

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

NEUSTART  
GENTHERAPIE  
Überraschende  
Erfolge im  
zweiten Anlauf

FEBRUAR 2015

HIRNFORSCHUNG  
Rätselhaftes  
Supergedächtnis

SIMULATION  
Das erste vollständige Computer-  
modell einer Zelle

FOSSILIEN  
Mit Satelliten neue  
Fundstätten entdecken

## Wie kam es zum Big Bang?

Ein vierdimensionales Schwarzes Loch  
als Ursprung des Universums



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

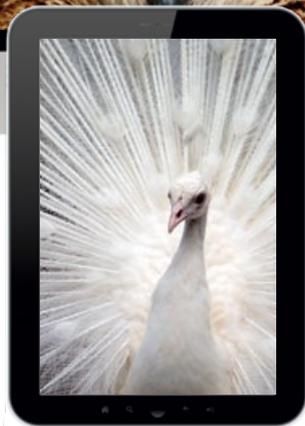


## Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin



### Jeden Donnerstag neu!

- mehr als 40 Seiten News, Hintergründe, Kommentare und Bilder aus der Forschung
- im Abo nur € 0,77 pro Ausgabe
- jederzeit kündbar
- mit exklusivem Artikel aus **nature** in deutscher Übersetzung
- als PDF einfach über E-Mail oder per Link zu beziehen



Lernen Sie **Spektrum – Die Woche** kostenlos kennen:

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



Carsten Könneker  
Chefredakteur  
koenneker@spektrum.de

## Physik, Fiktion, Physik

In den letzten Monaten las ich mehrere Romane, in denen Physiker nach Erklärungen für das Phänomen der Zeit suchen. In Juli Zehs Krimi »Schilf« etwa ringt ein Experte für Quantengravitation um eine eigene Theorie diskreter Zeit – sowie mit der für ihn untragbaren Sympathie eines ehemaligen Studienfreundes für die Hypothese des Multiversums. In Daniel Kehlmanns »Mahlers Zeit« entwickelt der Titelheld vier Formeln, welche die Umkehr des Zeitpfeils gestatten, indem sie den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik aushebeln. Thomas Lehr schließlich stellt in seinem Werk »42« eine Gruppe Physiker vor ein nie gekanntes Rätsel: An einem sonnigen Augusttag bleibt urplötzlich die Zeit stehen. Allein für 70 Besucher des CERN verstreicht sie weiter – so dass diese fortan zu einem Dasein in einer sommerlichen Dornröschenvelt verdammt sind.

Bei der Lektüre dieser Bücher habe ich mich dabei ertappt, zu überlegen, welche Artikel aus »Spektrum der Wissenschaft« die Autoren womöglich studiert haben, um die physikalischen Passagen in ihren Texten zu unterfüttern. Vor allem Juli Zeh zeigt sich hervorragend informiert über verschiedene von Physikern gehandelte Theorien: Kopenhagener Deutung, Paralleluniversen, Theory of Everything. Ob sie bei der Abfassung ihrer 2007 erschienenen Kriminalgeschichte unser Heft 8/2003 mit dem Titelthema »Parallele Universen« in den Händen hatte? So lässt sie an einer Stelle ihren Anhänger der Viele-Welten-Interpretation fragen: »Was wäre, wenn im Urknall nicht nur eine, sondern zehn hoch neunundfünfzig Welten entstanden wären? Mindestens eine davon mit Bedingungen, die der Mensch zum Leben braucht?«

Unser Titelthema zum Start der dreiteiligen Serie »Die Geburt des Universums« (ab S. 40) könnte eine Schatzkiste für weitere Autoren von Zeit-Romanen sein. Es verknüpft die Singularität des Urknalls mit jener eines Schwarzen Lochs, freilich eines ganz besonderen: eines Schwarzen Lochs, das in einem Universum mit vier Raumdimensionen unter der eigenen Schwerkraft kollabiert und dessen dreidimensionaler Ereignishorizont unser Universum ist.

Nein, bei dieser Hypothese handelt es sich keineswegs um eine literarische Spielerei. Im Gegenteil – sie löst elegant gleich mehrere fundamentale Fragen der Kosmologie. Und vor allem: Sie erscheint empirisch überprüfbar!

Eine anregende Lektüre wünscht  
Ihr

*Car R. Könnel*

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



**James L. McGaugh** und **Aurora LePort** von der University of California in Irvine beschreiben ab S. 34 psychologische und hirneurologische Untersuchungen an Personen mit schier unglaublichem Erinnerungsvermögen.



Wie entstand eigentlich die mittelalterliche Gesellschaft mit ihren Rittern und Königen? Die Historikerin **Stefanie Dick** von der Universität Kassel geht dem auf den Grund – im spätantiken Gallien (ab S. 52).



Der Paläontologe **Robert L. Anemone** von der University of North Carolina (links) und der Geograf **Charles W. Emerson** von der Western Michigan University haben sich zusammengetan, um die Fossiliensuche mit Satellitenhilfe zu beschleunigen (ab S. 70).

3 Editorial

6 **Spektrogramm**

Kühlende Beschichtung • Kohlenstoff im Erdkern • Simulierter Raumzeitstrudel • Händetrockner als Mikrobenschleudern • Urgeschichtliche Ritzmuster • Zitteraale auf der Jagd

9 **Bild des Monats**

Staubkorngroße Statue aus dem 3-D-Drucker

10 **Forschung aktuell**

**Die Suche nach Golgota**  
Archäologen auf der Spur der Hinrichtungsstätte

**Demenz in der Petrischale**  
Erstes präzises Modell der Alzheimerkrankheit

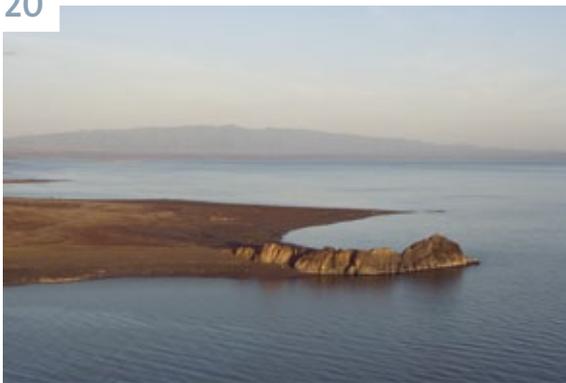
**Der Origami-Roboter**  
Ein Kleingerät kommt aus der Druckerpresse, faltet

sich selbsttätig zusammen und läuft davon

**Fotosynthese im Turbogang**  
Besseres Bakterienenzym in Pflanzen eingebaut

SPRINGER'S EINWÜRFE  
**Rezept gegen Fremdenhass**  
Wie persönlicher Kontakt soziale Vorurteile abbaut

20



NATIONAL GEOGRAPHIC / MICHAEL POLIZA

34



MITCH PAYNE

58



FONDATION DU PATRIMOINE - DÉLÉGATION RÉGIONALE MIDI-PYRÉNÉES

BIOLOGIE & MEDIZIN

SERIE »EVOLUTION DES MENSCHEN« TEIL 2

20 **Menschenevolution durch Klimaschwankungen**

Abwechselnd feuchte und trockene Zeiten förderten nützliche Eigenschaften wie Flexibilität.

*Peter B. deMenocal*

▶ 28 **Gentherapie, zweiter Anlauf**

Nach tragischen Fehlschlägen wurde es ruhig um die Gentherapie. Nun scheint ihr Comeback bevorzustehen.

*Ricki Lewis*

▶ 34 **Die totale Erinnerung**

Manche Menschen können lange zurückliegende Erlebnisse detailliert wachrufen. Was befähigt sie dazu?

*James L. McGaugh und Aurora LePort*

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

48 **Das Ende des Teekanneneffekts**

Hydrophobe Tüllen gegen tropfende Tee- und Kaffeekannen.

*H. Joachim Schlichting*

MENSCH & KULTUR

SCHWERPUNKT »AUFBRUCH INS MITTELALTER«

52 **Barbaren auf dem Thron**

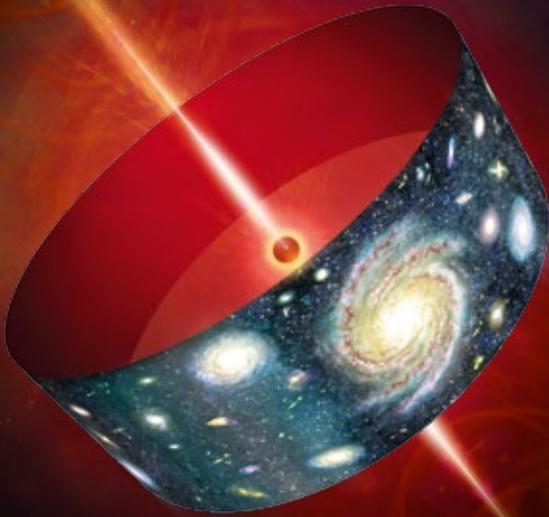
Im späten 5. Jahrhundert avancierten germanische Anführer zu Königen auf einst römischem Boden.

*Stefanie Dick*

58 **Stadt, Land, Flucht**

Archäologen revidieren verbreitete Ansichten über die Auswirkungen der »Völkerwanderung«.

*Christian Witschel*



► TITELTHEMA

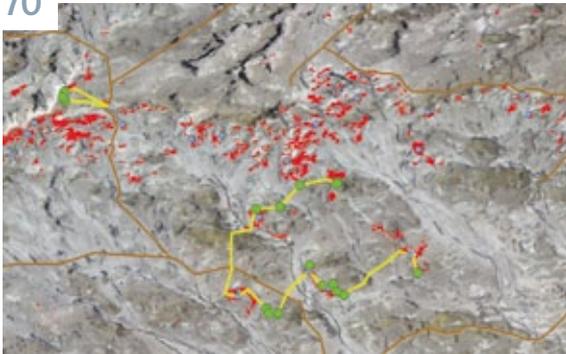
SERIE »DIE GEBURT DES UNIVERSUMS« TEIL 1

## 40 Das Schwarze Loch am Beginn der Zeit

Nach gängiger Auffassung begann das Weltall mit der »Singularität« des Urknalls – einem Zustand, bei dem alle physikalischen Beschreibungen versagen. Eine neue Hypothese postuliert stattdessen ein Schwarzes Loch in einem höherdimensionalen Universum.

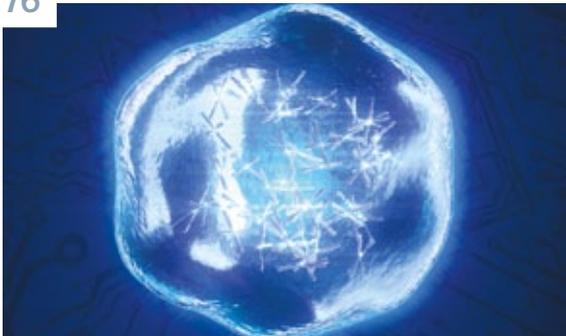
*Niyesh Afshordi, Robert B. Mann und Razieh Pourhasan*

70



SATELLITENBILD: USGS; BEARBEITUNG: CHARLES W. EMERSON UND ROBERT L. ANEMONE

76



ANDRÉ KUTSCHERAUER

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### 64 Die Tücken des Bilderaufhängens

Kann man die Aufhängungsschnur so um mehrere Nägel schlingen, dass das Bild herunterfällt, wenn man nur einen einzigen Nagel zieht?

*Jean-Paul Delahaye*

ERDE & UMWELT

### ► 70 Satellitengestützte Fossiliensuche

Mit Hilfe spektroskopischer Daten aus dem All lassen sich Fossilagerstätten gezielt aufspüren.

*Robert L. Anemone und Charles W. Emerson*

TECHNIK & COMPUTER

### ► 76 Die simulierte Zelle

Erstmals ist es gelungen, ein vollständiges Computermodell eines einzelligen Organismus zu entwickeln.

*Markus W. Covert*

### 85 Wissenschaft im Rückblick

Vom Namibwind zum Kiefernadeldosimeter

### 86 Rezensionen

*Luc Semal: Bestiarium* • *Ina Wunn et al.: Götter, Gene, Genesis* • *John Craig Venter: Leben aus dem Labor* • *Norman Sieroka: Philosophie der Physik* • *László Borhy: Die Römer in Ungarn* • *Rudolf Simek: Die Schiffe der Wikinger u. a.*

### 94 Leserbrief/Impressum

### 96 Futur III

*S.R. Algernon: Endlich daheim*

### 98 Vorschau

Titelmotiv: Kenn Brown, Mondolithic Studios  
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

MATERIALWISSENSCHAFT

# Passiv kühlende Schichten

Systeme technisch zu kühlen, kostet viel Energie. Abhilfe könnte eine neue Beschichtung schaffen, die Forscher der Stanford University (USA) entwickelt haben: Mehrere Lagen aus Silizium- und Hafniumdioxid, die zusammen knapp zwei Mikrometer (millionstel Meter) dick sind, geben in der Summe mehr Wärme ab, als sie durch Absorption von Licht und Umgebungswärme aufnehmen.

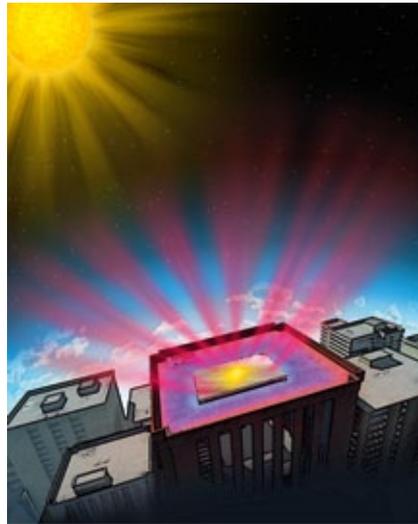
Das Material reflektiert fast das gesamte einfallende Sonnenlicht und erhitzt sich deshalb kaum. Zudem setzt es einen Teil seiner Wärmeenergie in Form von Infrarotstrahlung frei. Normalerweise würde diese Strahlung

die Umgebungsluft erwärmen und diese wiederum die Beschichtung, so dass sich die Temperaturen lediglich angleichen würden. Das Material emittiert die Wärmeenergie allerdings als besonders langwellige Infrarot-

strahlung, die nicht mit der Umgebungsluft wechselwirkt, sondern stattdessen ungehindert die Atmosphäre passiert und in den Weltraum entweicht. Auf diese Weise nimmt es eine Temperatur an, die tatsächlich um bis zu fünf Grad unterhalb jener der Umgebung liegt.

Noch ist das Verfahren nicht so weit ausgereift, dass man damit ganze Gebäude kühlen könnte: Der Prototyp besitzt bislang nur die Größe eines Tellers. Zudem müsste die Beschichtung die Wärme aus dem Inneren des Hauses effizient aufnehmen und nach außen abstrahlen. Gelänge dies allerdings großflächig, ließe sich damit der weltweite Energieverbrauch beträchtlich reduzieren, gehen doch beispielsweise fast 15 Prozent des Stromverbrauchs in den USA auf die Nutzung von Klimaanlagen zurück.

*Nature 515, S. 540–544, 2014*



PAN LAB, STANFORD ENGINEERING

Beschichtungen aus Silizium- und Hafniumdioxid wirken wie Spiegel und Wärmestrahler zugleich. Dadurch sind sie kühler als die Umgebung.



**Mehr Aktualität!**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

GEOLOGIE

## Ist der Erdkern stark kohlenstoffhaltig?

Zwei Drittel des Kohlenstoffs der Erde könnten im inneren Erdkern stecken. Zu diesem Schluss kommen Forscher um Bin Chen von der University of Michigan (USA), die ein neues Modell zum Erdaufbau entwickelt haben. Ihre Versuche und Berechnungen stützen die Annahme, das Zentrum unseres Planeten setze sich aus dem Eisenkarbid  $Fe_7C_3$  zusammen.

Bislang gingen viele Geologen davon aus, der innere Erdkern bestehe hauptsächlich aus kristallinem Eisen mit Beimischungen aus Nickel und anderen Elementen. Bestimmte seismische Wellen bewegen sich jedoch nur halb so schnell durch den Erdkern, wie es dann zu erwarten wäre. Die Diskrepanz haben Wissenschaftler zu erklären versucht, indem sie höhere Anteile an Schwefel, Kohlen-, Sauer- und Wasserstoff im Erdkern postulier-

ten – oder durch die Annahme, der Kern sei teilweise flüssig. Das wirft aber wieder neue Verständnisschwierigkeiten auf.

Postuliere man, dass der innere Kern aus dem Eisenkarbid  $Fe_7C_3$  besteht, ließen sich die experimentellen Befunde sinnvoll zusammenführen, meinen die Forscher. In Versuchen mit Diamantstempelzellen haben sie die Geschwindigkeit seismischer Wellen in dieser Verbindung gemessen – bei Drücken, die denen im Erdkern einigermaßen nahekommen. Das Eisenkarbid verlangsamt die Wellen im erforderlichen Ausmaß, ohne dass man von einer teilweise flüssigen Konsistenz des Erdzentrums ausgehen müsse. Zudem liege seine Dichte in einem Bereich, der mit den experimentellen Befunden übereinstimmt.

*PNAS 10.1073/pnas.1411154111, 2014*

## PHYSIK

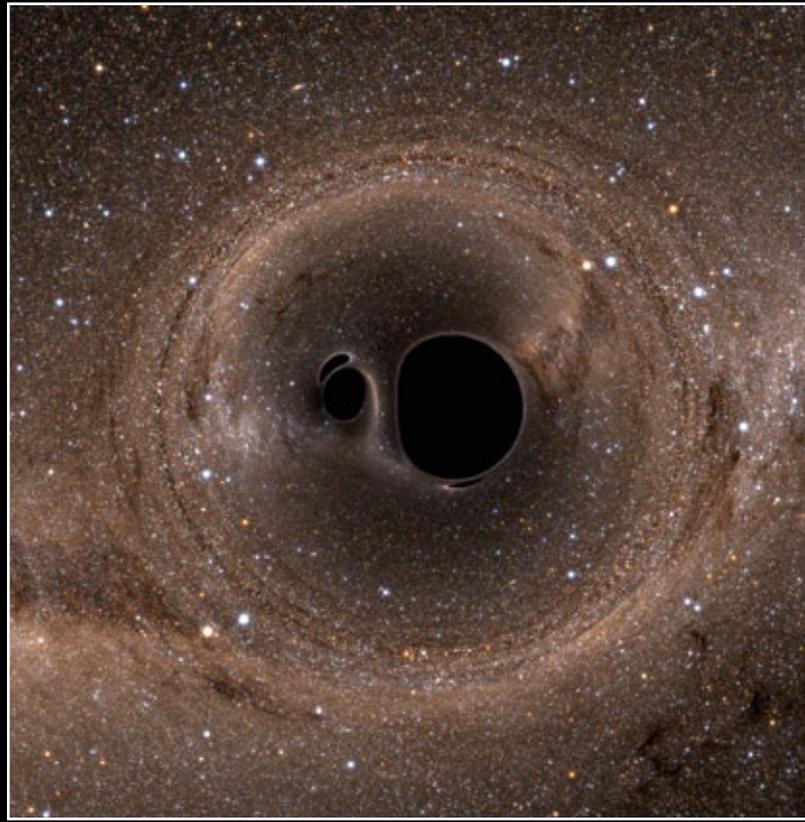
# Blick auf einen Raumzeitstrudel

Physiker um Andy Bohn von der Cornell University haben mit Computern simuliert, wie ein Raumzeitstrudel aussehen könnte, den zwei sich umkreisende Schwarze Löcher erzeugen. Auf Grund ihrer extrem hohen Massendichte krümmen diese Objekte den Raum und die Zeit; ihre Bewegung umeinander bewirkt darüber hinaus eine Verwirbelung derselben. Der dabei entstehende Strudel ist für sich genommen unsichtbar. Wenn ihn jedoch Lichtstrahlen durchkreuzen, die etwa von Hintergrundsternen ausgehen, werden sie vielfach gekrümmt und auf verschlungene Bahnen gelenkt. Ein Betrachter, der auf das Gebilde schaut, sieht daher ein verzerrtes Abbild des Hintergrunds.

Um die verworrenen Pfade des Lichts nachzustellen, nutzten die Forscher bereits bestehende Modelle zum Simulieren verwirbelter Raumzeiten. Eine Technik namens »Raycasting«, mit der sich dreidimensionale Computergrafiken erstellen lassen, half ihnen, die Wege des Lichts von der Quelle zum Beobachter zu berechnen. Die so erzeugten Bilder zeigen eigentümliche Strukturen bis hin zu Fraktalen. Ob sie das Geschehen im Umfeld einander umkreisender Schwarzer Löcher allerdings tatsächlich realistisch abbilden, wird sich empirisch nur mit verbesserter Teleskoptechnik untersuchen lassen.

