicher Abbildungen und Karten auch optisch ansprechend.

THEODOR KISSEL



Steffen Münzberg, Susanne Thiele, Vladimir Kochergin

**Sex macht Spaß, aber viel Mühe**

**Eine Entdeckungsreise zur schönsten Sache der Welt**

orell füssli, Zürich, 2014. 240 S., € 14,95

Warum nehmen wir so große Mühen auf uns, einen geeigneten Partner zu finden, ihn zu beeindrucken und langfristig an uns zu binden? Warum hat sich in unserer Evolution nicht das Modell der Schwämme durchgesetzt, die einfach ihre geschlechtslosen Keimzellen ins Meer abgeben, um sich zu vermehren? Solche Fragen beantwortet das Buch durchgehend unterhaltsam und mit viel Wortwitz. Die Kapitel über Sexualität bei Mikroorganismen und Tieren sind für Laien interessant und verständlich, bieten aber auch Biologen einige neue Einsichten. Das Werk schließt mit einer Zusammenstellung möglicher Strategien der menschlichen Partnerwahl – mit humorvollen »Vorschlägen« wie Frauenraub. Manche Tipps jedoch, etwa wie man in langjährigen Partnerschaften das sexuelle Interesse erhält, sind ernst gemeint und können sich als durchaus hilfreich erweisen.

MAREN EMMERICH

tem bringt für die Schülerinnen und Schüler den segensreichen Vorteil mit sich, viel öfter ausschlafen zu können.

Nicht nur Kindern und Jugendlichen, sondern überhaupt dem Großteil der Bevölkerung werde in den westlichen Staaten ein Zeitregime aufgezwungen, das sich rücksichtslos über die innere Uhr hinwegsetze, meint der Autor. Zahlreiche Indizien sprächen dafür, dass dies Stoffwechselstörungen, Diabetes, Fettsucht, Herz-Kreislauf-Er-

krankungen und Krebs begünstige. Auch Depressionen, Süchte und Burnout-Störungen könnten aus der unnatürlichen Lebensweise resultieren. Als Gegenmaßnahmen fordert Spork unter anderem, die Sommerzeit sofort abzuschaffen, Schicht- und Nachtarbeit so weit wie irgend möglich einzuschränken und tagsüber nur noch kaltweißes, abends und nachts dagegen ausschließlich warmgelbe Leuchtmittel zu verwenden.

Sporks Argumente wirken plausibel und überzeugend. Allerdings neigt er dazu, nur solche Forschungsergebnisse zu zitieren, die seine Hypothesen bestätigen. Trotzdem ist »Wake up!« ein lesenswertes Buch, das davor warnt, ständig die Nacht zum Tag und den Tag zur Nacht zu machen.

---

**Frank Ufen**

Der Rezensent ist promovierter Soziologe und freier Wissenschaftsjournalist.



Paul Bogard

**Die Nacht**

*Reise in eine verschwindende Welt*

Blessing, München 2014

370 S., € 19,99

ANTHROPOGENE AUFHELLUNG

## Ende der Finsternis

**Künstliche Lichtquellen zerstören die Nacht.  
Dieses Buch begehrt dagegen auf.**

**W**er erlebt heute noch eine dunkle Nacht? Großstadtbewohner eher nicht, außer im abgedunkelten Schlafzimmer. Die meisten Menschen legen auf nächtliche Finsternis offenbar keinen großen Wert mehr; man genießt die grelle Glitzerwelt. Oder regt sich nennenswerter Widerstand, wenn Bauwerke wie startklare Raumschiffe angeleuchtet werden?

Künstliches Licht wirkt mittlerweile vertrauter auf uns als Dunkelheit. Ein natürlicher Nachthimmel ist die Ausnahme, weshalb wir überwältigt sind, wenn wir ihn dann doch einmal zu sehen bekommen. Das war früher anders. Man bestaunte Milchstraße und Sternbilder, war mit dem Firmament vertraut und konnte sich nach den Sternen orientieren. Bis Gaslicht und Glühlampe Einzug hielten. Heute sieht man in Städten gerade noch den Mond und,

wenn man Glück hat, den einen oder anderen Planeten. Paul Bogard – Schriftsteller, Umweltaktivist und Hobbyastronom – geißelt diese »Lichtverschmutzung« in seinem Buch.