*arXiv 1410.7775, 2014*

SIMULATING EXTREME SPACETIMES, ANDY BOHN, FRANÇOIS HÉBERT, WILLIAM THROWE, DARIUS BUNANDAR, KATHERINE HENRIKSSON, MARK A. SCHEEL UND NICHOLAS W. TAYLOR



Zwei Schwarze Löcher verwirbeln in einer Simulation das vom Hintergrund stammende Licht.

## HYGIENE

# Warmluft-Händetrockner sind Bakterienschleudern

Moderne Express-Händetrockner, die mit intensiven Warmluftstrahlen (»Jets«) arbeiten, verteilen massenweise Bakterien in der Luft. In der Nähe der Geräte ist die Keimbelastung fast 30-mal so hoch wie im Umfeld eines Papierhandtuchspenders.

Mikrobiologen um Mark Wilcox vom Leeds Teaching Hospitals Trust (England) führten Versuche mit verschiedenen Trocknern durch. Sie trugen auf die Hände von Versuchsteilnehmern medizinisch unbedenkliche Milchsäure-

bakterien auf. Anschließend sollten die Probanden sich je 15 Sekunden lang die Hände trocknen – entweder mit Papierhandtüchern, einem normalen Warmluftgebläse oder einem Jet-Trockner. Rund um letzteres Gerät waren daraufhin fünfmal so viele Mikroben in der Luft nachweisbar wie in der Nähe von Warmluftgebläsen – und 27-mal so viele wie in der Nähe von Papiertuchspendern. In einem weiteren Versuch benetzten die Teilnehmer ihre Hände mit einer Farblösung und trockneten sie anschließend. Auch hier zeigte sich, dass beim Expressföhnen deutlich mehr Tröpfchen in die Luft gewirbelt werden als bei den anderen Methoden.

Laut den Forschern sollten Warmlufttrockner nicht in medizinischen Einrichtungen eingesetzt werden, weil sie potenziell krankheitserregende Mikroorganismen in der Umgebung verteilen. So könnte ein infizierter Patient, der sich die Hände schlecht gewaschen hat und den Lufttrockner benutzt, andere WC-Besucher mit seinen Keimen anstecken.

*J. Hosp. Infect. 88, S. 199–206, 2014*



Der starke Luftstrom, den Jet-Händetrockner erzeugen, reißt Mikroben von der Haut und verteilt sie in der Luft.

MICHAEL GOFF / GETTY IMAGES (REPRINTED WITH PERMISSIONS ONLY) / GETTY IMAGES (REPRINTED WITH PERMISSIONS ONLY)

ARCHÄOLOGIE

## Urgeschichtliche Ritzmuster

Offenbar ritzten bereits Vorfahren des modernen Menschen geometrische Muster in Gegenstände, um sie zu kennzeichnen oder zu schmücken. Darauf deutet eine Muschelschale hin, die jetzt in einem Museumsarchiv gefunden wurde. Die Schale stammt aus einer Sedimentschicht am Ufer

des Flusses Solo in Ostjava, von der Fundstelle des berühmten Java-Menschen. Paläoanthropologen ordnen dessen Fossilien heute dem *Homo erectus* zu, einer ausgestorbenen Menschenart.

Wissenschaftler um Josephine Joordens von der Universität Leiden

hatten die fossilen Muschelschalen untersucht, um mehr über die Ernährungsgewohnheiten von *Homo erectus* herauszufinden. Dabei fiel ihnen ein Rillenmuster auf, das in eine Schale hineingekratzt worden war. Isotopen- und Lumineszenzmessungen ergaben, dass die Sedimentreste, die an der Schale haften, etwa 500 000 Jahre alt sind. Das Muster ritzte demnach wahrscheinlich ein *Homo erectus* ein, jedenfalls kein *Homo sapiens*.

Die Gravuren sind heute kaum noch zu erkennen. Das war vor einer halben Million Jahren vermutlich anders, als die Schale noch eine dunklere Färbung besaß. Über die Bedeutung der Kratzspuren kann nur spekuliert werden – möglicherweise waren es Verzierungen. In jedem Fall sind sie beträchtlich älter als die ältesten bisher bekannten Ritzmuster, schreiben die Forscher.

*Nature* 10.1038/nature13962, 2014



Eine Art Zickzacklinie zierte diese Muschelschale. Wer sie einritzte und warum, ist unbekannt. Wahrscheinlich wurde das Artefakt von einem Vertreter einer heute ausgestorbenen Menschenart angefertigt.

WIM LUSTENHOUWER, VRIJE UNIVERSITEIT AMSTERDAM

BIOLOGIE

## Zitteraale zwingen Beutetiere, sich selbst zu verraten

Seine Fähigkeit, Stromstöße auszu-teilen, nutzt der Zitteraal (*Electrophorus electricus*) für die Jagd auf Beutetiere, vorwiegend Fische. Dabei lähmt er seine Opfer allerdings nicht nur, sondern bringt sie auch zum Zappeln, so dass er sie besser orten kann. Das berichtet der Biologe Kenneth Catania von der Vanderbilt University in Nashville (USA).

Dem Forscher zufolge setzen Zitteraale unterschiedliche Typen von elektrischen Entladungen ein. Mit schwachen Pulsen erkunden sie ihre Umgebung. Mit einer schnellen Abfolge aus mehreren dutzend starken Entladungen hingegen lähmen sie

ihre Beutetiere und schnappen sie dann; die Pulsfrequenz erreicht dabei mehrere hundert Hertz. Neben diesen beiden Methoden wenden die Raubfische noch eine dritte an: einen Doppel- oder Dreifachpuls hoher Intensität. Er zwingt die Opfer zu starken Zuckungen, die dem Zitteraal

verraten, wo sich die Beute befindet – woraufhin er den eigentlichen Angriff startet.

Zitteraale leben in schlammigen, trüben Gewässern mit schlechten Sichtverhältnissen. Statt ihrer Augen nutzen sie Elektrizitätsorgane (umgebildete Muskeln), um sich zu orientieren und zu jagen. Die abgegebenen Stromstöße werden von lebenden und toten Objekten unterschiedlich gut geleitet, was den Zitteraal dazu befähigt, Beutetiere wahrzunehmen. Die Räuber können Pulse mit einer Spannung von bis zu 500 Volt erzeugen, wobei die elektrische Leistung 400 Watt übersteigt. Es handelt sich bei den Tieren allerdings nicht wirklich um Aale, wie der Name suggeriert, sondern um Neuwelt-Messerfische.

*Science* 346, S. 1231–1234, 2014

Der Zitteraal jagt Fische mit Stromstößen.



KENNETH CATANIA, VANDERBILT UNIVERSITY



## STAUBKORNGROSSE STATUE AUS DEM 3-D-DRUCKER

Der Londoner Künstler Jonty Hurwitz schuf diese winzige Skulptur. Die Figur mit rund 100 Mikrometer Höhe ist kleiner als der Durchmesser eines menschlichen Haars, wie das elektronenmikroskopische Bild demonstriert, und entstand mit Hilfe eines 3-D-Druckverfahrens. Bei der Multiphotonenlithografie härtet ein Laser in seinem wenige zehn Nanometer großen Fokuspunkt schrittweise einen Fotolack. So formt dieser innerhalb von Minuten komplexe, feste Strukturen – normalerweise für nanotechnologische Anwendungen.

# Die Suche nach Golgota

Ausgrabungen in der Altstadt Jerusalems liefern neue Indizien für eine bis in die Antike zurückreichende Vermutung: Ein Felsen in der Grabeskirche war die im Neuen Testament erwähnte Hinrichtungsstätte Jesu.

VON MARCEL SERR

Eine zentrale Frage der so genannten Biblischen Archäologie lautet: Wo genau liegen die Orte, die im Neuen Testament genannt sind? Häufig beruht ihre Lokalisierung auf Jahrhunderte nach den geschilderten Ereignissen entstandenen Legenden. Eine der wenigen Ausnahmen stellt der Golgota-Fels dar, an dem Jesus laut den biblischen Berichten gekreuzigt wurde. Denn diese Stätte wird schon seit der Antike in der »Grabeskirche« inmitten der Altstadt Jerusalems verortet. Bereits im 4. Jahrhundert ließ der römische Kaiser Konstantin der Große an dieser Stelle ein Gotteshaus errichten. Es wurde jedoch 1009 durch den Fatimiden-Kalifen al-Hakim zerstört; die heute sichtbare Baustruktur geht im Wesentlichen auf die Kreuzfahrer des 12. Jahrhunderts zurück. Das konstantinische Gotteshaus war wesentlich größer und imposanter als der mittelalterliche Bau. Es bestand aus einer fünfschiffigen Basilika, einer Rotunde über dem vermeint-

lichen Grab Jesu sowie einem Atrium, in dem Golgota, der Ort der Hinrichtung, verortet wurde.

Diese Annahme stützte sich vermutlich auf eine lokale Tradition. Die früheste außerbiblische Erwähnung findet sich schon in den Schriften von Melito, der Mitte des 2. Jahrhunderts Bischof von Sardes war. Auch die Evangelien geben Hinweise auf die Kreuzigungsstätte. Zwar waren ihre Autoren keine Augenzeugen der Ereignisse, denn sie schrieben die Texte zwischen 60 und 110. Im Vergleich zu anderen antiken Texten, die oftmals mit deutlich größerem zeitlichem Abstand verfasst wurden, handelt es sich hierbei jedoch um noch nahezu zeitgenössische Quellen. Die Evangelien verfolgen zweifelsohne auch eine religiöse Agenda. Dennoch lassen sich bei kritischer Lesart – etwa durch Überprüfung der Plausibilität der Aussagen – wichtige Erkenntnisse gewinnen.

Im Zuge der ersten archäologischen Auseinandersetzung mit den bibli-

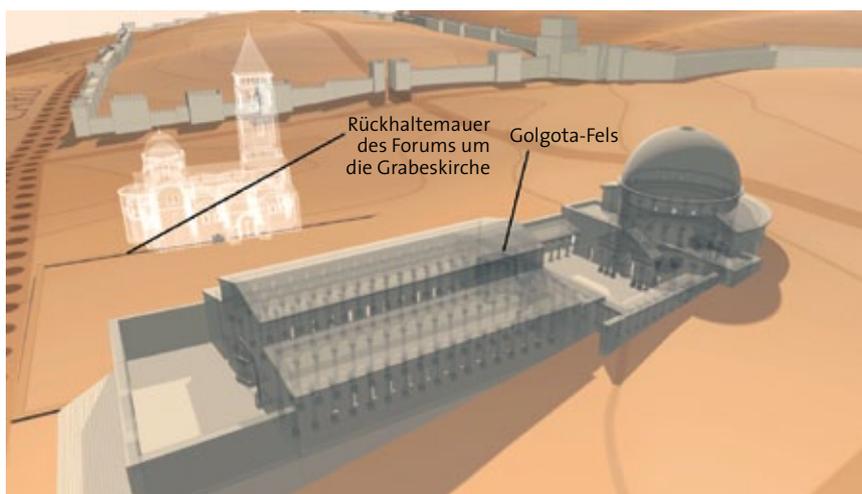
schen Schriften im 19. Jahrhundert geriet die Lokalisierung Golgotas mit dem Felsen in der Grabeskirche in Zweifel. Inzwischen wird sie aber in der Fachwelt weitgehend akzeptiert, nicht zuletzt dank der Grabungen des Deutschen Evangelischen Instituts für Altertumswissenschaft des Heiligen Landes (DEI) in Jerusalem.

## Weithin sichtbare »Schädelhöhe«

Die wörtliche Übersetzung der griechischen Bezeichnung Golgota lautet »Schädelhöhe«, offenbar handelte es sich also um eine Anhöhe. Das bestätigt auch die Schilderung der Evangelien, wonach die Angehörigen der Kreuzigung »von Weitem« zugesehen haben. Diese Hinweise in den Quellen sind plausibel, denn die Wahl einer Erhebung im Gelände wäre für die römischen Behörden sinnvoll gewesen: Hinrichtungen dienten der Abschreckung und sollten daher weithin sichtbar sein.

Heute ist dieser Aspekt für Besucher des Golgota-Felsens bloß noch eingeschränkt nachvollziehbar, erhebt er sich doch nur gut vier Meter über dem Bodenniveau der Grabeskirche. Vor 2000 Jahren lag das Straßenniveau jedoch deutlich tiefer. Außerdem wurde laut dem Bericht des zeitgenössischen christlichen Arztes und Historikers Yahya von Antiochien bei der Zerstörung der konstantinischen Grabeskirche auch versucht, den Golgota-Felsen zu zerstören. Sehr wahrscheinlich wurden dabei einige Meter des Felsens abgeschlagen.

Den Evangelien ist weiter zu entnehmen, dass man Jesus zur Kreuzigung aus der Stadt hinausführte. Auch hierbei handelt es sich um einen schlüssigen Hinweis in den Quellen. Denn es



Der Golgota-Felsen in der Grabeskirche gilt viele Gläubigen als die biblische Kreuzigungsstätte Christi. Archäologische Grabungen in der nahen Erlöserkirche bestätigen dies nun.

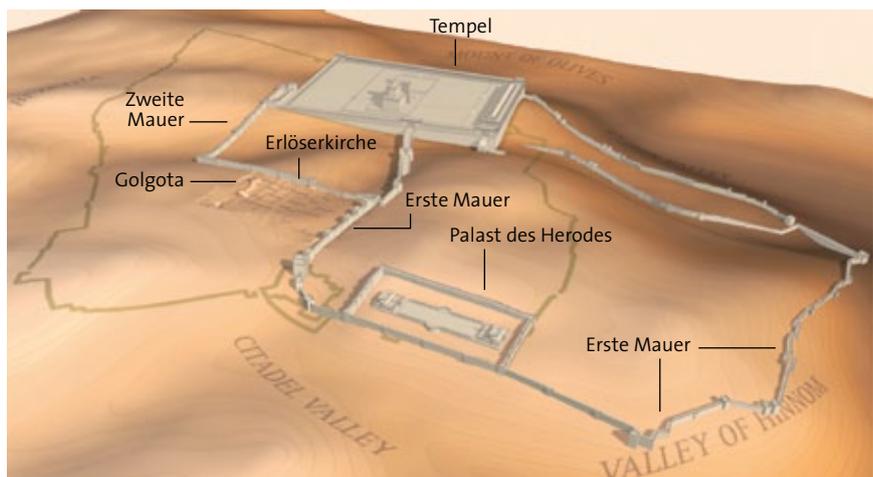


MARCELSERK

Wo heute die Erlöserkirche steht (Foto), befand sich in antiker Zeit ein Steinbruch. Das Areal lag daher sicher außerhalb der Stadtmauer.

entsprach römischer Praxis, Hinrichtungen vor den Stadtmauern durchzuführen. Diesem Hinweis folgend versuchen Archäologen schon seit dem 19. Jahrhundert den einstigen Mauerverlauf nachzuvollziehen.

Der jüdische Historiker Flavius Josephus (etwa 37–100 n. Chr.) berichtet, dass Jerusalem zur Zeit Jesu zwei Stadtmauern besaß. Der von ihm als Erste Mauer bezeichnete Wall ließ sich durch verschiedene Grabungen im 20. Jahrhundert in und um die Jerusalemer Altstadt beispielsweise auf dem Gelände der »David-Zitadelle« archäologisch gut nachweisen. Anders die Josephus zufolge im 1. Jahrhundert v. Chr. erbaute Zweite Mauer. Sie sollte ein neues Stadtviertel schützen. Wahrscheinlich begann sie irgendwo im nördlichen Abschnitt der älteren Wehranlage und endete an der Burg Antonia, einer unter



ARCHIMETRIX, CORNELIA PANNECK UND HOLGER SIEGEL, GBR

Herodes dem Großen errichteten und dem römischen Feldherrn Marcus Antonius gewidmeten Festung. Heute liegt die Mauer wohl zum Großteil unter dem muslimischen Viertel der Altstadt, wo Grabungen aus politischen Gründen heikel sind.

Bei Bauarbeiten in den 1890er Jahren für die vom deutschen Kaiser Wilhelm II. in Auftrag gegebene »Erlöserkirche«, nur wenige Meter von der Grabeskirche entfernt, stieß man tatsächlich auf eine

Mauer, die Gelehrte damals für die gesuchte zweite Stadtmauer hielten. Sie ignorierten jedoch geflissentlich die viel zu schwächliche Dicke von 1,5 Metern.

Notwendige Renovierungen in der Erlöserkirche in den Jahren 1970 bis 1974 ermöglichten gezielte Grabungen unter dem Gebäude, die 2010 bis 2012 fortgeführt wurden. Dabei stellte sich heraus, dass das fragliche Bauwerk wahrscheinlich als Rückhaltewand für das konstantinische Forum diente, ei-

nen leicht erhöht angelegten öffentlichen Platz um die Grabeskirche.

Durch einen so genannten Tiefchnitt durch die Siedlungsschichten stießen die Archäologen gut 14 Meter unter dem heutigen Bodenniveau der Erlöserkirche auf das Grundgestein und entdeckten einen Steinbruch. Weitere Grabungen im Umfeld beider Goteshäuser belegen, dass in der Antike auf dem Gelände großflächig Steine gebrochen wurden. Aus Keramik- und Münzfunden ließ sich ableiten, dass man auch unter der Erlöserkirche bis ins 1. Jahrhundert v. Chr. Steine abbauete. Da sich ein solcher Wirtschaftsbetrieb eher nicht innerhalb der Mauern einer Stadt befand – dies wäre Platzverschwendung gewesen –, lag der Golgota-Felsen also außerhalb.

Des Weiteren gelang es den Archäologen des DEI, die Siedlungsschicht des 1. Jahrhunderts zu identifizieren. Der heutige Golgota-Felsen liegt etwa 20 Meter höher, hätte also die erforderliche Sichtbarkeit gehabt. Darüber hinaus fanden sich in dieser Schicht Hinweise auf Landwirtschaft und Nutzgärten, beispielsweise Pflugspuren und ein 70 Zentimeter hohes Mäuerchen, wie man es zur Abtrennung von Parzellen errichtete. Dieser Befund passt zu Schilderungen der Evangelien, denen zufolge die Kreuzigung nahe von Gärten und Feldern stattfand.

Gegenwärtig sucht unser Team unter Leitung des Biblischen Archäologen Dieter Vieweger weiter nach der Zweiten Mauer. Wir vermuten sie 5 bis 20 Meter östlich der Erlöserkirche. Die

politische Situation in der Jerusalemer Altstadt erschwert jedoch das weitere Vorgehen. Daher soll ein Georadar oberflächennahe Objekte aufspüren. Allerdings stören die dichte Bebauung und die zahlreichen Eingriffe in das Terrain im Lauf von 2000 Jahren Besiedlung die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Erdboden. Derzeit optimiert das Team von Jürgen Sachs von der Technischen Universität Ilmenau die Geräte und die bildgebende Software, um auch geringe Kontrastunterschiede sichtbar zu machen.

---

**Marcel Serr**, Historiker und Politikwissenschaftler, ist wissenschaftlicher Assistent am Deutschen Evangelischen Institut für Altertumswissenschaft des Heiligen Landes (DEI) in Jerusalem.

---

## MEDIZIN

# Alzheimerforschung in der Petrischale

Erstmals haben Forscher an Hirnzellen ein Modell zur Entstehung der Alzheimererkrankung nachverfolgt.

VON CHRISTIAN WOLF

Um Medikamente gegen die Alzheimerdemenz zu entwickeln, fahnden Wissenschaftler seit Jahrzehnten nach den molekularen Auslösern für die Degeneration von Hirnzellen. Zwei Proteine fielen ihnen besonders auf: Beta-Amyloid und Tau. Beide Moleküle entdeckten sie in Form von Ablagerungen in den Gehirnen Betroffener. Inwiefern diese aber tatsächlich für das Absterben der Neurone verantwortlich sind, ist nicht geklärt. Klumpen aus Beta-Amyloid-Molekülen (so genannte amyloide Plaques) stören die Kommunikation zwischen Neuronen und könnten schließlich für deren Absterben sorgen. Die Bildung von amyloiden Plaques korreliert jedoch nicht immer mit dem Verlust von Gehirnzellen. Deshalb werden auch neurofibrilläre Faserbündel (Tangles) aus Tau-Proteinen verdächtigt, für die fatalen Abläufe

verantwortlich zu sein. Heutzutage vermuten viele Wissenschaftler, dass die beiden Moleküle erst im Zusammenspiel ihre tödliche Wirkung entfalten: Amyloide Plaques könnten die Anlagerung von Bündeln aus Tau-Proteinen ermöglichen und dadurch Neurone schädigen. Wissenschaftler um den Neurologen Rudolph Tanzi vom General Hospital in Charlestown (Massachusetts) haben nun ein Labormodell entwickelt, in dem sie diese Abfolge tatsächlich nachweisen konnten (*Nature* 515, S. 274–278, 2014).

Bis dato sind alle Versuche gescheitert, die beiden pathologischen Ereignisse miteinander zu verknüpfen: Mäuse mit bestimmten Genvarianten, die beim Menschen die erbliche Form der Alzheimerkrankheit verursachen, entwickelten amyloide Plaques und zeigten Gedächtnisstörungen. Tangles

aus Tau-Proteinen konnten Forscher bei ihnen allerdings nicht finden. In anderen Tiermodellen wiederum entdeckten sie zwar Tau-Faserbündel, aber keine amyloiden Plaques. Studien an menschlichen Zellkulturen waren nicht aufschlussreicher: Kultivierte Nervenzellen von Alzheimerpatienten bildeten zwar sowohl toxisches Beta-Amyloid als auch stark phosphorylierte Tau-Proteine. Beides sind Vorstufen von amyloiden Plaques beziehungsweise von Tau-Bündeln. Doch diese selbst ließen sich in den Zellkulturen nicht nachweisen.

Mit Hilfe eines Virus schleuste das Team von Tanzi mutierte Versionen der beiden Gene, die für die erbliche Form der Alzheimerkrankheit verantwortlich sind, in menschliche neuronale Stammzellen ein. Bei dem einen Gen handelte es sich um den Bauplan für das Amylo-

id-Vorläuferprotein, aus dem das Amyloid-Molekül durch Spaltung entsteht. Das andere kodiert für das Molekül Präsenilin, das wiederum an der Synthese des Vorläuferproteins beteiligt ist.

Zunächst ließen Tanzi und seine Kollegen die Zellen in einer Nährflüssigkeit in herkömmlichen Petrischalen wachsen. Die meisten Stammzellen differenzierten sich nach wenigen Wochen zu Neuronen aus. Im Vergleich zu normalen Zellen wiesen die mutierten 9- bis 17-fach höhere Beta-Amyloid-Werte auf. Amyloide Plaques konnten die Forscher allerdings nicht beobachten, da sich das Molekül vermutlich rasch in der Nährflüssigkeit verteilte.

### Amyloid oder Tau: Wer macht den Anfang?

Um die natürliche Umgebung im Gehirn besser zu imitieren, züchteten sie die Neurone deshalb innerhalb eines dreidimensionalen Gels. Erwartungsgemäß entwickelten diese sich nun zu reiferen, stärker differenzierten Nervenzellen. Zudem konnte sich Beta-Amyloid in dem Gel – ähnlich wie im Gehirn – weniger stark ausbreiten als in der Petrischale, was das Ansammeln des Moleküls begünstigte. Tatsächlich fanden die Forscher nun große Amylo-

id-Ablagerungen in den Zellen mit den mutierten Genen. Außerdem stießen sie, im Vergleich zu den Neuronen in den Petrischalen, auf eine größere Anzahl von Tau-Protein-Varianten, die der Verklumpung vermutlich vorangehen. Und sogar Ansammlungen von phosphoryliertem Tau traten in den Zellkörpern und -fortsätzen auf – wie es die Amyloid-Hypothese vorhersagt.

Anschließend versuchten die Wissenschaftler das Ablagern von Amyloid-Molekülen zu stoppen: Sie blockierten das Enzym Beta-Sekretase, das für die Spaltung des Amyloid-Vorläuferproteins wichtig ist. Tatsächlich sank die Beta-Amyloid-Konzentration merklich und ebenso die von Tau. Das Team um Tanzi sieht darin einen Beleg dafür, dass erst die Beta-Amyloid-Plaques die Ansammlungen von Tau-Proteinen in den mutierten Zellen verursacht hatten.

Um ihre Hypothese zu überprüfen, unterbanden die Forscher anschließend die Tau-Anhäufungen: Sie blockierten das Enzym GSK3B (Glykogensynthase-Kinase 3 beta) und verhinderten damit die Phosphorylierung der Tau-Proteine. Tatsächlich gab es nun weniger Tau-Verklumpungen in den Zellen, die Ablagerungen von Beta-

Amyloid blieben jedoch gleich hoch – ein Hinweis dafür, dass die Beta-Amyloid-Ansammlungen denen von Tau vorausgehen und nicht umgekehrt.

### Neues Modell bietet Chancen

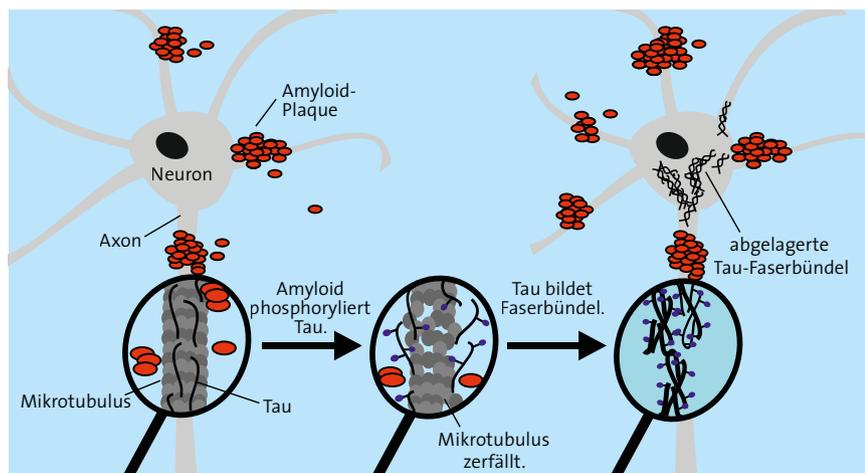
Mit ihren Ergebnissen stärken die Wissenschaftler die Amyloid-Hypothese der Alzheimererkrankung: Demnach stünde die Ansammlung von Beta-Amyloid am Anfang der pathologischen Kettenreaktion. Die Faserbündel aus Tau-Proteinen würden sich erst als Folge davon bilden.

Damit ist freilich noch nicht endgültig geklärt, ob diese Hypothese wirklich zutrifft. Denn das reduzierte Modell von Tanzi und Kollegen schließt nicht alle Faktoren ein, die bei einer realen Alzheimererkrankung ins Gewicht fallen. So fehlt etwa die Mikroglia – also jene Zellen, die im Gehirn Krankheitserreger aufspüren und abgestorbene Zellen beseitigen.

Bei der Alzheimererkrankung reagiert die Mikroglia möglicherweise übertrieben stark und löst dadurch eine chronische Entzündungsreaktion im Nervengewebe aus, was die Bildung von Beta-Amyloid begünstigen würde. Für die Zukunft planen die Forscher deshalb, Mikroglia in ihr System aufzunehmen.

Dennoch sehen sie schon jetzt in ihrem Modell eine Chance, schneller, kostengünstiger und effizienter als an Tieren Medikamente gegen die neurodegenerative Erkrankung zu testen. Letztendlich lässt sich aber nur bei lebenden Organismen überprüfen, ob solche Stoffe auch tatsächlich die Blut-Hirn-Schranke passieren und dann das Voranschreiten der Krankheit behindern oder aufhalten können.

Dieser Schritt wäre bereits ein enormer Erfolg. Doch um Alzheimer zu heilen, müssten die schon entstandenen krankhaften Veränderungen auch wieder beseitigt werden. Und bis es so weit ist, bedarf es wohl noch vieler Studien an Zellkulturen und nicht zuletzt an Alzheimerpatienten.



Bei Morbus Alzheimer spielen vermutlich verschiedene Wirkmechanismen eine Rolle: Zunächst verklumpen Beta-Amyloid-Moleküle und lagern sich als Plaques im Gehirn ab. Die Tau-Moleküle werden dadurch stark phosphoryliert (Bindung von Phosphatgruppen) und lösen sich infolgedessen von den Mikrotubuli. Letztere bilden ein System von feinen Transportschienen in den Neuronen, das nun zerfällt. Zusätzlich bilden die freien Tau-Moleküle Faserbündel, die sich in den Nervenzellen anreichern. Forscher vermuten, dass diese Vorgänge erst gemeinsam die Neurone abtöten.

Christian Wolf ist Wissenschaftsjournalist in Berlin.

FERTIGUNGSTECHNIK

# Der Origami-Roboter

Ein Kleingerät wird als flacher Gegenstand hergestellt und faltet sich dann selbst in die aktive Form. Jetzt suchen seine Erfinder nach Anwendungen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

**R**oboter beginnen Insekten Konkurrenz zu machen. Kleine künstliche Bienen haben bereits ihren Jungfernflug erfolgreich absolviert (Spektrum der Wissenschaft 7/2013, S. 88); allerdings kam die Kraft dazu noch über eine elektrische Nabelschnur.

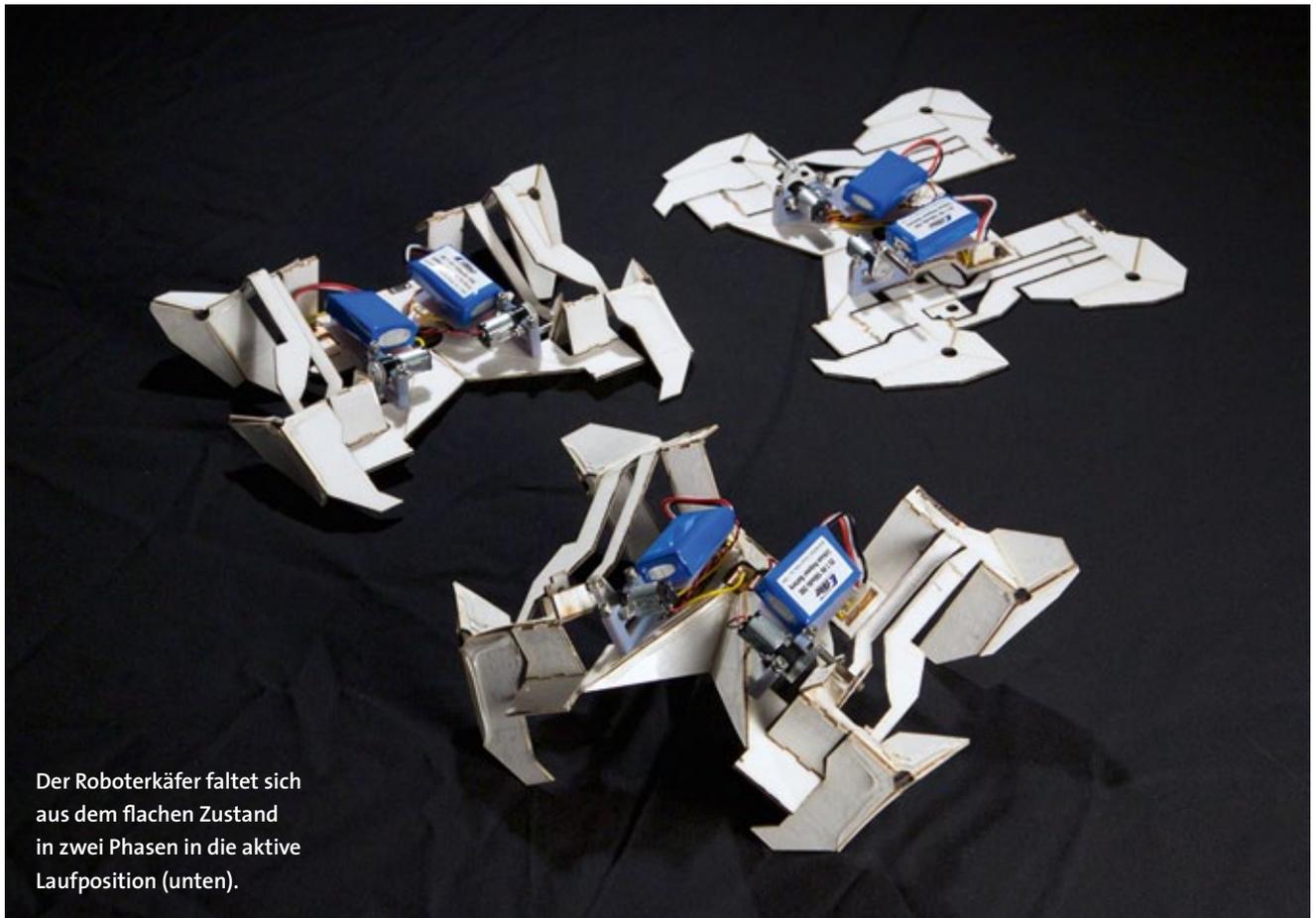
Überhaupt lässt die Forderung, dass das Tierchen sein eigenes Gewicht in die Luft heben muss, praktisch keinen Raum für Experimente. Wenn der Roboter dagegen am Boden bleiben darf, kann er seine Energiequelle in Form einer Batterie mit sich tragen und hat auch noch Platz für einen konventionellen Elektromotor zur Fortbewegung

an Stelle hochkomplizierter piezoelektrischer Elemente.

Vor allem aber kann man auch neue Fertigungsverfahren erproben, wenn man nicht mehr so ausschließlich auf das Gewicht achten muss. Zum Beispiel die Selbstmontage (»self-assembly«): Kaum kommt der neu produzierte künstliche Käfer aus der Maschine, faltet er sich aus eigener Kraft zusammen und läuft los (Bild unten).

Schon für die Roboterbiene werden zwei harte Deckschichten, geeignet zugeschnitten, beiderseits auf eine Mittelschicht aus flexiblem Material geklebt, und daraus wird ein dreidimensionales

Objekt aufgefaltet. Für den selbstfaltenden Käfer musste diese Sandwichtechnik nur geringfügig erweitert werden. Die Mittelschicht besteht aus einer Folie aus Polyimid, die sehr flexibel und mit Kupfer beschichtbar ist. Nach dem für gedruckte Schaltungen üblichen Verfahren wird das Kupfer gezielt weggeätzt, so dass nur noch elektrische Leiterbahnen übrig bleiben. Für die nötige Steifigkeit sorgen beiderseits aufgeklebte Schichten aus halbmillimeterdickem Papier. Auf ihnen wiederum klebt jeweils eine Folie aus vorgestrecktem Polystyrol. Dieser Kunststoff zieht sich dort zusammen, wo er erwärmt wird.



Der Roboterkäfer faltet sich aus dem flachen Zustand in zwei Phasen in die aktive Laufposition (unten).

Alle fünf Schichten zusammen ergeben einen Faltmechanismus. Man schneidet auf der Innenseite der zukünftigen Faltkante einen genau bemessenen Streifen Papier weg; auf der Außenseite schlitzt man Papier und Polystyrol, damit sie der Faltbewegung keinen Widerstand entgegensetzen. Auf die Polyimidfolie ist an dieser Stelle ein Heizdraht aufgedruckt. Durchfließt ihn ein Strom, zieht sich das Polystyrol auf der Innenseite zusammen und faltet die Teilflächen gegeneinander, bis die Kanten des Papiers aneinanderstoßen. Die Breite der Papierlücke bestimmt also den Faltwinkel – ungefähr, weil nicht genau kontrollierbar ist, wie stark das Papier sich zusammendrücken lässt (Bild S. 16 oben).

Dann braucht das künstliche Tierchen nur noch einen Mikroprozessor. Der schickt nach vorprogrammiertem Zeitplan Strom durch die Heizdrähte, und die Körperteile klappen eins nach dem anderen in die vorgesehene Posi-

tion. Dort bleiben sie auch, nachdem der Kunststoff abgekühlt und damit ausgehärtet ist. Für Gelenke, die beweglich bleiben sollen, schneidet man einfach alle Schichten bis auf die mittlere weg – im rechteckigen Zickzack, um der Sache etwas mehr Steifigkeit zu geben.

### Origami-Beine und -Füße

Wie aber sind die Einzelteile zu bemessen, damit der Käfer nicht nur einen stabilen Körper hat, sondern auch laufen kann? Für diese spezielle Aufgabe holten sich die Konstrukteure der Biene externe Unterstützung. Samuel Felton und Michael Tolley aus der Arbeitsgruppe von Robert J. Wood vom Wyss Institute der Harvard University taten sich mit den Mathematikern Erik Demaine und Daniela Rus vom benachbarten Computer Science und Artificial Intelligence Lab des MIT zusammen (*Science* 345, S. 644–646, 2014). Demaines Spezialgebiet klingt eher nach spielerischem Zeitvertreib, erweist sich

aber just für die künstlichen Käfer als äußerst nützlich: Origami (Spektrum der Wissenschaft 4/2011, S. 92).

Aus der wissenschaftlichen Erforschung der traditionellen japanischen Papierfaltkunst ist ein Programm namens »Origamizer« hervorgegangen. Dieses erstellt zu einer vorgegebenen geometrischen Gestalt ein Faltmuster, mit dem man genau diesen Gegenstand herstellen kann – ohne Schneiden und Kleben, wie im klassischen Origami vorgeschrieben. Demaine und Rus mussten für ihre Zwecke das Programm noch weiterentwickeln, denn ihre Aufgabe war einerseits leichter – Schneiden ist nicht verboten –, andererseits schwieriger: Ihr Design sollte nicht so viel Papier verschwenden, wie der Origamizer das zu tun pflegt, und vor allem beweglich sein. Die Drehung des Motors war in ein Bewegungsmuster für das Gehen zu verwandeln. Die Beine sollten im Kontakt mit dem Boden sich selbst nach hinten und damit den Körper

**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 Anmeldemöglichkeit:

**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.



nach vorn drücken und sich zwischen- durch in der Luft nach vorn bewegen.

Genauer gesagt sollte der Käfer zwei Motoren haben, einen für die linken und einen für die rechten Beine. Zum

gewöhnlichen Gehen arbeiten die Beinpaare im Gegenteil – eins in der Luft, eins am Boden –, und für eine Linkskurve laufen die rechten Beine etwas schneller.

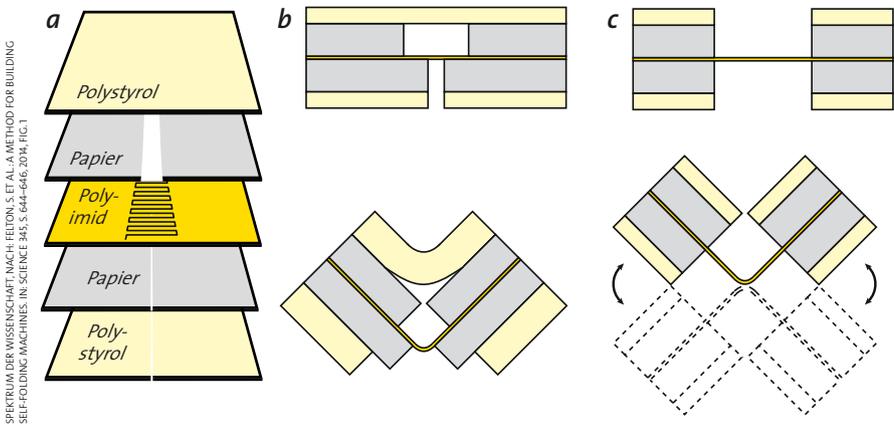
Auch für diese Konstruktionsaufgabe stand ein Algorithmus bereit. Der findet zu einer beliebigen algebraischen Kurve einen Gelenkmechanismus mit einer Drehkurbel an einem Ende und einem Stift am anderen, der genau diese Kurve aufs Papier zeichnet. Aber für die Realisierung in Origami mussten die Forscher abermals Kompromisse eingehen. Gut, dass die Bewegung der Beine beim Gehen gewisse Variationen erlaubt.