Um das Ausmaß der künstlichen Aufhellung zu bestimmen, gibt es mittlerweile Skalen. Die bekannteste ist sicher die von John Bortle aus dem Jahr 2001. Der amerikanische Hobbyastronom definierte neun Klassen, die von unbeeinträchtigtster nächtlicher Dunkelheit (1) bis zu maximaler Himmelsaufhellung durch irdische Quellen (9) reichen – der Mond zählt also nicht als Lichtverschmutzer. Bogard greift diese Skala in seinem Buch auf und unterteilt das Werk in neun Kapitel. Darin erörtert er die einzelnen Bortle-Klassen und erläutert jeweils beispielhaft, an welchen Orten entsprechende Lichtverschmutzungen vorherrschen. Entstanden ist eine

Mischung aus Reisebericht, Sachbuch und Anklageschrift. Der Autor geht mit maßgeblich Verantwortlichen hart ins Gericht, allen voran Politikern, Stadtplanern und Mitarbeitern von Behörden.

Wo startet die Lektüre? Natürlich in Las Vegas! Ein besseres Beispiel für die Bortle-Klasse 9 gibt es wohl nicht. Die Lichtflut in diesem Eldorado der Glücksspieler ist gigantisch und manifestiert sich insbesondere im hellsten Strahl der Welt, der von der Hotelpyramide »Luxor« gen Himmel weist. Verblüffend: Trotzdem gibt es in der Stadt einen Verein von Hobbyastronomen!

Mit solchen Geschichten fesselt Bogard seine Leser immer wieder. Dabei glänzt er mit beachtlichem Fachwissen (auch wenn es bei der Astronomie manchmal etwas hapert) und reichlich Insiderkenntnissen. Er ist weit gereist und hat mit vielen Leuten gesprochen. Überall, so berichtet er, gebe es »Dark Sky«-Organisationen (deutsch: »Dunkler Himmel«), die sich für eine Eindämmung des Lichtsmogs einsetzen – auch in Deutschland. Die US-Nationalparks verfolgen dieses Ziel ebenfalls. Es gibt haufenweise Vorschläge hierfür, leider werden die wenigsten umgesetzt. Ein positives Beispiel ist die Stadt Flagstaff in Arizona, in der gegen den Himmel gerichtete Außenwerbung verboten ist und die mit Lampen erhellt wird, die nach unten strahlen.

Für Scheinargumente wie »Dunkelheit befördert Verbrechen« hat der Autor kein Verständnis. Wie er plausibel darlegt, hängen die Sichtverhältnisse viel stärker vom Kontrast ab als von der



absoluten Helligkeit. Würde man dies konsequent beachten, könnte man auf unnütze Lampen verzichten und Milliardensummen einsparen. Zu viel Licht, so Bogard, werde sinnlos in den Welt- raum abgestrahlt, wie Satellitenauf- nahmen eindrucksvoll zeigten – und es werde immer mehr.

Die neun Kapitel behandeln fast alle einschlägigen Aspekte rund um das Thema Nacht. Leider ist das Buch nur mit einigen Schwarz-Weiß-Abbildungen illustriert. Auch wiederholt sich der Autor sehr oft. Einen entscheidenden Faktor thematisiert er hingegen über- haupt nicht: die Luftverschmutzung. Sie fördert das Entstehen von Streu- licht. So kann man bei extrem reiner Luft trotz hellen Mondlichts viele Ster- ne sehen (auf dem Erdtrabanten, der keine Atmosphäre besitzt und somit auch keinerlei Luftverschmutzung auf- weist, ist der Himmel am helllichten Tag schwarz). Peking bei Nacht dürfte

für Astronomen also ein noch schlim- merer Ort sein als Las Vegas.

Für Erstaunen sorgt zudem, dass Bogard nicht auf das beliebte »Sky Quality Meter« (SQM) eingeht. Mit diesem im Handel erhältlichen Gerät bestim- men Hobbyastronomen heute auf ein- fache Weise die Flächenhelligkeit des Himmels und damit die Güte der Nacht. Dabei zeigt sich unter anderem: Selbst der natürlichste, mondlose Himmel ist nicht vollkommen dunkel, was sich leicht erkennen lässt, wenn man die Hand nach oben hält und deren unbe- leuchtete Unterseite mit dem Firma- ment im Hintergrund vergleicht.