**Käfer aus dem Backofen**

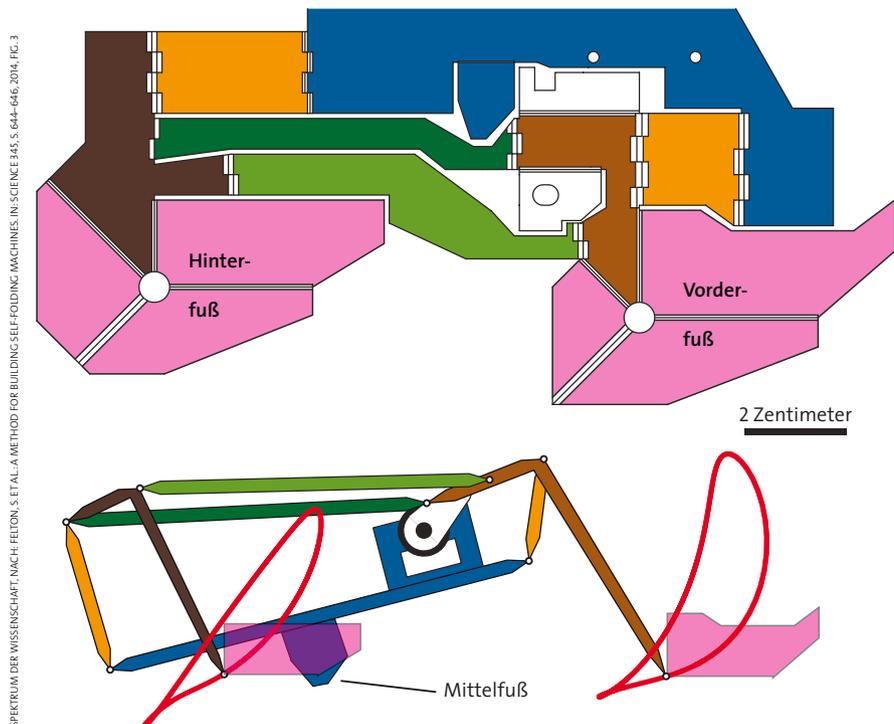
Nach einigem Probieren fanden die Origami-Spezialisten einen Zuschnitt für den Käferkörper, der nicht nur das Material optimal ausnutzt, sondern auch mit dessen unvermeidlichen Unzulänglichkeiten zurechtkommt. Sämtliche Entwurfs- und Herstellungsschritte finden nur in zwei Dimensionen statt: Die Konstrukteure schneiden flache Papierbögen und Kunststofffolien zu und kleben sie passgenau aufeinander – ein Prozess, der sich hervorragend für die Massenfertigung eignet. Nur die Batterien und die Motoren setzen sie noch von Hand ein. Aber das können im Prinzip die Maschinen erledigen, die Leiterplatten mit elektrischen Bauteilen bestücken.

Zudem erleichtert das Arbeiten in zwei Dimensionen das Herumprobieren. 40 Prototypen mussten die Bastler von MIT und Harvard University mit der Hand fertigen, bis der erste funktionierte; aber das nahm jedes Mal weniger als zwei Stunden in Anspruch. Ein schneller 3-D-Drucker (Spektrum der Wissenschaft 6/2014, S. 84) hätte für eine Struktur vergleichbarer Größe und Funktion mehr als fünf Stunden gebraucht. Ähnliche Vorteile zeigen sich in der Massenfertigung.

Die Energie, um sich gegen die Schwerkraft in die Höhe zu falten, zieht der kleine Roboter übrigens nicht aus dem Heizstrom. Sie steckt einerseits in der Vorspannung des Kunststoffmaterials und wird durch die Wärmezufuhr nur freigesetzt, andererseits leisten die ohnehin vorhandenen Motoren einen Teil der Arbeit. Die Achse jedes Motors endet in einer Art Kurbel. In einem ers-



Der Faltroboter besteht aus fünf miteinander verklebten Schichten (a). Wo er sich falten soll, werden an der Außenseite die beiden äußeren Schichten geschlitzt und an der Innenseite Papierstreifen entfernt (b). Durch Erwärmung kontrahiert sich die intakte Polystyrolschicht und zieht beide Teile in Form. Für ein Scharniergelenk, das beweglich bleiben soll, werden alle Schichten bis auf die mittlere ein Stück weit entfernt (c).



Der Bewegungsapparat des Faltroboters (hier die beiden rechten Beine) entsteht durch Auffalten aus einem flachen Stück Material (oben). Die Faltkanten des Vorderfußes und des Hinterfußes werden einmal beim Zusammenfalten bewegt und dann fixiert. Dagegen bleiben die Scharniergelenke zwischen den Stangen des Getriebes beweglich. In der Schemazeichnung unten sind dieselben Stangen stilisiert und von der Seite gezeichnet. Sie verwandeln die Drehbewegung des Motors, der in das runde Loch eingreift, in die rot gezeichnete Bewegung der Füße. An der untersten Stange des Getriebes hängt ein »Mittelfuß«, der den ganzen Käfer abstützt, während ein Beinpaar sich in der Luft befindet.

ten Faltschritt streift sich eine papierne Öse über den Griff der Kurbel, ein weiteres Papierteil hält sie in Position. Mit einer Halbdrehung stellt jeder Motor sein Beinpaar auf die Füße; daraufhin falten sich die Beine endgültig zurecht, und jede weitere Drehung des Motors setzt sie in Bewegung.

Die Konstrukteure haben sich bewusst auf preiswerte, frei verkäufliche Materialien beschränkt. Bis auf die Laser-Schneidegeräte liegt der ganze

Produktionsprozess – einschließlich Entwurf mit gängigen Zeichenprogrammen – in der Reichweite eines avancierten Heimwerkers.

Das heißt umgekehrt: Es gibt noch reichlich Gelegenheit zur Optimierung. Die Autoren forschen schon in verschiedene Richtungen. Eine ernsthafte Nutzanwendung ist bislang nicht in Sicht, würde aber jedenfalls nicht an mangelnden Massenfertigungsmöglichkeiten scheitern.

Schon jetzt ist es der Arbeitsgruppe gelungen, den Faltprozess so umzugestalten, dass es auf die Reihenfolge der Faltakte nicht mehr ankommt. Also muss man auch nicht mehr nach Zeitplan heizen, sondern kann den flachen Käfer in den Ofen stecken, und nach einer Weile kommt er frisch gebacken aus eigener Kraft herausgelaufen.

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

## ERNÄHRUNG

# Fotosynthese mit Turbolader

Ein Gentransfer von Bakterien auf Pflanzen könnte die Fotosynthese – und damit auch die Landwirtschaft – wesentlich effizienter machen. Zwei entscheidende Schritte auf dem Weg dahin sind jetzt geglückt.

VON MICHAEL GROSS

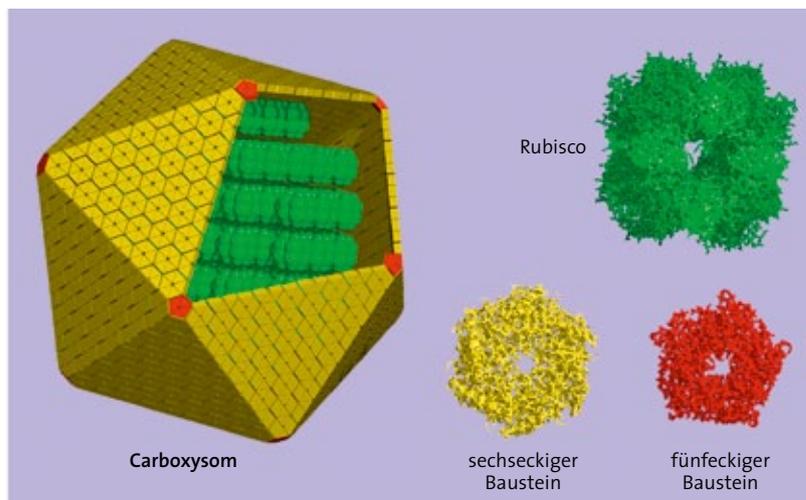
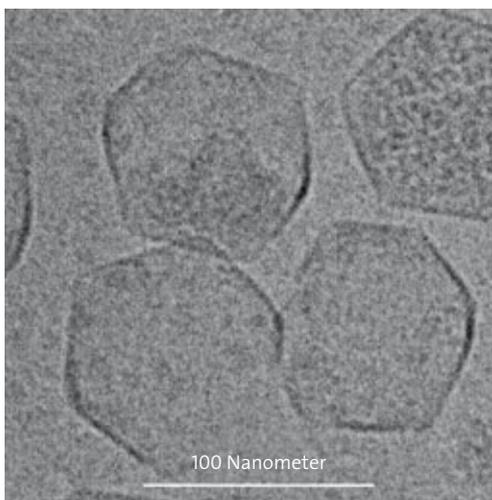
Als die Evolution vor rund 2,5 Milliarden Jahren die zweistufige, Sauerstoff produzierende Fotosynthese erfand, passierte ihr eine kleine Unachtsamkeit. Die heute am weitesten verbreitete Version des Vorgangs leidet an einem Geburtsfehler, der sich ähnlich wie die Verwendung von zweistelligen Jahreszahlen bei Computern im 20. Jahrhundert erst nach langer Zeit als heikel herausstellen sollte.

Der Lapsus bestand darin, dass das für den Einbau von Kohlendioxid in organische Moleküle zuständige Schlüs-

selenzym der Fotosynthese namens Rubisco – kurz für Ribulose-1,5-diphosphatcarboxylase – nicht besonders gut zwischen Kohlendioxid und Sauerstoff

unterscheiden kann. Und wenn es Letzteren statt des gewünschten Kohlenstoffs fixiert, geht der Zelle wertvolle chemische Energie verloren.

Das Fotosynthese-Enzym Rubisco, das den Einbau von Kohlendioxid in organische Moleküle katalysiert, ist bei Zyanobakterien in so genannten Carboxysomen eingekapselt, um es vor Sauerstoff abzuschirmen. Diese ikosaedrischen Käfige sind links in einer elektronenmikroskopische Aufnahme und rechts als Modell zu sehen – zusammen mit Röntgenstrukturbildern der sie aufbauenden Proteine und von Rubisco. In getrennten Versuchen ist es gelungen, die Bausteine der Carboxysomen und das bakterielle Rubisco, das in Abwesenheit von Sauerstoff effizienter ist als sein pflanzliches Pendant, auf Tabak zu übertragen. Davon erhofft man sich ein besseres Wachstum und höhere Erträge.



UNIKS, MARK I. YEAGER & KELLY A. DRYDEN, UNIVERSITY OF VIRGINIA; RECHTIS: TODD O. YEATES, UC/LA / CC-BY-3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/RY/3.0/LEGALCODE)

## Patentrezept gegen soziale Vorurteile

### Wie persönlicher Kontakt Ressentiments abbaut.

Seit einigen Monaten macht eine Bewegung namens Pegida («Patriotische Europäer gegen die Islamisierung des Abendlands») von sich reden. Sie brachte im Dezember 2014 regelmäßig Tausende auf die Straße, insbesondere in ostdeutschen Großstädten wie Dresden, aber nicht nur dort; auch im Westen der Bundesrepublik demonstrieren empörte Bürger gegen eine vermeintlich grundfalsche Politik, die das Land gefährlichen Einwanderern und fremden Einflüssen ausliefere.

Auffällig an diesem Phänomen ist ein auf den ersten Blick paradoxer Zusammenhang: Gerade in Regionen mit verschwindend geringem Ausländeranteil – in Ostdeutschland liegt er zwischen zwei und drei Prozent – hat die Bewegung am meisten Zulauf. Man sollte doch meinen, die negative Einstellung gegenüber Ausländern entspringe wiederholten schlechten persönlichen Erfahrungen mit Menschen anderer Religion und Kultur; aber das ist offenbar gar nicht der Fall.

Vielmehr finden hier ganz unterschiedliche, teils durchaus berechtigte Motive – die Furcht vor sozialem Abstieg, Arbeitslosigkeit und Altersarmut – ein Ventil im Ressentiment gegen Minderheiten. Das ist ein aus der jüngsten Geschichte bekannter und äußerst gefährlicher Mechanismus, der im schlimmsten Fall zu pogromartigen Auswüchsen führt. Was kann man dagegen tun?

Der simple Vorschlag, einfach weniger Fremde ins Land zu lassen, ist schon deshalb Unsinn, weil deren Anzahl ja im umgekehrten Verhältnis zur grassierenden Ausländerfeindlichkeit steht. Im Gegenteil: Um Vorurteile zu zerstreuen, muss man Menschen unterschiedlicher Kultur besser miteinander bekannt machen. Da ist jetzt viel die Rede von der heilsamen Wirkung von Schule und Bildung, aber das braucht Zeit, während das Problem rasch wächst. Geht es vielleicht schneller?

**Tatsächlich stimmt ein Experiment hoffnungsvoll**, das die Politologen Michael J. LaCour von der University of California in Los Angeles und Donald P. Green von der Columbia University in New York kürzlich durchführten. Sie testeten, ob schon ein einmaliges 20-minütiges Gespräch an der Haustür die Einstellung zu einem Minderheitenproblem dauerhaft zu ändern vermag (*Science* 346, S. 1366–1369, 2014).

Dabei ging es um die kontroverse Frage, ob homosexuelle Paare heiraten dürfen. Gegen die Ehe von Schwulen und Lesben bestehen erhebliche Vorurteile – nicht nur in Südkalifornien, wo die Untersuchung stattfand. In den Wahlkreisen, die dort 2008 mehrheitlich einen Volksentscheid gegen die Homohehe unterstützt hatten, versuchten 40 geschulte Werber knapp 1000 Einwohner vom natürlichen Anrecht Homosexueller auf Heirat zu überzeugen.

Diese Gespräche führten zu einem deutlichen Meinungsumschwung, das heißt, sie änderten bei vielen Angesprochenen die negative Einstellung zur Homohehe. Doch nun kommt der eigentliche Clou des Experiments: Die Hälfte der Werber waren schwul oder lesbisch und offenbarten dies auch im Lauf des Gesprächs. Wie sich zeigte, hatte dieser Personenkreis deutlich mehr Erfolg als die heterosexuelle Kontrollgruppe – und die Meinungsänderung blieb dauerhafter und strahlte zudem auf die ganze Familie der Besuchten aus.

In der Schule oder öffentlich bloß Argumente gegen Ausländerhass vorzutragen, ist demnach zwar sinnvoll, hilft aber eher wenig. Erst wenn die Einheimischen in persönlichen Kontakt mit den vermeintlich bedrohlichen Anderen gebracht werden, geraten Vorurteile ernsthaft ins Wanken.

Das ist eine gute Nachricht, finde ich; denn sie bedeutet: Es gibt ein probates Mittel gegen Diskriminierung, das schnell und nachhaltig wirkt.



Michael Springer

Anfangs war das überhaupt kein Problem, weil gasförmiger Sauerstoff nur in Spuren in der Atmosphäre vorkam und dem Kohlendioxid deshalb keine Konkurrenz machte. Doch dank der unaufhaltsamen Ausbreitung erst von fotosynthetischen Bakterien und dann von Algen und Landpflanzen stieg der Sauerstoffanteil der Atmosphäre im Verlauf der Jahrtausende stetig an – bis auf den heutigen Wert von etwa 21 Prozent.

### Unterschiedliche Notlösungen bei Pflanzen und Zyanobakterien

Das zwang die Kohlendioxid-Fixierer, sich der veränderten Situation anzupassen. Dabei beschritten sie unterschiedliche Wege. Die  $C_3$ -Pflanzen, von denen wir uns hauptsächlich ernähren, bremsten die Aktivität von Rubisco und gaben ihm damit die Möglichkeit, genauer hinzuschauen. Doch die höhere Selektivität, die sie so erreichten, hatte ihren Preis: Die Pflanzen benötigten die verlangsamte Version des Moleküls nun in größerer Menge. Unter anderem deshalb gilt Rubisco heute als das Enzym, das mit der größten Stückzahl in der irdischen Biosphäre vertreten ist.

Auf andere Weise behelfen sich zwei sehr unterschiedliche Organismengruppen: die Zyanobakterien als nächste Verwandte der urzeitlichen Erfinder der Sauerstoff produzierenden Photosynthese und die  $C_4$ -Pflanzen, zu denen vor allem tropische Gewächse wie Mais und Zuckerrohr gehören. Beide behielten die schnelle, aber fehlerhafte Version von Rubisco bei und entwickelten Mechanismen, das Enzym mit Kohlendioxid in angereicherter Form zu versorgen, um das Selektivitätsproblem zu umgehen.

$C_4$ -Pflanzen binden das Gas in einem der Rubisco-Reaktion vorgeschalteten, räumlich getrennten Prozess zunächst in Form von Äpfelsäure (die vier Kohlenstoffatome enthält, daher die Bezeichnung  $C_4$ ). Zyanobakterien hingegen umschließen das Enzym mit einer Proteinhülle, dem Carboxysom. Dieses lässt das Kohlendioxid in Form des negativ geladenen Hydrogenkarbonats hinein, das neutrale Sauerstoff-

molekül jedoch nicht – eine sehr elegante und effiziente Lösung.

Wer die Fähigkeit der Zyanobakterien zu schneller und fehlerfreier Rubisco-Aktivität auf Kulturpflanzen übertragen will, muss demnach zweierlei bewerkstelligen:

► in das Genom der Chloroplasten – so heißen die Organellen, in denen die Fotosynthese stattfindet – die Gene für das leistungsfähigere Enzym einbauen und zudem

► dafür sorgen, dass sich die aus mehreren Proteinen aufgebauten Carboxysomen bilden können.

Der Arbeitsgruppe von Maureen Hanson an der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York) sind die beiden Teilschritte jetzt in gesonderten Versuchen gelungen.

Zunächst versahen die Forscher mit Hilfe von *Agrobacterium tumefaciens* als Überträger Blätter der Tabakpflanze mit den Genen für die fünf Hüllproteine des Carboxysoms. Diese wurden daraufhin im Zytoplasma der Blattzellen gebildet und, da sie mit einer entsprechenden Signalsequenz ausgestattet waren, in die Chloroplasten eingeschleust. Dort setzten sie sich zu mikroskopisch kleinen Bläschen zusammen, die einen zu Testzwecken als Ersatz für das Rubisco eingeführten Dummy-Eiweißstoff in sich aufnahmen (*The Plant Journal* 79, S. 1–12, 2014).

Dann wandten sich Hanson und ihre Kollegen dem Enzym selbst zu. Zwar war es früher schon gelungen, dessen Gen aus Zyanobakterien auf Chloroplasten zu übertragen. Doch dort entstand daraus kein funktionstüchtiges Rubisco. Offenbar fehlte eine bakterielle Komponente, die das Protein nach der Synthese dazu bringt, seine korrekte Gestalt anzunehmen. Daher schleuste Hansons Arbeitsgruppe in zwei getrennten Versuchen jeweils ein zusätzliches Gen mit ein. In einem Fall enthielt es den Bauplan für einen Eiweißstoff, der an der Einkapselung von Rubisco in Carboxysomen beteiligt ist. Im anderen Fall kodierte es für ein molekulares Chaperon, also ein Protein, das einer frisch gebildeten Aminosäurekette hilft, sich zur richtigen dreidi-

mensionalen Struktur zusammenzufalten (*Nature* 513, S. 547, 2014).

Die Forscher führten ihre Versuche mit Tabakpflanzen durch, deren eigenes Rubisco ausgeschaltet worden war. In beiden Fällen erhielten sie fotosynthetisch aktive Chloroplasten, was belegt, dass das Fremdenzym funktionierte. Es kam zwar erwartungsgemäß mit dem hohen Sauerstoffgehalt der Umgebungsluft nicht zurecht, weshalb die Pflanzen auf Dauer verkümmerten. In einer mit Kohlendioxid stark angereicherten Atmosphäre gediehen sie jedoch normal.

### **Besser wachsen mit weniger Dünger**

Nachdem es in getrennten Versuchen gelungen ist, einerseits die Carboxysomen und andererseits das Enzym auf Tabak zu übertragen, besteht nun die nächste Herausforderung darin, beide gemeinsam in eine Kulturpflanze einzuführen. Erst wenn sowohl der leistungsfähigere Motor als auch der Turbolader eingebaut ist, so der anschauliche Vergleich in einem Kommentar in der Fachzeitschrift »Nature«, kann das Gespann seine Stärke ausspielen. Dann winken nicht nur schnelleres Wachstum und ein bis zu 30 Prozent höherer Ertrag. Die Pflanzen bräuchten auch nicht so viel Stickstoffdünger, weil sie mit weniger Rubisco auskämen.

Eine Alternative wäre,  $C_3$ -Pflanzen wie Reis auf den  $C_4$ -Mechanismus umzustellen. Das Internationale Reisforschungsinstitut IRRI betreibt ein entsprechendes Großprojekt, das seit 2012 unter anderem auch von der Gates-Stiftung gefördert wird. Da der Umbau in diesem Fall jedoch nicht nur die Inneneinrichtung der Chloroplasten, sondern die Architektur der Pflanzenzellen insgesamt betrifft, dürfte sich das Vorhaben deutlich komplizierter gestalten. Angesichts der Bedeutung von Reis für die Welternährung hätte die Umstellung auf eine leistungsfähigere Fotosynthese, wie immer sie erfolgt, aber gigantische Auswirkungen, die jede Anstrengung rechtfertigen.

---

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



# SciLogs

Diskutieren Sie mit –  
auf unserem Portal für  
Wissenschaftsblogs!

Ein Projekt von Spektrum  
der Wissenschaft in  
Zusammenarbeit mit  
nature

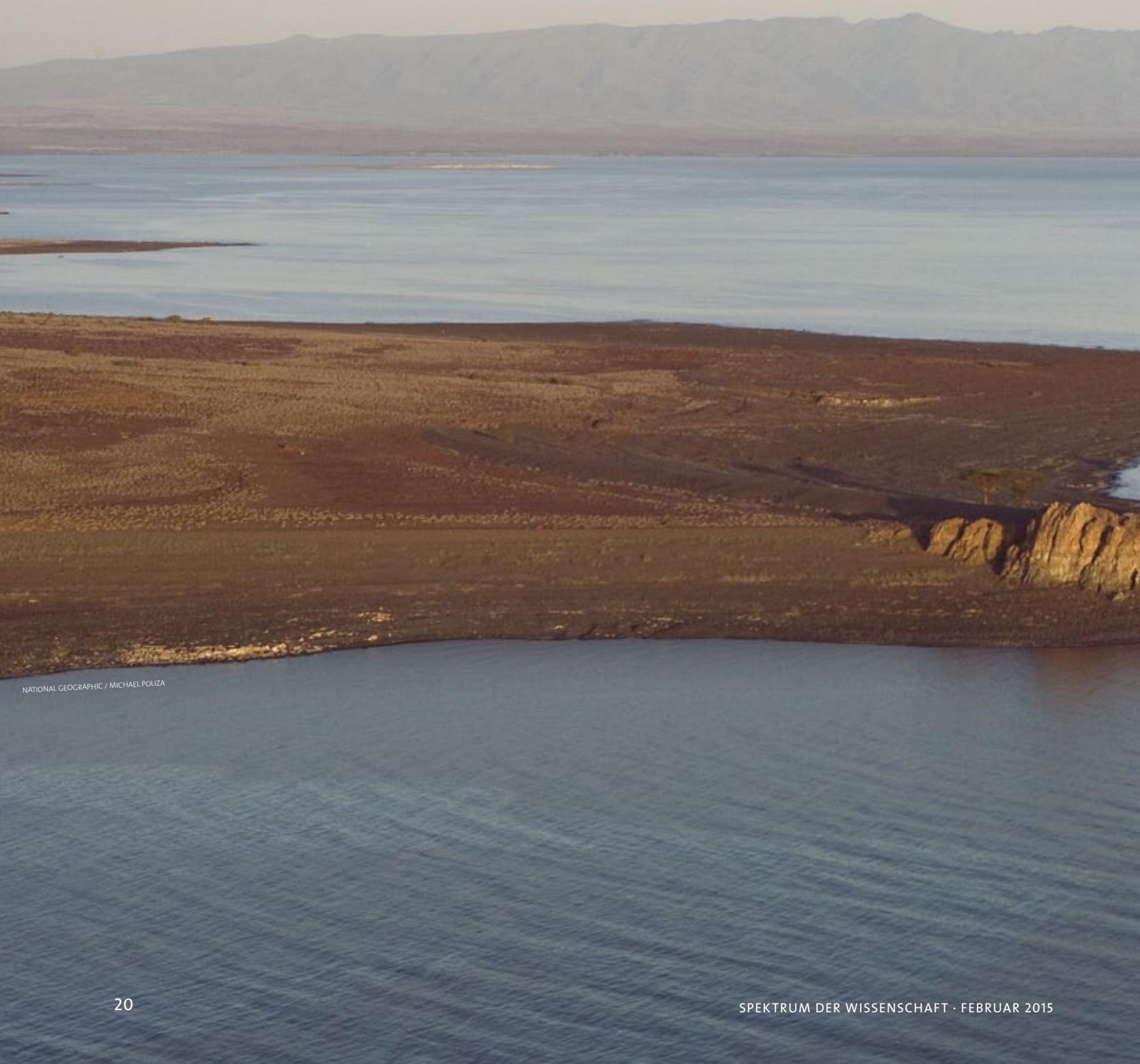
Auf SciLogs bloggen mehr als 100 Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachgebieten sowie mehrere Wissenschaftsjournalisten. Ihr Anliegen ist der interdisziplinäre Dialog über Wissenschaft in all ihren Facetten: Forschung, Anwendung, Politik, Ethik, Werte.

[www.SciLogs.de](http://www.SciLogs.de)

# Menschenevolution durch Klimaschwankungen

Abwechselnd feuchte und trockene Zeiten trieben die Menschwerdung an. Die vielen Klimaumschwünge förderten moderne Merkmale wie Flexibilität. Weniger anpassungsfähige Homininen hielten die ökologischen Umbrüche nicht aus.

Von Peter B. deMenocal



NATIONAL GEOGRAPHIC / MICHAEL POLIZA



Der Turkana-See in Ostafrika ist heute von Wüste umgeben. Früher war dies wiederholt eine grüne Landschaft mit Grasfluren und Bäumen.

Von der kleinen Anhöhe blicke ich auf den glitzernen Turkanasee – und über die öde rötlich braune Landschaft im Norden Kenias hinweg. Größer könnte der Kontrast zwischen der blaugrün schimmernden Wasserfläche und der fast kargen, steinigen Wüste kaum sein. Besonders ab mittags, wenn auch das Gestein Hitze abstrahlt, fühlt man sich sogar in Seenähe wie in einem Backofen. Angesichts der staubgetränkten Luft, die den Horizont verschleiert, fällt es einem schwer, sich hier etwas anderes als Wüste vorzustellen. Und doch wuchsen an dieser Stelle einmal Bäume zwischen weiten Grasfluren.

Der Turkanasee, früher Rudolfsee genannt, liegt im Ostafrikanischen Graben. Mit einer Gesamtlänge von 270 Kilometern und maximal 50 Kilometer Breite zieht er sich noch bis weit nach Äthiopien hinein. Von dorthier speist ihn der Omo – in den meisten Jahreszeiten sein einziger Zufluss, der ihm vom äthiopischen Hochland die Wassermassen der Monsunregen zuführt.

Anzeichen dafür, dass hier früher ein viel feuchteres Klima herrschte, finden sich zuhauf. Zum Beispiel besteht der Hügel, auf dem ich stehe, aus 3,6 Millionen Jahre alten Sedimenten, die sich am Boden eines Vorläufers des heutigen Turkanasees ablagerten. Der frühere See war erheblich ausgedehnter und tiefer und füllte das Bassin bis zum Rand. Die trockenen weißen Sandschichten sind Überreste von Algenfossilien. Auch gibt es in dem Gebiet jede Menge Fossilien von großen Fischen. Andere Studien belegen, dass diese Region einst eine von Grasfluren, Bäumen und Seen geprägte Landschaft war.

## AUF EINEN BLICK

### ANPASSUNGSFÄHIGKEIT SIEGT

**1** Über Jahrmillionen scheinen **Klimaveränderungen** unterschiedlicher Richtung die Menschenevolution beeinflusst zu haben. Manche Linien der **Homininen** verschwanden dann, andere konnten sich behaupten.

**2** Sedimente in Ostafrika und im Meer sowie fossile Homininenzähne deuten auf die immer wieder **wechselnde afrikanische Pflanzenwelt** zu verschiedenen Zeiten. Neben regelmäßigen, **zyklischen Klimaschwankungen** traten zwei große Schübe hin zu generell **mehr Trockenheit** auf, die eine Ausbreitung der Savanne förderten.

**3** Auch die **Evolution der Gattung Homo** hing anscheinend mit den vielen Klimaverschiebungen zusammen. Als eine markante Eigenschaft von frühen Menschen, welche von **hoher Anpassungsfähigkeit** zeugt, sticht ihre vielseitige Ernährung hervor, ebenso das zunehmend komplexere Werkzeug.

Die meisten bisher bekannten Zeugnisse von den Anfängen und dem weiteren Verlauf der Menschwerdung stammen von Orten in Ost- und Südafrika. Darunter sind wichtige Funde von der Gegend um den Turkanasee. Und die Forscher sind sich zunehmend einig, dass die menschliche Evolution wesentlich mit der großen Verschiebung der klimatischen und damit ökologischen Bedingungen hin zu viel trockeneren Verhältnissen zusammenhing. Allerdings wissen wir inzwischen auch, dass dieser generelle Trend nicht gleichmäßig verlief. Vielmehr schlug das Klima wiederholt kräftig in beide Richtungen aus. Es gab also zwischendurch immer wieder ziemlich feuchte Abschnitte.

Zwei markante Phasen der Homininenevolution – mit einem Abstand von ungefähr einer Million Jahren – fielen zeitlich mit größeren Klimaveränderungen zusammen. Der erste Umschwung ereignete sich im Zeitraum von vor 2,9 bis vor 2,4 Millionen Jahren. Damals starb die Linie von *Australopithecus arafensis* aus, jener ostafrikanischen Art, zu der die berühmte »Lucy« gehört. Und es traten zwei sehr verschiedene Gruppen von Homininen neu auf. Die Vertreter der einen halten Anthropologen für die allerersten Angehörigen unserer Gattung *Homo*. Einige ihrer Merkmale erscheinen bereits etwas »moderner« im menschlichen Sinn, etwa ein größeres Gehirn. In der Nähe dieser ostafrikanischen Fossilien fanden sich zudem die frühesten, grob gefertigten Steinwerkzeuge. Die zweite Gruppe wirkte völlig anders. Das waren gedrunge – »robust« – gebaute Primaten mit kräftigen Kiefern. Für diese Australopithecinen kam der Gattungsname *Paranthropus* auf. Er wird allerdings nicht einheitlich angewandt, zumal die Verwandtschaftsverhältnisse der robusten Formen von Ost- und Südafrika untereinander unklar sind.

Die zweite markante Entwicklungsphase lag vor 1,9 bis vor 1,6 Millionen Jahren. Jetzt trat der *Homo erectus* auf den Plan, den manche als *H. ergaster* bezeichnen, um ihn vom *H. erectus* Asiens abzugrenzen, der vermutlich aus ihm hervorging. Dieser Frühmensch besaß ein noch umfangreicheres Gehirn und wirkte größer und wendiger als seine Vorläufer. Im Kör-

## DIE SERIE IM ÜBERBLICK

### EVOLUTIONSGESCHICHTE DES MENSCHEN

- |        |   |                     |
|--------|---|---------------------|
| Teil 1 | ► Menschwerdung in neuem Licht<br><i>Kate Wong</i>                              | Januar 2015         |
|        | Unsere unübersichtliche Verwandtschaft<br><i>Bernard Wood</i>                   |                     |
| Teil 2 | ► <b>Menschenevolution durch Klimaschwankungen</b><br><i>Peter B. deMenocal</i> | <b>Februar 2015</b> |
| Teil 3 | ► Erfindungsgeist und Selbstdarstellung<br><i>Ian Tattersall</i>                | März 2015           |
| Teil 4 | ► Der Vorteil der Paarbildung<br><i>Blake Edgar</i>                             | April 2015          |
|        | Hilfsbereitschaft und Kooperation<br><i>Frans de Waal</i>                       |                     |
| Teil 5 | ► Aufgaben lösen dank Empathie<br><i>Gary Stix</i>                              | Mai 2015            |
| Teil 6 | ► Die digitale Revolution<br><i>Interview mit Sherry Turkle</i>                 | Juni 2015           |
|        | Warum unsere Evolution weitergeht<br><i>John Hawks</i>                          |                     |



JOHN GURCHE, 2014 (REKONSTRUKTION UND FOTO)



JOHN GURCHE, SHAPING HUMANITY, YALE UNIVERSITY PRESS, 2013

**Zwei Homininen, die verschiedenartig nicht hätten sein können, obwohl sie in derselben Umwelt lebten: *Paranthropus boisei* (Nachbildung links) ernährte sich recht einseitig vorwiegend von Gräsern; *Homo erectus* (rechts) hatte einen vielfältigen Speiseplan.**

perbau unterschied er sich wenig vom modernen Menschen. Er fertigte die ersten Faustkeile: große, zweiseitig bearbeitete scharfe und spitze Steingeräte – ein enormer technischer Fortschritt. Und er wusste sich Fleischnahrung zu beschaffen. Dies könnte die erste Menschenform gewesen sein, die sich nach Eurasien ausbreitete. Laut einigen neueren umstrittenen Befunden ist das jedoch nicht mehr ganz sicher.

Dass die genannten beiden Meilensteine der menschlichen Evolution relativ rasch aufeinander folgten, führen einige Wissenschaftler auf zwei einschneidende Klimaepisoden zu dieser Zeit zurück. Während sich die Umweltbedingungen vorher über weite Zeiträume nur ganz langsam verändert hatten, gab es in den entscheidenden Phasen zwei deutliche Schübe hin zu trockeneren Verhältnissen, wodurch sich zunehmend Grasland verbreitete. Zusätzlichen Anpassungsdruck übten die erwähnten schnellen Wechsel zwischen feuchten und trockenen Perioden aus. Die Homininen mussten sich wiederholt zügig an veränderte ökologische Gegebenheiten adaptieren.

Die Erkenntnisse vom wechselvollen Klimageschehen stützen sich auf neuere Daten unter anderem zur Geschichte der Pflanzenwelt Afrikas. Beispielsweise kann man inzwischen aus Sedimenten – wie den Schichtungen beim Turkkanasee – die frühere Vegetation anhand molekularer Reste bestimmen. Zudem verraten chemische Indizien von fossilen Zähnen der verschiedenen Vor- und Frühmenschen, was sie jeweils aßen, also welche Linien auf eine Klimaverschiebung mit einer Ernährungsumstellung reagierten und welche nicht.

Allem Anschein nach konnten sich manche Homininen auf eine veränderte Umwelt deutlich besser einstellen als andere. Eine beträchtliche Anpassungsfähigkeit an ungewohnte ökologische Herausforderungen dürfte eine entscheidende

Eigenschaft der Evolutionslinie gewesen sein, die zum Menschen führte. Eher unflexible Linien, die ihre einmal erworbenen Anpassungen beibehielten, starben offenbar aus. Der Paläoanthropologe Rick Potts von der Smithsonian Institution in Washington D. C. spricht sogar von »variability selection«: einer Auslese auf das Vermögen zu gesteigerter Variabilität als einem entscheidenden Faktor der Menschwerdung.

### **Ressourcenwandel durch Klimaverschiebungen**

Einen Zusammenhang zwischen Klimaveränderungen und Evolutionsgeschehen postulierte schon Charles Darwin. Er überlegte: Eine ausgeprägte klimatische Verschiebung kann sich zum Beispiel auf das Nahrungsangebot oder Orte zum Unterschlupf auswirken. Würden also wichtige Ressourcen für eine Art verschwinden, müsste in der Region ein Selektionsdruck auftreten, der eine Anpassung an die neuen Verhältnisse erzwingt. Im Extremfall könne die Art aussterben, oder aus ihr ginge eine neue Spezies hervor. Langfristig seien diejenigen Populationen im Vorteil, die dank ihrer genetischen Ausstattung passende Merkmale ausbildeten – wie ein größeres Gehirn. Im Lauf der Generationen würden sich die besser adaptierten Individuen durchsetzen. Darwin schrieb auch bereits, dass etwa Zeiten extremer Kälte oder Trockenheit die Anzahl der Arten oft kräftig dezimieren könnten.

In der Tat verlaufen solche Umschwünge keineswegs immer sanft. Alle fünf großen Massenaussterben in der Erdgeschichte in den letzten 540 Millionen Jahren gingen mit gravierenden ökologischen Umbrüchen einher. Dabei verschwanden mindestens die Hälfte, in einem Fall sogar 90 Prozent der bis dahin existierenden Tierarten. Doch danach tauchten jedes Mal viele völlig neuartige Organismen auf, und es erblühten nie da gewesene Tierwelten. Wir Säugetiere

tiere beispielsweise verdanken unsere Vorherrschaft dem riesigen Meteoriten, der vor etwa 66 Millionen Jahren auf der Halbinsel Yukatan im heutigen Mexiko niederging und einen so gewaltigen globalen Klimaumbruch auslöste, dass die Dinosaurier und mit ihnen viele andere Lebewesen untergingen. In dieser Situation konnten sich relativ bald die bis dahin eher unscheinbaren Säugetiere mit zahlreichen neuen Evolutionslinien ausbreiten.

In einem dieser Zweige entwickelten sich die Primaten, aus denen später auch die Homininen hervorgingen und schließlich die Menschen. Anthropologen fassen unter dieses Fachwort alle mit uns verwandten Gruppen nach der Abspaltung von den gemeinsamen Vorfahren mit Schimpansen zusammen. Zu den bekanntesten Theorien dazu, welche Umweltbedingungen für die Menschwerdung wichtig gewesen sein mögen, zählt die »Savannenhypothese«. Deren ursprüngliche, allerdings zu einfache Version findet sich noch heute in manchen Lehrbüchern. Demnach waren unsere aufrecht gehenden Vorfahren recht gut dafür gerüstet, in der Savanne zu überleben, als sich solche Gras- und Buschlandschaften immer mehr ausbreiteten. Dank ihres großen Gehirns und ihres Talents zur Werkzeugherstellung konnten sie die dort herrschende ziemlich harte Konkurrenz um Ressourcen bestehen, während die den Menschenaffen ähnliche Verwandtschaft in den schwindenden Wäldern zurückblieb.

Allerdings gab es den stetigen Wandel von einer Wald- in eine Savannenlandschaft so nicht, sondern zyklische Klimaschwankungen in rascher Folge, und insgesamt wurde es erst allmählich trockener. Genauso traten die menschlichen Merkmale nicht auf einmal voll ausgeprägt auf, sondern unterlagen etlichen intensiven Entwicklungsschüben, die jeweils dann stattfanden, wenn sich die Umweltbedingungen veränderten.

Deutliche Hinweise auf das stete Auf und Ab des Klimas liefern Sedimente aus der Tiefsee nahe Afrika, wo die Schichtungen oft seit Jahrtausenden unverändert liegen. Ablagerungen auf dem afrikanischen Kontinent lassen sich bedingt durch Erosion und geologische Störungen meist viel schwerer deuten. Dagegen enthalten lange Bohrkern vom Grund der Ozeane die Vergangenheit wie eine Zeitkapsel. Um sie zu erforschen, hielt ich mich im Herbst 1987 zwei Monate lang mit 27 Kollegen im Arabischen Meer auf der »JOIDES Resolution« auf. Das 150 Meter lange Forschungsbohrschiff wird in-

ternational finanziert und ist dafür konzipiert, anhand von Proben des Meeresbodens die Erdgeschichte zu ergründen.

»Kern an Deck!« Sowie die Stimme des Bohrungsleiters aus den Lautsprechern der klimatisierten Labors krächzte, griffen wir zu den Schutzhelmen und begaben uns in die blendende Helle an Deck, denn wir mussten den nächsten zehn Meter langen Bohrkern hineinschleppen. An unserem Aufenthaltsort war das Meer über 2000 Meter tief, und die Bohrung stieß bis auf fast 800 Meter in den Grund. An dieser Stelle hat sich seit der Abspaltung der Homininen von den Schimpansenvorfahren eine fast 300 Meter mächtige Schicht abgelagert, alle 1000 Jahre also ungefähr vier Zentimeter.

Die Ablagerungen bestehen teils aus feinen, weißlichen fossilen Schalen aus Kalziumkarbonat von ozeanischem Plankton, teils aus dunkleren Schlickpartikeln, Abträgen vom Land, die Monsunwinde aus Afrika und Arabien hierher transportierten. Wo die Mischung dunkler und grobkörniger ist, verweist das auf eine staubigere, trockeneren Zeit; eine hellere Mixtur bedeutet feuchteres Klima. In den betreffenden Bohrkernen wechselten helle und dunkle Schichten etwa je den Meter – ungefähr alle 23 000 Jahre.

### Grüne Landschaften in Nordafrika

Das passt zur regelmäßigen Schwankung (Präzession) der Erdachse in ihrer Stellung zur Sonne. Diese Zyklen wirken sich in verschiedenen Regionen der Erde auf die Sonneneinstrahlung in den Jahreszeiten aus und beeinflussen dadurch auch den Monsun. Bei größerer sommerlicher Hitze in Nordafrika und Südasien fallen die Monsunregen stärker aus und umgekehrt.