Wo gibt es nun Orte mit der Bortle- Klasse 1? Bogard nennt mehrere Gebie- te; sein Liebling ist der »Great Basin Na- tional Park« an der Grenze zwischen Nevada und Utah. Mit der grandiosen Beschreibung des Nachthimmels in dieser einsamen Gegend endet das pa- ckend und flüssig geschriebene Buch.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:  
[www.spektrum.de/rezensionen](http://www.spektrum.de/rezensionen)

Alles in allem interessant und empfeh- lenswert – wenn auch noch ergän- zungsbedürftig.

#### Wolfgang Steinicke

Der Rezensent ist Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e. V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet.



Nicholas Evans

#### **Wenn Sprachen sterben – und was wir mit ihnen verlieren**

Aus dem Englischen von Robert Mailhamer

C.H.Beck, München 2014

426 S., € 29,95

LINGUISTIK

## Wenn die Schwiegermutter vorbeigeht und keiner es weiß

Die Unterschiede zwischen den Sprachen sind verblüffend – doch meist kennen wir sie nicht einmal.

Für einen Sprecher der Östlichen Pomo, einer kleinen indianischen Ethnie in Kalifornien, wirkt ein deut- scher Satz wie »es brennt« unpräzise. Seine Sprache verlangt nämlich, dass er an das Verb »brennen« noch Suffixe an- hängt, die ausdrücken, woher er weiß, dass es lodert. Er kann ein *-ink'e* anfü- gen, um kundzutun, dass er den Brand

am eigenen Leib erfahren hat. Ein *-ine* hingegen heißt: Ich habe indirekte Hin- weise und schließe darauf, dass es ein Feuer gibt. Eine weitere Variation lau- tet: Jemand hat mir gesagt, dass es brennt (*-le*).

Diese so genannte Evidentialität als grammatische Kategorie gibt an, wel- cher Quelle eine Information ent-

stammt. Sie findet sich in einigen Spra- chen aus unterschiedlichen Regionen der Erde. Das heißt nicht, dass Sprecher anderer Sprachen nicht auch in der Lage wären, Quellen anzugeben – doch sind sie nicht per Grammatik dazu ge- zwungen.

Warum ist das Erkennen und Inter- pretieren solcher sprachlichen Unter- schiede von Bedeutung für das kultu- relle Wissen der Menschheit? Dieser Frage widmet sich der Linguist Nicho- las Evans von der Australian National University in Canberra in seinem un- terhaltsam geschriebenen Buch. Der Feldforscher führt kompetent in zahl- reiche Sprachen ein und diskutiert da- rauf aufbauend sodann seine These: Jede Sprache stelle einen spezifischen Zugang zur Welt dar, der für die jewei- lige Kultur Wichtiges hervorhebe und anderes vernachlässige. Das heiße aber nicht, dass Sprecher eines Idioms nicht in der Lage seien, sich jeweils neue Ka- tegorien zu erschließen. Das wäre im Übrigen auch ein wissenschaftliches Ei- gentor, denn dann könnte ein Feldfor- scher wie Evans, bedingt durch seine

Muttersprache Englisch, viele Denkmuster der von ihm untersuchten Sprachen gar nicht erkennen.

Exemplarisch schildert Evans, wie er durch intensives Befragen von Aborigines herausfinden konnte, was das Verb »wekemarnûmolkkûnhkdokan« aus der Aborigines-Sprache Dalabon bedeutet. Im Kern besagt es, dass zwei Personen gehen, doch hinzu kommen zahlreiche weitere Bedeutungen: Es drückt das Verwandtschafts- und Respektverhältnis der beiden aus (in diesem Fall ist eine von den beiden die Schwiegermutter oder eine andere Respektsperson) und informiert darüber, ob das Gehen-Ereignis anderen bekannt ist und diesen zum Nachteil erreichen kann. Anhand solcher Fälle belegt Evans, dass manche Sprachen

einer kulturell getriebenen Sprachentwicklung (angelehnt an den in Leipzig forschenden Anthropologen Michael Tomasello) stellt er differenziert vor, wobei er sich auch mit möglichen Einwänden auseinandersetzt.

Der Autor plädiert aus zweierlei Gründen für ein unermüdliches Erforschen der Sprachen, die vielfach vom Aussterben bedroht sind. Zum einen, weil mit ihrem Verschwinden relevantes Wissen verloren ginge – etwa über ökologische Zusammenhänge, landwirtschaftliche oder handwerkliche Techniken oder bislang unbekanntes Tierarten. Zum anderen, weil das Durchdringen fremder Sprachen helfe, Varianten sozialer Kognition zu verstehen, die kein mathematisches Modell voraussagen könne.