Wie feucht Nordafrika zum Beispiel in der letzten regenreichen Phase gewesen sein muss, bezeugt bis zu 10 000 Jahre alte Felskunst in der gesamten Sahara eindrucksvoll. Auf den Bildern tummeln sich Elefanten, Giraffen, Flusspferde und Krokodile, Jägerhorden stellen Gazellen nach. Die Sahara war damals eine Gras- und Baumlandschaft mit vielen Seen, in deren Becken sich später Sanddünen bildeten. Ein mächtiger Nil trug dem östlichen Mittelmeer reichlich organisches zersetztes Material zu, das dort dunkle Sedimente bildete, so genannte Sapropel. Im östlichen Mittelmeer wechseln die dunklen Schichten mit helleren aus trockeneren Phasen ab – auch dies ein geologischer Barcode, der wie die Sedimente im Arabischen Meer von den afrikanischen Klimazyklen erzählt.

Die ersten Savannenflecken tauchten in Ostafrika vor nicht ganz acht Millionen Jahren auf. Allerdings ist es nicht einmal drei Millionen Jahre her, dass sich weite grasbewachsene Gebiete wie die Serengeti dauerhaft etablierten. Etwa in dieser Zeit, vor knapp drei Millionen Jahren, verschwand die bis dahin so erfolgreiche ostafrikanische Art von Lucy, *Australopithecus afarensis*. Vor etwa 3,9 Millionen Jahren war sie aufgetreten und hatte sich 900 000 Jahre lang behaupten können. Einige Zeit später erschien die *Paranthropus*-Gruppe, somit die ersten »robusten« Australopithecinen. Und von vor 2,6 Millionen Jahren sind die ersten angefertigten Steingeräte nachweisbar: Chopper – beschlagene Gerölle mit

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

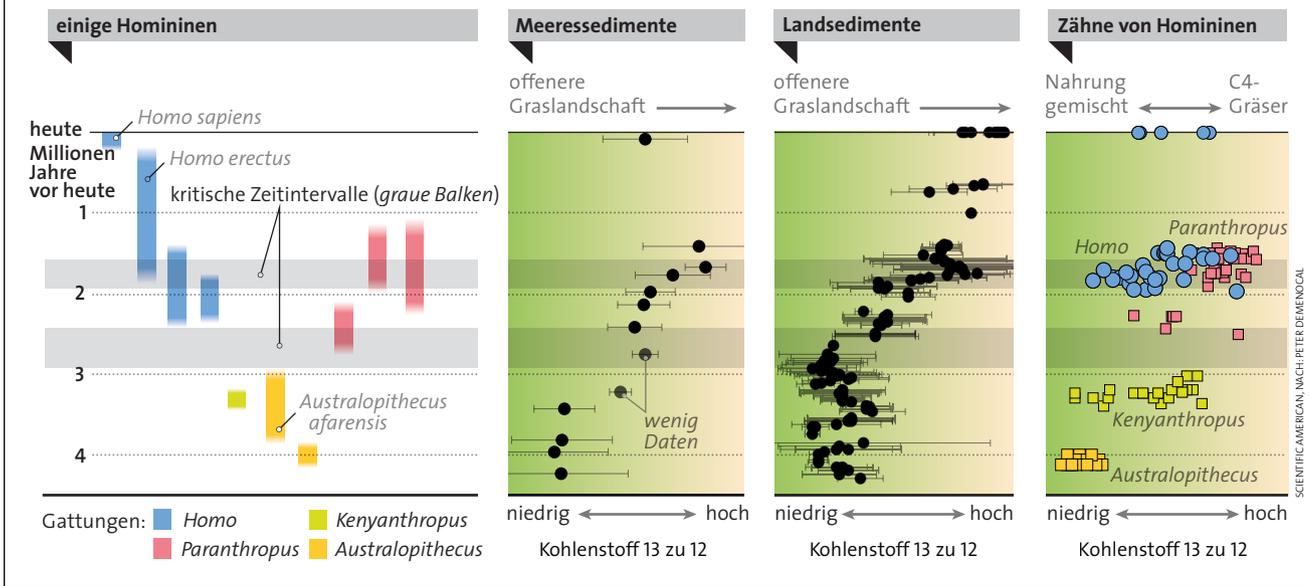
Unser Online-Dossier zum Thema »Klimawandel – Die Spuren der globalen Erwärmung« finden Sie unter [www.spektrum.de/t/klimawandel](http://www.spektrum.de/t/klimawandel)



# Klimasignaturen für Ostafrika

**Zwei bedeutsame Phasen der Menschenevolution** (graue Balken in der Grafik) gingen mit einem deutlichen Klimawandel einher. Zu Beginn der ersten dieser beiden Phasen starb *Australopithecus afarensis* aus. Die Wälder nahmen ab, und trockene

Grasländer breiteten sich rasch aus. Nun erschienen *Paranthropus* und *Homo*. In der zweiten Phase trat unser Vorfahr *Homo erectus* auf. Damals gewannen Savannen weiter Raum. Trotzdem nutzte *Homo erectus* eine breite Nahrungspalette.



scharfer Kante – und Schaber. Nur wenige hunderttausend Jahre jünger sind die ältesten Fossilien der Gattung *Homo*.

Dass diese Veränderungen bei den Homininen in eine Zeit des generellen Klimawandels fielen, wissen wir von Studien, die mit raffinierten Verfahren aufzeigen, ob die Vegetation eher an feuchte oder trockene Bedingungen angepasst war. Savannen sind offene tropische Ökosysteme aus Süß- und Sauergräsern mit hin und wieder eingesprengten lockeren Gehölzen. Typische Savannengräser zählen zu den C4-Pflanzen. Sie gedeihen in heißen, trockenen Regionen deswegen so gut, weil sie bei der Fotosynthese das Kohlendioxid aus der Atmosphäre mit einem Wasser sparenden molekularen Trick aufzunehmen – auf dem so genannten C4-Syntheseweg. Sie benötigen dabei auch weniger Kohlendioxid. Im Gegensatz dazu nutzen Gehölze sowie viele Gräser feuchterer Regionen bei der Fotosynthese den C3-Weg und verbrauchen dabei mehr Wasser.

Die C4-Pflanzen bauen relativ mehr von dem schwereren, selteneren Kohlenstoffisotop 13 im Verhältnis zu dem leichteren Isotop 12 ein als C3-Pflanzen. Diesen feinen Unterschied im Isotopenverhältnis nutzen Thure E. Cerling und seine Kollegen von der University of Utah in Salt Lake City, um die Vegetationsgeschichte prähistorischer Landschaften zu rekonstruieren. Denn sie entdeckten, dass sich der jeweilige Anteil von C4- und C3-Pflanzen anhand des Kohlenstoffquotienten in Boden- und Gesteinsproben recht genau bestimmen lässt.

Sie untersuchten auch Ablagerungen in Ostafrika an Stellen, wo Homininenfossilien gefunden worden waren. So

erkannten sie, dass dort bis vor acht Millionen Jahren C3-Pflanzen, somit Wälder und Buschland vorherrschten. Anschließend nahm der Anteil von C4-Pflanzen – also Grasland – allmählich zu. Einen verhältnismäßig kräftigen und raschen Zuwachs an Gräsern gab es dann auffälligerweise in dem Abschnitt von vor drei bis vor zwei Millionen Jahren. In dieser Zeit muss sich somit im Gebiet der heutigen Staaten Kenia, Äthiopien und Tansania rasch eine Savanne ausgebreitet haben. Damals stieg auch der Anteil grasender Säugetiere, wie deren viele Fossilien zeigen. Spät in dieser Phase, näher an zwei Millionen Jahren vor heute, müssen die Antilopen eine intensive Evolution durchgemacht haben. Ihre Arten lassen sich an der Form der zahlreich erhaltenen Hörner unterscheiden. Offensichtlich entstanden immer wieder neue Spezies, andere starben aus oder passten sich an veränderte Verhältnisse an. Das Ganze erinnert an die Homininen zu jener Zeit, auch wenn deren Artenzahl wesentlich geringer war.

Etwa ein Drittel aller afrikanischen Fossilien stammt von Hornträgern (Boviden), zu denen die Antilopen zählen. Für Hintergrundstudien zur Evolutionsgeschichte bieten sich die Boviden damit geradezu an. Die Paläontologin Elisabeth Vrba von der Yale University in New Haven (Connecticut) hat deren Schicksal in den letzten sechs Millionen Jahren für ganz Afrika untersucht. Dabei entdeckte sie Zeiten, in denen mehr Arten entstanden und ausstarben als normalerweise. Am meisten ragen eine Phase vor 2,8 und eine vor 1,8 Millionen Jahren heraus. Beide fielen mit Perioden zusammen, in denen das Grasland zunahm. Eine andere Studie zu Ostafrika

malt ein differenzierteres Bild: Einerseits entstanden damals vermehrt Hornträger, die mit ihren Backenzähnen gut hartes Gras zermalmen konnten und vermutlich in der Savanne lebten. Andererseits traten aber zugleich etliche Arten auf, die weichere Nahrung bevorzugten und vermutlich feuchtere Lebensräume bewohnten.

Die besagten Veränderungen der Vegetation berührten wohl auch unsere Vorfahren unmittelbar, denn schließlich mussten sie sich von ihrer Umwelt ernähren, also den Pflanzen und Tieren. Was jemand gegessen hat, erkennen Forscher ebenfalls unter anderem an den Kohlenstoffisotopen – in dem Fall in den Zahnfossilien. Wer heute auf Fast Food steht, wird sich als starker Konsument von C4-Pflanzen outen beziehungsweise von sie fressenden Tieren. Denn die Zucker in Snacks und Süßgetränken stammen zu einem Großteil aus Mais; die gleiche Quelle hat Viehfutter und somit Rindfleisch.

### Früher *Homo*: Überraschend vielseitiger Speiseplan

Wie der Speisezettel der Homininen vor knapp zwei Millionen Jahren aussah, hat ein Forscherteam um Cerling an Zähnen aus dem Turkana-Becken ermittelt. Demnach ernährten sich die bereits relativ modern wirkenden *Homo*-Vertreter und die robusten Formen tatsächlich recht verschieden. *Paranthropus boisei*, wegen seiner mächtigen Backenzähne und massiven Kiefer gern »Nussknackermensch« genannt, verzehrte hauptsächlich ein enges Spektrum von C4-Nahrung – die winzigen Kratzer auf seinen Zähnen sprechen für weiche C4-Gräser und Sauergräser. Nüsse knackte er anscheinend gar nicht.

Die große Überraschung war allerdings der frühe *Homo*. Seine Nahrung beruhte zu 65 Prozent auf C3- und nur zu 35 Prozent auf C4-Pflanzen. Das passte nicht zu seiner Umwelt, die damals zusehends homogener wurde mit immer mehr Vegetation vom C4-Typ. Offenbar wussten sich jene frühen Menschen in diesem eher eintönigen Lebensraum durchaus abwechslungsreich und flexibel zu ernähren. Diese Eigenschaft haben sie an ihre Nachfahren weitergereicht, während *Paranthropus* auf eine enge Nahrungsnische beschränkt war, was ihm evolutionär zum Verhängnis wurde.

Da jener *Homo* bereits komplexere Steinwerkzeuge herstellte als seine Vorfahren, die außerdem vielerlei Zwecke erfüllten – diverse sorgsam gearbeitete scharfe, handliche Geräte, darunter Faustkeile –, ist man versucht, einen Zusammenhang zu sehen. Erleichterten die Werkzeuge den Zugang zu der breiteren Palette von Nahrungsmitteln? Was diese Homininen tatsächlich im Einzelnen aßen, wissen wir längst noch nicht genau. Klar ist aber, dass ihre Ernährungsanpassungen letztlich Erfolg brachten.

Bei den Studien über C3- und C4-Pflanzen, ermittelt an Landsedimenten, blieben Lücken von einigen Jahrtausenden. Manche davon lassen sich wiederum mittels Proben vom Meeresboden auffüllen. Und zwar hinterlassen die Kohlenstoffisotope auch im schützenden Wachsfilm auf den Blättern der Landpflanzen ihre Signatur. Weil die kleinen Wachsmoleküle – zu den Lipiden zählende lange Ketten mit einem Kohlenstoffgrundgerüst – sehr beständig sind, bleiben sie

nach dem Absterben einer Pflanze oder eines Blatts erhalten und werden vom Wind mit mineralischem Staub und dergleichen auch ins Meer verweht. Sie lagern sich am Meeresgrund ab und lassen sich aus Bohrproben isolieren. Am Isotopenverhältnis des Kohlenstoffs ist dann das Verhältnis von C3- und C4-Pflanzen zu einer gegebenen Zeit erkennbar.

Mit diesem Verfahren konnten Sarah J. Feakins, jetzt an der University of Southern California in Los Angeles, und ihre Kollegen an Sedimenten aus dem Golf von Aden bestätigen, dass sich die Grasflächen im Lebensraum der Homininen im Zeitraum von vor drei bis vor zwei Millionen Jahren erheblich ausgedehnt haben. Zudem spiegelten auch diese Messungen deutlich die kurzen Klimazyklen, die mit der Präzession der Erdachse einhergehen und die Monsunregen beeinflussen. Manche jener kurzfristigen Klimaausschläge hin zu mehr Trockenheit scheinen schon fast den späteren Zustand mit den weiten Savannen vorweggenommen zu haben. In Sedimenten der Olduvai-Schlucht in Tansania von Orten, wo vor 1,9 Millionen Jahren Homininen lebten, fanden Clayton R. Magill und Katherine H. Freeman von der Pennsylvania State University in University Park Indizien für ähnliche Klimaschwankungen in dieser Zeit und danach.

Langsam wird klarer, was in den frühen Phasen der Menschwerdung wirklich vor sich ging. Das klassische Szenario, nach der unsere Vorfahren einst aus einem dunklen Urwald hervorkamen und sich bald darauf zu Herrschern über die Savanne aufschwangen, ist nicht mehr haltbar. Denn in Wirklichkeit wurden die Homininen regelmäßig mit schnellen, heftigen Klimawechseln konfrontiert, die ihnen mal eine trockenere, mal wieder eine feuchtere Umwelt bescherten. Außerdem mussten sie zwei große klimatische Verschiebungen bewältigen, in deren Folge schließlich die afrikanische Savannenlandschaft heutiger Prägung entstand. Manches spricht dafür, dass unsere Ahnen als Einzige genügend Flexibilität besaßen, um sich immer wieder an neue Verhältnisse anpassen zu können. ~

#### DER AUTOR



**Peter B. deMenocal** hat an der Columbia University in New York beim Lamont-Doherty Earth Observatory eine Professur in der Abteilung Geo- und Umweltwissenschaften. Er gehörte zu den Autoren des Berichts des Nationalen Forschungsrats der USA: »Understanding Climate's Influence on Human Evolution« (Einflüsse des Klimas auf die menschliche Evolution verstehen).

#### QUELLEN

- Antón, S. C. et al.:** Evolution of Early Homo: An Integrated Biological Perspective. In: Science 345, S. 45, 2014  
**Cerling, T. E. et al.:** Stable Isotope-Based Diet Reconstructions of Turkana Basin Hominins. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 110, S. 10501–10506, 2013  
**DeMenocal, P. B.:** Climate and Human Evolution. In: Science 331, S. 540–542, 2011

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323146](http://www.spektrum.de/artikel/1323146)

# THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT: Spektrum KOMPAKT

In den **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen finden Sie alle wichtigen Informationen zu einem bestimmten Themenkomplex als PDF-Download.

€ 4,99  
je Ausgabe



Diese und weitere Kompaktausgaben erhalten Sie unter:  
[www.spektrum.de/kompakt](http://www.spektrum.de/kompakt)

QR-Code per  
Smartphone  
scannen!



# Gentherapie, zweiter Anlauf

15 Jahre nach einer Serie tragischer Fehlschläge scheint die Gentherapie nun endlich bereit für den klinischen Einsatz. Erste durchschlagende Erfolge zeichnen sich ab – darunter die spektakuläre Heilung eines todgeweihten Mädchens.

Von Ricki Lewis

Ende der 1990er Jahre kam die Weiterentwicklung der Gentherapie ziemlich abrupt zum Stillstand. Denn am 17. September dieses Jahres erlag der Teenager Jesse Gelsinger, der an einer seltenen Stoffwechselerkrankung litt, den Folgen eines solchen Eingriffs. Sein Immunsystem hatte auf die Behandlung mit viralen Genfähern dermaßen aggressiv reagiert, dass er starb – womit die beteiligten Mediziner nicht im Mindesten gerechnet hatten. Geblendet von den frühen Erfolgen der Gentherapie hatten sie unrealistische Erwartungen gehegt und ihre diesbezüglichen Fähigkeiten überschätzt.

## AUF EINEN BLICK

### WIE DER PHÖNIX AUS DER ASCHE

**1** In den 1990er Jahren hegten viele Mediziner **überzogene Erwartungen** an die Gentherapie. Geblendet von Anfangserfolgen, überschätzten sie ihre Fähigkeiten auf dem Gebiet.

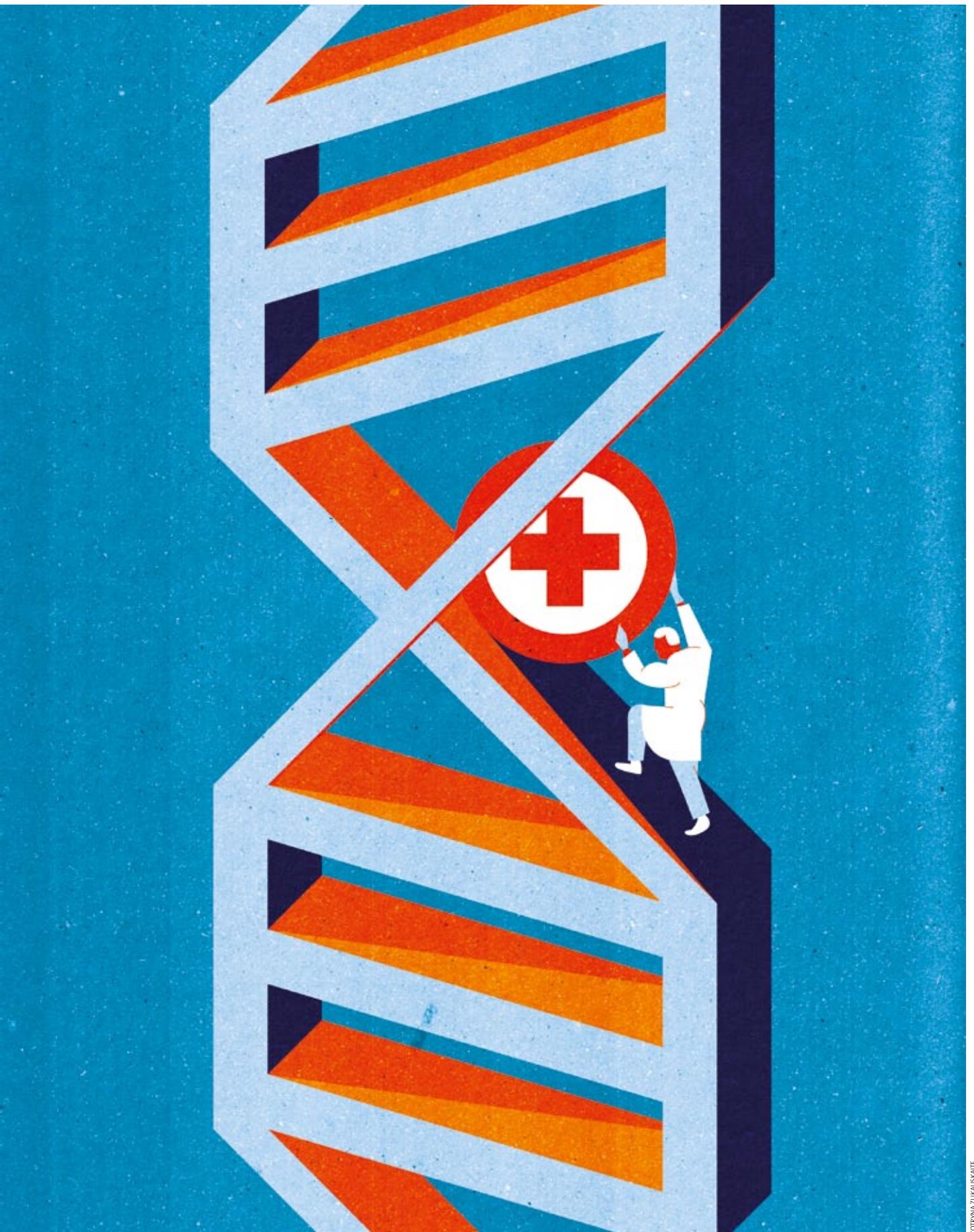
**2** **Tragische Fehlschläge** beim Anwenden dieser Therapie stürzten die Disziplin zur Jahrtausendwende in eine Krise. Die Forscher fokussierten fortan stärker darauf, die **biologischen und technischen Grundlagen** solcher Behandlungen zu untersuchen.