### *Mit dem Verlust von Sprachen verschwindet auch Wissen – etwa über ökologische Zusammenhänge und Landwirtschaft*

die »soziale Kognition«, also Wissen über Handlungsträger, Rollen oder Ereignisse, grammatikalisch an die Oberfläche holen und den Sprecher dadurch zwingen, sich über sie im Klaren zu sein. Wohingegen andere Sprachen hier unspezifische Aussagen zulassen und daher die Welt kognitiv anders einteilen – ihre Sprecher also gewissermaßen in einer anderen Gedankenwelt leben lassen.

Das Buch klinkt sich mit seinen zahlreichen und vergnüglich zu lesenden Beispielen in eine Debatte ein, die besonders in den 1990er Jahren mit einiger akademischer Schärfe geführt wurde. Während »Universalisten« die Existenz einer von allen Menschen geteilten Universalgrammatik mit abstrakten Gemeinsamkeiten und Denkkategorien postulierten, fochten »Relativisten« dafür, sich doch erst einmal die rund 6500 Sprachen der Erde genau anzuschauen und offen dafür zu sein, ob sich nicht doch Unterschiede im Denken der jeweiligen Sprecher finden. Evans' Werk entspringt einer klugen Auseinandersetzung mit dieser Debatte und stützt sich auf die Befunde intensiver Feldforschung. Seine eigene These

Einen Pferdefuß haben Evans' Überlegungen: Wer sich das Denken nur über die Sprache erschließt, erforscht, was Menschen sagen – aber nicht notwendigerweise, was und wie sie denken. Evans ist sich dieser Schwäche bewusst und berichtet daher auch über Feldforschung, die mittels psychologischer Methoden das Denken möglichst »sprachfrei« untersucht. Er fordert eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Linguisten und Psychologen. Verständlich, denn nur diese Strategie ist geeignet, des Autors eigene These zu untermauern.

Evans gelingt es, jenseits von Wehleidigkeit für einen klugen Umgang mit bedrohten Sprachen einzutreten – und bei der Gelegenheit auch die Techniken der Sprachaufzeichnung und -archivierung zu umreißen. Das Buch überzeugt als gelungene Mischung zwischen Forschungsbericht, Sprach- und Kulturreflexion und der Frage, was wir sinnvollerweise mit dem dabei erworbenen Wissen anfangen sollten.

#### **Annette Leßmöllmann**

Die Rezensentin ist Professorin für Wissenschaftskommunikation mit Schwerpunkt Linguistik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).



**GEHIRN  
UND  
GEIST**



**Andreas Jahn (Hrsg.)**

## **Wie das Denken erwachte**

### **Die Evolution des menschlichen Geistes**

Wie entstanden unser Denken und unsere Sprache? Wie intelligent sind wir wirklich? Was empfinden wir als attraktiv?

Fragen, die dieses Buch auf wissenschaftlich fundierte und gleichzeitig unterhaltsame Weise beleuchtet. Über alle Fachgebiete hinweg beleuchten renommierte Verhaltensforscher, Genetiker, Psychologen, Philosophen und Biologen, dass unser Denken und Verhalten auf unserem biologischen Erbe beruhen: Der Mensch ist ein Kind der Evolution. Erfahren Sie, wie und wieso wir wurden, was wir heute sind.

„Wie das Denken erwachte“ empfiehlt sich allen Leserinnen und Lesern, die an Neurowissenschaften und Evolution interessiert sind. Das Buch ist gleichzeitig ein spannender Fundus für Psychologen und Naturwissenschaftler.

2012. 158 Seiten, 26 Abb., kart.  
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)  
ISBN 978-3-7945-2869-1

#### **Jetzt bestellen!**

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



# ZU EINEM GESPRÄCH GEHÖREN ZWEI

VON ALEX SHVARTSMAN

Nach der Bruchlandung der Außerirdischen in Manhattan wurden unsere Gespräche einseitig. »Es war ein Unfall«, sagt Colette. »Ein tragischer Fehler. Sie wollten überhaupt niemanden verletzen.«

So plappert sie immer weiter. Ich schmolle.

Es gibt vielleicht sieben Milliarden Menschen auf der Erde, aber unser Planet ist größtenteils unbewohnt, mit vielen riesigen Leerräumen, selbst wenn man nur die Landmassen berücksichtigt. Wie groß ist dann die Wahrscheinlichkeit, dass diese Mistkerle von Tintenfischen ausgerechnet in eine der am dichtesten bewohnten Städte der Welt krachen – Bruchteile eines Prozents? Ein böser kosmischer Witz, nur liegen jetzt 20 000 Tote unter den Trümmern, und deren Familien lachen nicht.

Colette sieht immer nur das Gute in den Menschen, selbst wenn es gar keine Menschen sind. »Sie sind nicht perfekt, aber auch nicht böse. Es war eine harte Landung; ihr Schiff ist beim Eintritt in die Atmosphäre fast verglüht. Die wollten doch niemanden töten.«

Vor ein paar Jahren hat Captain Sully das Kunststück fertiggebracht, ein havariertes Passagierflugzeug im Hudson River zu wassern, und er war nur ein Mensch. Diese Aliens, die mit ihren Raumschiffen von Stern zu Stern fliegen, sollten mehr draufhaben. Ich wette, ihnen war es ganz einfach bloß egal.

»Warte nur ab, in einigen Jahren wird man sich an diesen Tag nicht wegen der tragischen Opfer erinnern, sondern weil wir nun endlich wissen, dass wir nicht allein im Universum sind.« Colette kann ihren einseitigen Standpunkt stundenlang aufrechterhalten. Sogar tagelang.

Wir sind wirklich ein seltsames Paar. Ich absolvierte zwei Einsätze im Irak, und sie demonstrierte gegen den Krieg. Ich bin still, und sie ist geschwätzig. Aber mit ihrem ununterbrochenen Geplauder half sie mir gegen die Albträume, den Tatterich und all die anderen komischen Abschiedsgeschenke, mit denen ich aus dem Krieg heimkehrte. Die Ärzte sprachen von Posttraumatischer Belastungsstörung; ich nannte es die Hölle.

Also höre ich zu, wie sie die Aliens verteidigt, und wenn ich es nicht mehr aushalte, verlasse ich schließlich für eine Weile das Haus.

Ich fahre zum Sunset Park; das ist unser Lieblingsplatz in Brooklyn, seit wir uns kennen. Wir kamen so gern hierher, um die Skyline von New York zu betrachten. Ich setze mich auf die Bank, auf der ich Colette den Heiratsantrag machte, und starre ins Leere – dorthin, wo früher die vertrauten Umrisse der Wolkenkratzer aufragten. Manhattan brennt noch immer. Asche treibt über das Wasser.

Das Schiff der Außerirdischen machte mehrere Häuserblocks im Süden Manhattans dem Erdboden gleich. Es richtete mehr Verwüstungen an als die Terroranschläge vom 11. September 2001. Hätte ein Terrorist mit einer nuklearen Kofferbombe dahintergesteckt, würden wir schon seine Hauptstadt bombardieren. Aber diesen Aliens vergeben wir einfach und empfangen sie mit offenen Armen?

Ich inhaliere den bitteren Rauch, und er erinnert mich an Tod und



Schmerz und Falludsch. Das ist nicht in Ordnung. So dürfen sie nicht davorkommen. Irgendjemand muss es den außerirdischen Schweinehunden doch heimzahlen.

Wieder zu Hause. Ich starre auf das Waffenarsenal, das ich auf der Werkbank in meiner Garage ausgebreitet habe. Die Pistole und das halb automatische Gewehr liegen seit dem Tag des Absturzes bereit. Seither sind zwei selbst gebastelte Sprengfallen hinzugekommen. Ich war fleißig.

Ich kann mich nahe heranpirschen. Ich kann bis zu den Polizeiabsperrungen spazieren, die das Schiff umgeben, und mich an Freund und Helfer vorbeidrängeln. Sie werden sich wahrscheinlich nicht groß anstrengen, mich aufzuhalten; seit die Bullen es tagtäglich mit trauernden Familien zu tun bekommen, müssen sie die Aliens fast genauso hassen wie ich. Und sobald ich bei den Dutzenden kleinen Tintenfischen bin, die – wie andauernd in den Nachrichten gezeigt – fleißig ihre Schiffshülle reparieren, kann ich das Feuer eröffnen. Ich wette, dass viele von ihnen

dran glauben werden, bevor mich jemand stoppen kann.