**3** **Neue Formen der Gentherapie**, die in der Anwendung sicherer sind, befinden sich nun auf dem Weg in den klinischen Routineeinsatz. In Europa wurde 2012 die erste Gentherapie behördlich zugelassen, die USA könnten bald folgen.

Die behördliche Zulassung für eine Gentherapie zu erhalten, ist für Mediziner eine gewaltige Hürde. Denn diese Art der Behandlung birgt zahlreiche Risiken, von überschießenden Immunreaktionen bis hin zur Entstehung von Krebs.

Gelsingers tragischer Tod und andere Fehlschläge zwangen viele Wissenschaftler dazu, ihr Vorgehen in Sachen Gentherapie zu überdenken und die klinische Tauglichkeit solcher Behandlungsansätze kritischer zu hinterfragen. Sie schraubten ihre Erwartungen zurück und wandten sich erneut der Grundlagenforschung zu, um der Methode eine Renaissance zu ermöglichen. So gelang es ihnen, potenziell tödliche Komplikationen besser vorausszusehen als vorher und sie zu vermeiden. Zudem verwandten sie mehr Sorgfalt darauf, Patienten und ihre Angehörigen über Nutzen und Risiken der Gentherapie aufzuklären.

Viele Beobachter stimmen darin überein, dass der Wendepunkt um das Jahr 2008 erreicht war. Damals behandelten Ärzte den acht Jahre alten Corey Haas, der infolge einer degenerativen Netzhauterkrankung allmählich erblindete. Eine Gentherapie befähigte die Netzhautzellen seines linken Auges dazu, ein bestimmtes Protein herzustellen, dessen Synthese zuvor wegen eines angeborenen Gendefekts nicht möglich gewesen war. Vier Tage nach der Behandlung besuchte Haas den Zoo und konnte zu seiner Verblüffung so-



KOTRINA ZUKAUSKAITĖ

wohl die Sonne als auch einen Heißluftballon erkennen. Drei Jahre später erhielt er die gleiche Therapie im rechten Auge. Inzwischen kann er wieder so gut sehen, dass er zusammen mit seinem Großvater auf Truthahnjagd geht.

### Europa als Vorreiter bei den Zulassungsverfahren

Gentherapien sind in Krankenhäusern zwar noch keine Routineverfahren. Doch das könnte sich in absehbarer Zeit ändern. Die Europäische Arzneimittel-Agentur EMA hat 2012 die erste Gentherapie zugelassen, und zwar zur Behandlung einer seltenen, aber extrem schmerzhaften Stoffwechselerkrankung namens familiärer Lipoproteinlipase-Mangel. 2013 hoben die Nationalen Gesundheitsinstitute in den USA (NIH) einige restriktive Vorschriften auf dem Gebiet auf, weil sie nicht mehr notwendig erschienen. Kenner der Pharmaindustrie rechnen für das Jahr 2016 mit der Zulassung des ersten kommerziellen Gentherapieverfahrens in den USA. Nach einem verlorenen Jahrzehnt schickt die Gentherapie sich nun doch an, ihr Versprechen auf revolutionäre Behandlungsansätze einzulösen.

Die frühen Fehlschläge der Gentherapie illustrieren, wie schwierig es ist, Fremd-DNA effektiv und gefahrlos ins Zielgewebe einzubringen. Sichere Gentransferverfahren waren oft nicht sehr effektiv, und effektive Methoden waren oft nicht sicher – entweder weil sie verheerende Immunreaktionen auslösen konnten, wie im Fall von Jesse Gelsinger, oder weil sie das Risiko bargen, beim behandelten Patienten eine Krebserkrankung zu verursachen.

Um herauszufinden, wie diese Nebenwirkungen entstehen und wie sie sich vermeiden lassen, konzentrierten sich die Wissenschaftler auf das am häufigsten verwendete Transportvehikel zum Einschleusen von Genmaterial: Ein Virus wird so modifiziert, dass es als Genfähre (als so genannter Vektor) agiert. Dazu entfernen die Forscher zunächst einige Bereiche aus dem viralen Genom, um Raum für die therapeutischen Gene zu schaffen, die sie in die Zellen des Patienten einbringen wollen. Die Verstümmelung des Virusgenoms hat zudem den Vorteil, dass sich das infektiöse Partikel im Körper nicht vermehren kann und somit das Risiko einer schweren Immunreaktion sinkt. Nachdem man die so veränderten Viren in den Körper des Patienten injiziert hat, bauen sie die therapeutischen Gene in verschiedene Zellen und dort an verschiedenen Stellen ein. Wo dies geschieht, hängt vom Typ des Virus ab.

Als Jesse Gelsinger sich Ende der 1990er Jahre entschloss, an einer klinischen Gentherapiestudie teilzunehmen, setzten die Forscher hauptsächlich auf Adenoviren als Genfähren. Normalerweise verursachen diese Partikel harmlose Infektionen der oberen Atemwege. Wissenschaftler von der University of Pennsylvania kamen zu dem Schluss, den größ-

ten Erfolg verspreche das Injizieren der Viren in die Leber – eben dorthin, wo spezialisierte Zellen normalerweise jenes Stoffwechsellenzym produzieren, das Gelsinger fehlte. Die Forscher verpackten intakte Gene, die den Bauplan für dieses Enzym enthalten, in modifizierte Adenoviren. Dann injizierten sie etwa eine Billion der so hergestellten Viren in Gelsingers Leber.

Daraufhin geschah etwas Unvorhergesehenes. Die Viren infizierten nicht nur Leberzellen, sondern auch Makrophagen und dendritische Zellen. Makrophagen sind große bewegliche Abwehrzellen, die als Wächter des Immunsystems fungieren; dendritische Zellen melden dem Körper das Eindringen von Krankheitserregern. Gelsingers Immunsystem

reagierte darauf, indem es sämtliche infizierten Zellen vernichtete, was verheerende Schäden im gesamten Organismus anrichtete.

Mit dieser Reaktion wussten die Mediziner nicht umzugehen. Bei keinem von

den 17 Studienteilnehmern, die an derselben Erkrankung litten und sich der gleichen Behandlung unterzogen hatten, waren so schwere Nebenwirkungen aufgetreten. Den Forschern war bewusst gewesen, dass Adenoviren Immunreaktionen auslösen, doch nicht, dass diese so extrem ausfallen können. In einer der vorangegangenen Tierstudien hatte es einen Affen gegeben, der an der Behandlung starb – allerdings war das Tier mit einem anderen Virenkonstrukt behandelt worden als Gelsinger. »Menschen unterscheiden sich untereinander viel stärker als Versuchstiere«, erläutert James Wilson von der University of Pennsylvania. Er hatte das virale Gentransfersystem entwickelt, das bei Jesse Gelsinger und anderen Studienteilnehmern eingesetzt worden war. In der Rückschau betrachtet wäre es wohl klüger gewesen, dem Patienten zunächst nur einige Milliarden Viruspartikel zu injizieren statt einer Billion, ergänzt der Mediziner.

Die Ärzte wurden auch dafür kritisiert, dass sie Gelsinger und seine Familie nicht über den Tod des Affen in der vorausgegangenen Tierstudie aufgeklärt hatten. Dem Patienten und seinen Angehörigen wäre es so möglich gewesen, die mutmaßlichen Risiken der Behandlung besser informiert einzuschätzen.

### Verhängnisvolle Nebenwirkungen

Der Tod Gelsingers war nicht das einzige tragische Ereignis in der Geschichte der Gentherapie. Kurz darauf führte die Behandlung eines anderen Krankheitsbilds, des Schwere kombinierten Immundefekts X1 (SCID-X1), bei 5 von 20 Kindern zum Ausbruch von Leukämie – in einem Fall mit tödlichem Ausgang. Wieder war es das virale Gentransportvehikel, das die Komplikationen verursachte. Es handelte sich allerdings nicht um ein Adenovirus, sondern um ein Retrovirus, das seine Genfracht direkt in die DNA der infizierten Zelle einbaut. An welchen Stellen innerhalb des Genoms

Sichere Gentransferverfahren  
waren oft nicht sehr effektiv,  
und effektive Methoden waren  
oft nicht sicher

das geschieht, ist nicht exakt vorhersagbar. Manchmal fügt das Retrovirus sein Erbgut in ein Onkogen ein, was unter bestimmten Umständen Krebs auslöst.

Angesichts der Tatsache, dass Adenoviren tödliche Immunreaktionen provozieren und Retroviren Krebs hervorrufen können, begannen sich die Forscher nach weniger riskanten Alternativen umzusehen. Bald schon konzentrier-

ten sie sich auf zwei besonders viel versprechende virale Vektoren.

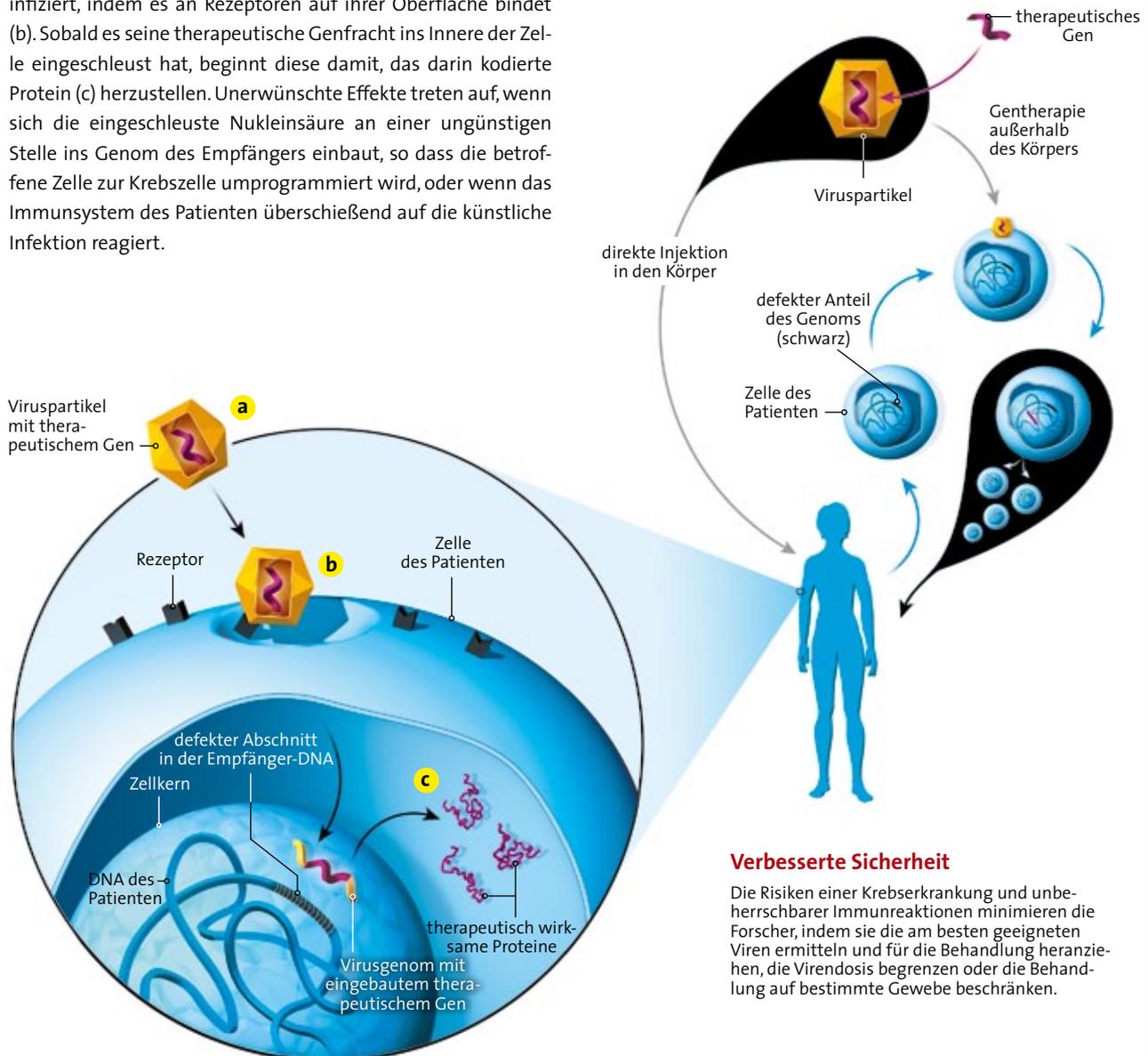
Adeno-assoziierte Viren (AAV) verursachen keine Krankheitssymptome, obwohl sich die meisten Menschen irgendwann damit infizieren. Wenn man sie als Genfähren einsetzt, ist das Risiko überschießender Immunreaktionen deshalb gering. Zudem treten sie in mehreren Varianten (Serotypen)

## Methoden der Gentherapie – und ihre Fallstricke

**Die Gentherapie zielt meist darauf ab,** den Funktionsverlust eines defekten körpereigenen Gens zu kompensieren. In der Regel geschieht das durch Verpacken einer intakten Kopie des Gens in ein Viruspartikel, dessen eigenes Genom größtenteils entfernt wurde (unten, a). Das so veränderte Virus wird dann in den Körper des Patienten gebracht, wo es die jeweiligen Zielzellen infiziert, indem es an Rezeptoren auf ihrer Oberfläche bindet (b). Sobald es seine therapeutische Genfracht ins Innere der Zelle eingeschleust hat, beginnt diese damit, das darin kodierte Protein (c) herzustellen. Unerwünschte Effekte treten auf, wenn sich die eingeschleuste Nukleinsäure an einer ungünstigen Stelle ins Genom des Empfängers einbaut, so dass die betroffene Zelle zur Krebszelle umprogrammiert wird, oder wenn das Immunsystem des Patienten überschießend auf die künstliche Infektion reagiert.

### Zwei Verabreichungswege

Mediziner können die veränderten Viruspartikel nicht nur direkt in den Körper des Patienten spritzen, sondern diesem auch Körperzellen entnehmen, in die sie das therapeutische Genmaterial einbringen; darauf werden die Zellen in den Empfänger zurück überführt (unten rechts). Da sich die therapeutische Nukleinsäure ins Genom der Körperzellen integriert, bleibt sie nach Zellteilungen auch in den Tochterzellen erhalten.



### Verbesserte Sicherheit

Die Risiken einer Krebserkrankung und unbeherrschbarer Immunreaktionen minimieren die Forscher, indem sie die am besten geeigneten Viren ermitteln und für die Behandlung heranziehen, die Virendosis begrenzen oder die Behandlung auf bestimmte Gewebe beschränken.

auf, die jeweils bevorzugt bestimmte Zelltypen oder Gewebe befallen. AAV2 etwa favorisiert Zellen im Auge, AAV8 Leberzellen, und AAV9 infiziert Gewebe im Herzen oder im Gehirn. Diese Spezifität erlaubt es, denjenigen Serotyp für die Behandlung auszuwählen, der sich für das jeweils zu therapierende Organ am besten eignet. Von einer spezifisch wirkenden Virenvariante braucht man weniger Partikel, um den gewünschten Effekt zu erzielen, als von einem unspezifischen Serotyp. Das verringert das Risiko unbeherrschbarer Immunreaktionen und anderer gefährlicher Nebenwirkungen. Zudem platzieren AAV ihre Genfracht außerhalb der Chromosomen der Zielzelle – sie können also nicht ungewollt Onkogene aktivieren und so Krebs auslösen.

Adeno-assoziierte Viren wurden erstmals 1996 zur Gentherapie der Mukoviszidose eingesetzt. Seitdem haben Wissenschaftler insgesamt elf AAV-Serotypen identifiziert und aus Bestandteilen von deren Genomen hunderte Gentransportvehikel konstruiert, die offenkundig selektiv wirken und kaum Nebenwirkungen hervorrufen. Derzeit laufen klinische Studien darüber, ob Gentherapien auf Basis von AAV gegen Hirnkrankheiten wie Alzheimerdemenz und Morbus Parkinson helfen oder auch gegen Bluterkrankheit, Muskeldystrophie, Herzinsuffizienz und erblich erworbene Blindheit.

Bei dem zweiten alternativen Vektor handelt es sich erstaunlicherweise um HI-Viren, aus deren Genomen einige Teile entfernt wurden. In ihrer natürlichen Erscheinungsform können diese Viren Aids auslösen, doch abgewandelt eignen sie sich sehr gut für eine Gentherapie. Denn als Vertreter der Lentiviren entziehen sie sich den Angriffen des Immunsystems und – besonders wichtig – beeinflussen normalerweise nicht die Funktion von Onkogenen.

### **Wie bekommt man große Genladungen in die Zellen?**

Wenn aus dem HIV-Genom jene Gene entfernt sind, die das Virus zu einem potenziellen Killer machen, werde die Virenhülle zu einem Gentransportvehikel »mit hoher Kapazität«, sagt Stuart Naylor, ehemaliger wissenschaftlicher Leiter des englischen Unternehmens Oxford Biomedica, das Medikamente auf Basis von Nukleinsäuren für die Behandlung von Augenerkrankungen entwickelt. Im Gegensatz zu den kleineren AAV seien modifizierte HIV sehr gut geeignet, um besonders große Gene oder mehrere Gene gleichzeitig in die Zielzelle einzuschleusen. Schädliche Nebenwirkungen oder unerwünschte Immunreaktionen träten dabei nicht auf. »Entkernte« Lentiviren kommen zurzeit in einer Reihe klinischer Studien zum Einsatz, unter anderem um Fettspeicherkrankheiten aus der Gruppe der Adrenoleukodystrophien zu behandeln. Bei einigen betroffenen Kindern, die eine solche Gentherapie erhielten, besserten sich die Krankheits-

symptome so sehr, dass sie wieder die Schule besuchen konnten.

Während also bereits klinische Studien mit AAV- und HIV-basierten Gentherapien laufen, gehen andere Forscher quasi einen Schritt zurück und modifizieren ältere virale Vektoren, so dass diese unter bestimmten Voraussetzungen wieder brauchbare Transportvehikel abgeben. Zum Beispiel lassen sich manche Retroviren genetisch so verändern, dass sie sich selbst inaktivieren, bevor sie eine Leukämie auslösen können.

Selbst Adenoviren, also Vertreter jenes Virentyps, der Gelsingers Tod verursachte, erleben in klinischen Studien ein Comeback als Genvehikel. Mediziner beschränken ihren Einsatz jedoch auf solche Körperregionen, wo es aller Wahrscheinlichkeit nach nicht zu einer Immunreaktion kommt.

Ein viel versprechender Anwendungsbereich ist die Xerostomie (Mundtrockenheit) bei Patienten, deren Speicheldrüsen durch Bestrahlung eines Tumors im Kopf-Hals-Bereich zerstört wurden. Die Nationalen Ge-

sundheitsinstitute der USA führen zurzeit eine kleine Studie durch, in der Xerostomiepatienten eine Gentherapie erhalten, um in ihren Speicheldrüsen die Bildung von Wassertransportkanälen anzukurbeln. Da die Drüsen klein und klar abgegrenzt sind, reicht für die Behandlung eine 1000-fach niedrigere Virenmenge aus als jene, die Gelsinger erhielt. Das Risiko einer überschießenden Immunreaktion ist also viel geringer. Zudem dürften Viren, die ihre Zielzellen nicht infiziert haben, mit dem Speichel ausgespült und verschluckt oder ausgespuckt werden – sie haben daher kaum Gelegenheit, das Immunsystem zu irritieren. Seit dem Jahr 2006 haben elf Xerostomiepatienten diese Gentherapie erhalten, und bei sechs von ihnen verbesserte sich der Speichelfluss deutlich. Bruce Baum, Zahnarzt, Biochemiker und früherer Leiter der Studie, fühlt sich angesichts der Ergebnisse »vorsichtig optimistisch« gestimmt.