Das Einzige, was mich zurückhält, ist Colette. Sie verzeiht ihnen total und rückhaltlos.

Ich gehe in der Garage auf und ab und lasse mich von Colettes Stimme besänftigen.

Nach der Bruchlandung der Außerirdischen in Manhattan wurden unsere Gespräche einseitig. Nachdem das monströse Raumschiff Colettes Bürogebäude zerquetscht hatte. Unsere Gespräche sind einseitig, ganz einfach weil es keinen Sinn hat, den Toten zu widersprechen.

Das Einzige, was ich tun kann, ist, Colettes Andenken zu ehren. Und das tue ich jeden verdammten Tag, seit ich sie verloren habe.

Ich werfe der Werkbank noch einen letzten Blick zu und verlasse die Garage. Ich gehe zurück ins Haus, zurück in unser Schlafzimmer, das noch immer nach Colette duftet. Ich schließe die Augen, lausche ihrer Stimme in meinem Kopf und versuche mit aller Kraft, mich von ihr überzeugen zu lassen. 🚀

## DER AUTOR

**Alex Shvartsman** lebt als Schriftsteller und Spielentwickler in Brooklyn (New York). Über seine Erzählungen berichtet er unter [www.alexshvartsman.com](http://www.alexshvartsman.com).

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 510, S. 570, 26. Juni 2014

## Blutdrucksenker gegen Tumoren

Krebswucherungen besitzen oft eine ungewöhnlich dichte und feste Zwischenzellsubstanz. Sie schnürt die Blutgefäße ab und hindert Arzneistoffe daran, in den Tumor einzudringen. Abhilfe versprechen überraschenderweise Medikamente, die eigentlich zur Blutdruckregulation entwickelt wurden.



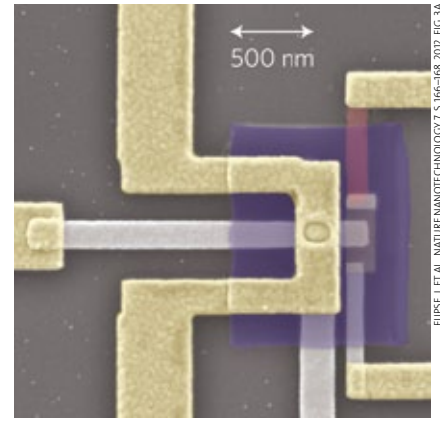
BRIAN STAUFFER

## Große Physik mit einfachen Mitteln

Manche Experimente sind einfach und durchführbar: Für die einen fehlt der passende Teilchenbeschleuniger, für andere bräuchte man ein Schwarzes Loch. Doch es gibt analoge Versuchsanordnungen, die man auf dem Labortisch aufbauen kann und die trotzdem weitreichende Erkenntnisse versprechen.

## Ein Suchprogramm für Plagiate

Eigentlich wollte ein Informatiker eine textanalytische Suchfunktion entwickeln, die ihm helfen sollte, medizinische Fachausdrücke besser zu verstehen. Doch zu seiner Überraschung lieferte das Programm Hinweise auf zahlreiche Plagiate in wissenschaftlichen Publikationen.



FURSE, J. ET AL. / NATURE NANOTECHNOLOGY 7, 5, 166–168, 2012, FIG. 3A

## Thermoelektrik der Zukunft

Noch ist vieles bloße Theorie. Doch eines Tages sollen winzige Temperaturunterschiede Strom liefern, der autarke Sensoren betreibt – dank Nanotechnologie und Spinelektronik.



M. PIJUK / EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

## Unser rätselhafter Verwandter

Der Denisovamensch lebte vor rund 40 000 Jahren im Altaigebirge. Sein Erbgut findet sich bis heute in Südostasien und Melanesien – und er war sowohl mit Neandertalern als auch mit einer frühen Menschenpopulation Spaniens nah verwandt.

## 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.de/newsletter](http://www.spektrum.de/newsletter)



# DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM  
SPEKTRUM DER  
WISSENSCHAFT-  
DIGITAL-  
ABO



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

So einfach erreichen Sie uns:

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

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

Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!







**AcademiaNet** ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

**AcademiaNet**, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**nature**

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

[www.academia-net.de](http://www.academia-net.de)