Ermutigt von diesen Erfolgen wagen sich medizinische Forscher jetzt auch über das Gebiet der Erbkrankheiten hinaus: Sie versuchen, Schäden im Erbgut zu reparieren, die im Lauf des Lebens erworben werden. So wollen Wissenschaftler von der University of Pennsylvania mit gentherapeutischen Methoden einen bei Kindern relativ häufigen Blutkrebs behandeln, die akute lymphatische Leukämie (ALL). Zwar sprechen die meisten betroffenen Kinder auf übliche Chemotherapien an, bei 20 Prozent der Patienten erweisen sich diese jedoch als unwirksam. Wissenschaftler versuchen daher, das Immunsystem der Kleinen genetisch so »aufzurüsten«, dass es chemotherapieresistente Leukämiezellen aufspürt und abtötet.

Ein besonders komplexer Behandlungsansatz beruht auf so genannten chimären Antigenrezeptoren (CAR). Wie die Chimäre – jenes Sagenwesen aus der griechischen Mytholo-

gie, das aus verschiedenen Tieren zusammengesetzt ist – besteht auch ein künstlich hergestellter CAR aus verschiedenen Molekülen des Immunsystems, die natürlicherweise nicht zusammen auftreten. Werden bestimmte Zellen der Körperabwehr, so genannte T-Lymphozyten, über eine Gentherapie mit bestimmten CAR ausgestattet, dann verleiht ihnen das die Fähigkeit, charakteristische Proteine auf Leukämiezellen zu erkennen und die Zellen zu zerstören. Die ersten zehn Patienten, die mit dieser Methode behandelt wurden, waren chronisch leukämiekrank Erwachsene. Sie sprachen recht gut auf die Therapie an. Als Nächstes testeten die Mediziner das Verfahren an einem Kind – und hier übertrafen die Ergebnisse ihre kühnsten Hoffnungen.

Emily Whitehead war fünf Jahre alt, als Ärzte im Mai 2010 bei ihr eine Leukämieerkrankung feststellten. Das Kind wurde mit konventioneller Chemotherapie behandelt, allerdings ohne Erfolg. Im Frühjahr 2012 wendeten Mediziner bei ihr eine hochdosierte Chemotherapie an, »die einen Erwachsenen umgebracht hätte, und trotzdem litt sie immer noch an Tumoren in Leber, Milz und Nieren«, berichtet Bruce Levine, einer von Emilys Ärzten. Alle Beteiligten mussten sich auf das Schlimmste einstellen: Das Mädchen, so viel schien klar, würde nur noch wenige Tage leben.

### Rettung im letzten Moment

In dieser verzweifelten Situation entnahmen ihr die Ärzte eine Blutprobe und isolierten daraus T-Lymphozyten. Sie infizierten die Zellen mit künstlich modifizierten Lentiviren, die den genetischen Bauplan für einen bestimmten CAR enthielten, und gaben die veränderten Zellen der Patientin mittels Infusion zurück. Zunächst war kein Effekt erkennbar, aber dann besserte sich der Zustand des Mädchens in verblüffendem Tempo. Drei Wochen nach der Infusion war das therapeutische Gen bereits in jedem vierten T-Lymphozyten in Emilys Knochenmark nachweisbar. Die genetisch aufgerüsteten Immunzellen griffen die Krebszellen an und vernichteten sie. »Noch im April hatte Emily kein einziges Haar auf dem Kopf«, erinnert sich Levine. »Kaum vier Monate später, im August, trat sie den Unterricht in der 2. Klasse an.« Inzwischen zeigt das Mädchen keinerlei Anzeichen einer Leukämie mehr.

Die gentherapeutisch veränderten T-Lymphozyten werden vielleicht nicht dauerhaft in Emilys Körper bleiben, doch bei Bedarf können die Ärzte die Therapie wiederholen. Und Emily ist nicht die einzige Patientin, bei der es Erfolge zu vermelden gibt. Ende 2013 lagen Daten von mehr als 120 Leukämiepatienten vor, die mit einer CAR-Gentherapie behandelt worden waren. 5 von 19 Erwachsenen und 19 von 22 Kindern erreichten die komplette Remission, das heißt, sie sind derzeit symptomfrei.

Nachdem nun sichere virale Vektoren zur Verfügung stehen, wagen sich Gentherapeuten an die größte Hürde, die jede neue Therapieform nehmen muss: die Zulassung durch die Arzneimittelbehörde. Hierfür müssen sich die Behandlungsverfahren in klinischen Studien der Phase III bewähren,

an denen große Patientengruppen teilnehmen und die ein bis fünf Jahre in Anspruch nehmen. Anfang 2014 hatten etwa 100 von insgesamt 2000 Gentherapieansätzen die klinische Phase III erreicht. Eine der am weitesten fortgeschrittenen Methoden ist die Behandlung der kongenitalen Leber-Amaurose, jener Krankheit, die Corey Haas seines Augenlichts beraubt hatte. Mehrere dutzend Patienten haben nach einer Gentherapie an beiden Augen ihr Sehvermögen wiedererlangt.

China war das erste Land, in dem eine Gentherapie gegen Kopf-Hals-Tumoren zugelassen wurde. Und im Jahr 2012 erteilte die Europäische Arzneimittel-Agentur die Zulassung für Glybera, eine Gentherapie zur Behandlung des familiären Lipoproteinlipase-Mangels. Dabei injizieren die Ärzte Adeno-assoziierte Viren mit funktionsfähigen Versionen des mutierten Gens in den Oberschenkel der Patienten. Das Unternehmen uniQure mit Sitz in den Niederlanden verhandelt derzeit mit der US-Arzneimittelbehörde über die Zulassung Glyberas in den USA. Die Kosten der Therapie sind mit mehr als einer Million Dollar pro Behandlungsdosis zwar noch außerordentlich hoch, dürften jedoch mit dem künftigen methodischen Fortschritt sinken.

Ähnlich wie bei anderen neuen Behandlungsverfahren war der jahrzehntelange Marsch hin zu erfolgreichen Gentherapien äußerst schwierig. Und er ist noch lange nicht beendet. Doch mit jedem weiteren erfolgreich behandelten Patienten rücken Gentherapien ein Stück weiter in den klinischen Alltag. ~

### DIE AUTORIN



**Ricki Lewis** ist promovierte Genetikerin und Wissenschaftsjournalistin. Sie hat zahlreiche Sach- und Lehrbücher sowie Zeitschriftenartikel über die Gentherapie verfasst.

### QUELLEN

**Colella, P., Auricchio, A.:** Gene Therapy of Inherited Retinopathies: A Long and Successful Road from Viral Vectors to Patients. In: Human Gene Therapy 8, S. 796–807, 2012

**Day, T.P. et al.:** Advances in AAV Vector Development for Gene Therapy in the Retina. In: Advances in Experimental Medicine and Biology 801, S. 687–693, 2014

**Vandenberghe, L.H., Auricchio, A.:** Novel Adeno-Associated Viral Vectors for Retinal Gene Therapy. In: Gene Therapy 2, S. 162–168, 2012

### WEBLINKS

<http://ghr.nlm.nih.gov/handbook/therapy>  
Informationen zur Gentherapie von den Nationalen Gesundheitsinstituten der USA (englisch)

[www.dg-gt.de/index.html](http://www.dg-gt.de/index.html)  
Die Deutsche Gesellschaft für Gentherapie stellt sich vor.

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323147](http://www.spektrum.de/artikel/1323147)

# Die totale Erinnerung

Manche Menschen können sich an Ereignisse, die sie vor 20 und mehr Jahren erlebt haben, wie auf Knopfdruck bis in kleine Details erinnern – als wäre es gestern gewesen. Neurowissenschaftler versuchen die biologischen Grundlagen dieser phänomenalen Fähigkeit zu enträtseln.

Von James L. McGaugh und Aurora LePort

**A**nfang 2000 erhielt einer von uns (McGaugh) die E-Mail einer Frau namens Jill Price, die unter ihrer extremen Gedächtnisleistung litt. Unter anderem schrieb sie:

»Hoffentlich können Sie mir irgendwie helfen. Ich bin 34 Jahre alt, und mit elf erwarb ich diese unglaubliche Fähigkeit, mich zu erinnern ... Ich kann Ihnen für jedes Datum zwischen 1974 und heute sagen, auf welchen Wochentag es fällt und was ich an dem Tag tat, und wenn damals irgendetwas sehr Wichtiges geschah, kann ich es Ihnen beschreiben. Ich schaue vorher nicht in einen Kalender, und ich lese auch nicht in den Tagebüchern, die ich seit 24 Jahren führe.«

Wir bezweifelten zwar, was Price behauptete, wurden aber doch neugierig und luden sie in unser Forschungszentrum an der University of California in Irvine ein, wo wir die neurobiologischen Grundlagen von Lernen und Gedächtnis studieren. Am 24. Juni 2000 erschien Price zum verabredeten Termin; das war ein Samstag. Wir wissen das noch, weil ihr Besuch auf einem Laborkalender verzeichnet ist. Price hingegen braucht keinen Kalender, um sich an solche Fakten zu erinnern.

In jenem ersten Gespräch waren wir vorsichtig und suchten nach einem objektiven Mittel, um die Behauptungen von Price zu bewerten. Was sie uns über ihre private Vergangenheit erzählte, ließ sich natürlich nicht unmittelbar prüfen. Doch wir konnten Price über öffentliche Ereignisse aus-

fragen, die im Lauf ihres Lebens stattgefunden hatten. Zur Überprüfung benutzten wir ein gerade erschienenes Buch, »20th Century Day by Day« von Sharon Lucas, das Nachrichten zu jedem Tag der vergangenen 100 Jahre enthielt.

Wir begannen mit der Mitte der 1970er Jahre, denn damals war Price erstmals ihr seltsames Erinnerungsvermögen aufgefallen. Als wir sie fragten, was am 16. August 1977 geschehen war, antwortete sie sofort, da sei Elvis Presley gestorben. Als wir den 6. Juni 1978 nannten, sagte sie, an dem Tag sei die California Proposition 13, ein Antrag zur Begrenzung der Vermögenssteuer, in Kraft getreten. Am 25. Mai 1979 war ein Flugzeug in Chicago abgestürzt. Am 3. Mai 1991 wurde die letzte Folge der Fernsehserie »Dallas« gesendet. Und so weiter. Price wusste jedes Mal die Antwort.

Dann verlangten wir umgekehrt, Price solle zu einem besonderen Ereignis das Datum nennen: Wann wurde im Fernsehen J.R. Ewing, der Bösewicht aus »Dallas«, angeschossen? Wann haben Polizisten – im richtigen Leben – den Afroamerikaner Rodney King zusammengeschlagen? Wiederum gab Price stets sofort die richtige Antwort. Während der Tests entdeckte sie sogar in dem von uns benutzten Buch ein falsches Datum für den Beginn der Geiselnahme von Teheran im Jahr 1979, als iranische Studenten die amerikanische Botschaft stürmten und zahlreiche Mitarbeiter gefangen nahmen.

Zwar hatten öffentliche Ereignisse an vielen der von uns abgefragten Daten beträchtliches Aufsehen in den Medien erregt, aber Price erinnerte sich auch hervorragend an weniger spektakuläre Vorfälle. Sie gab zutreffend an, dass der Sänger und Schauspieler Bing Crosby am 14. Oktober 1977 auf einem spanischen Golfplatz gestorben war. Auf unsere Frage, woher sie das wusste, antwortete sie, sie habe die Todesnachricht mit elf Jahren im Autoradio gehört, als ihre Mutter sie zu einem Fußballspiel fuhr. In einem Gespräch beschrieb sie das Erinnern als visuelle Erfahrung: »Wenn ich ein Datum höre, sehe ich es, den Tag, den Monat, das Jahr.«

Bei einer Befragung im März 2003 irrte sie sich nur ein einziges Mal, als sie für alle vergangenen 23 Jahre nicht nur das genaue Datum des Osterfests angeben sollte, sondern auch, was sie jeweils getan hatte – obwohl sie jüdischen Glaubens

## AUF EINEN BLICK

### EINE SELTENE GABE

**1** Im Jahr 2000 machte eine Frau mit der Behauptung auf sich aufmerksam, sie könne sich lebhaft und vollständig an **längst vergangene Erlebnisse** erinnern. Daraufhin meldeten sich hunderte weitere Personen, die angaben, ebenfalls diese Gabe zu besitzen.

**2** Wie systematische Tests erbrachten, können einige dutzend Menschen aus dieser Gruppe tatsächlich **detaillierte Erinnerungen** an einen **beliebigen Tag** vor vielen Jahren wachrufen.

**3** Diese **seltene Fähigkeit** weiter zu erforschen, verspricht neue Erkenntnisse darüber, wie unser **Gehirn** Informationen speichert, organisiert und wiedergibt.



Personen mit »überlegenem autobiografischem Gedächtnis« können zu einem beliebigem Datum aus ihrer Vergangenheit Erlebnisse von privatem oder öffentlichem Interesse nennen.

ist. Viele ihrer Behauptungen konnten wir anhand eines von ihr viele Jahre lang geführten Tagebuchs bestätigen. Aktuellere Angaben überprüften wir durch Vergleich mit unseren eigenen Aufzeichnungen der Gedächtnistests: Sie erinnerte sich präzise an die Daten aller früheren Tests und an Details der von uns gestellten Fragen.

Nachdem wir uns überzeugt hatten, dass die Fähigkeiten von Price echt waren, wollten wir wissen, ob sie sich auch auf andere Aspekte des Erinnerns erstreckten. Wie wir feststellten, besitzt Price kein fotografisches Gedächtnis – das heißt, sie erinnert sich nicht an jedes aktuelle Detail ihres Alltags. Nur mit Mühe findet sie ihre Schlüssel. Sie macht Merklisten von Dingen, die sie tun muss. Sie kann Fakten nicht besonders gut auswendig lernen.

Doch Price weiß zuverlässig zu jedem Datum, das nicht zu knapp nach ihrem elften Geburtstag liegt, den richtigen Wochentag. Ihre Erinnerung an fast jeden Tag ihres Lebens nach der Pubertät ist hochgeordnet, verlässlich und präzise. Bevor Price in unser Labor trat, war diese besondere Fähigkeit, die wir hochgradig überlegenes autobiografisches Gedächtnis (highly superior autobiographical memory, abgekürzt HSAM) nennen, noch nie erforscht worden. Seither dringen wir tiefer zu den psychologischen und biologischen Wurzeln des Phänomens vor, denn wir hoffen, dadurch mehr über die dem Gedächtnis zu Grunde liegenden Prozesse zu erfahren.

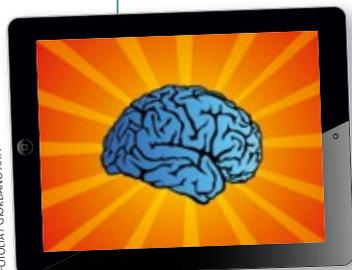
### Wie häufig ist totale Erinnerung?

Mehrere Jahre lang bezeichneten wir Jill Price mit den fiktiven Initialen »A.J.«, weil sie anonym bleiben wollte. Durch einen 2006 publizierten Fachartikel und durch Hörfunkinterviews wurde unsere Arbeit in den USA allgemein bekannt. Price entschloss sich daraufhin, ihr Inkognito zu lüften, und veröffentlichte 2008 das Buch »The Woman Who Can't Forget«.

Nun kontaktierten uns andere Personen, die meinten, über ähnliche Fähigkeiten zu verfügen. Wir unterwarfen sie strengen Tests und filterten fünf zusätzliche HSAM-Fälle heraus. Im Dezember 2010 wurden diese im Fernsehmagazin »60 Minutes« präsentiert. Schon wenige Stunden danach empfangen wir Dutzende E-Mails von potenziellen Versuchspersonen, und binnen Tagen erreichten uns Hunderte. Wir riefen viele dieser Menschen an und stellten ihnen Testfragen über Ereignisse aus Sport und Politik, über Berühmtheiten, Feiertage und Flugzeugabstürze.

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

Unser Online-Dossier zum Thema »Hirnforschung – der tiefe Blick in unser Denkkorgan« finden Sie unter [www.spektrum.de/t/hirnforschung](http://www.spektrum.de/t/hirnforschung)



FOTOLIA / GORDANO ANITA

Außerdem begannen wir an unserem Zentrum mit einer systematischen Testreihe, indem wir zusätzlich zur Gruppe mit mutmaßlich überlegenem Gedächtnis eine Kontrollgruppe von mehreren Dutzend Personen entsprechenden Alters und Geschlechts rekrutierten. Dabei zeigten einige derjenigen, die sich besonderer Erinnerungsfähigkeit rühmten, schlechtere Leistungen als die Kontrollgruppe. Offensichtlich ist auch bei HSAM mitunter der Wunsch Vater des Gedankens.

Die rund 40 Personen mit tatsächlich guten Ergebnissen absolvierten dann zusammen mit der Kontrollgruppe einen zusätzlichen Test, bei dem sie zu jedem von zehn zufällig ausgewählten Daten nicht nur den Wochentag angeben mussten, sondern auch ein Ereignis von öffentlichem sowie eines von privatem Interesse. Die Gruppe der HSAM-Kandidaten bestand alle Teile dieser Testaufgabe signifikant besser als die Kontrollpersonen.

Die elf Besten wurden anschließend in unserem Universitätslabor weiter geprüft. Sie sollten zunächst Fragen zu fünf persönlichen, für uns nachprüfaren Erlebnissen beantworten: den ersten Schultag, den Antritt des Studiums, die Feier zu ihrem 18. Geburtstag, Adresse und Beschreibung ihrer ersten eigenen Wohnung, das Datum ihrer Abschlussprüfung an der Hochschule. Die elf HSAM-Kandidaten übertrafen die Trefferquote der Kontrollpersonen bei Weitem – mit insgesamt 85 zu nur 8 Prozent. Diese elf Personen, die 27 bis 60 Jahre alt waren, besaßen demnach unzweifelhaft HSAM.

Außerdem unterzogen wir die HSAM-Gruppe einer Serie von Labortests zur Merkfähigkeit. Sie schlug die Kontrollgruppe nur in zwei von acht Tests: beim Assoziieren von Namen mit Gesichtern und beim Erinnern an visuelle Objekte. Doch auch in diesen beiden Tests unterschieden sich die Erfolge der Gruppen nicht wesentlich.

Die HSAM-Gruppe wies auch sonst ein paar auffällige Eigenschaften auf. Sie enthielt überdurchschnittlich viele Linkshänder – fünf von elf – und lieferte bei einem Test zur zwanghaften Persönlichkeitsstörung signifikant höhere Ergebnisse. Auch im Einzelgespräch offenbarten sich Zwangsstörungen wie Horten von Besitztümern und übertriebene Scheu vor dem Berühren von Gegenständen wegen vermeintlicher Ansteckungsgefahr.

Wir fragten uns: Haben die Unterschiede der Gedächtnisleistung hirnhysiologische Ursachen? Mittels Magnetresonanztomografie (MRT) sahen wir, dass Größe und Form mehrerer Hirnregionen von HSAM-Personen sich von denen der Kontrollgruppe unterschieden. Das betraf sowohl die Nervenzellkörper enthaltende graue Substanz als auch die weiße Substanz, in der die von hellen Myelinscheiden umhüllten Nervenfasern verlaufen. Die Struktur der Leitungsbahnen in der weißen Substanz deutete bei ihnen auf eine bessere Informationsübertragung zwischen Hirnregionen hin.

Aus den Ergebnissen anderer Labors, welche die Folgen von Hirnschädigungen mittels funktioneller MRT und Positronenemissionstomografie untersuchen, ist bekannt, dass die bei HSAM-Personen auffälligen Hirnregionen und Lei-



Durch eine Anfrage machte Jill Price Forscher an der University of California in Irvine auf ihr ungewöhnliches Erinnerungsvermögen aufmerksam. Seither wurden weitere Personen mit »überlegenem autobiografischem Gedächtnis« identifiziert und systematisch untersucht.

tungsbahnen tatsächlich mit dem Erinnern von Erlebnissen zu tun haben – also dem autobiografischen Gedächtnis. Bei unserer Gruppe schien die Struktur eines Faserstrangs namens Fasciculus uncinatus, der Schläfen- und Stirnlappen verbindet, dichter zu sein als bei der Kontrollgruppe. Das ist bemerkenswert, denn eine Verletzung dieser Leitungsbahn behindert das autobiografische Gedächtnis.

### Ein Gedächtnis mit Stärken und Schwächen

Unsere mit bildgebenden Verfahren gewonnenen Resultate sind natürlich nur vorläufig. Wir wissen nicht, ob die hirnanatomische Besonderheit von HSAM-Personen ihre überlegene Gedächtnisleistung verursacht oder bloß aus dem besonders intensiven Gebrauch dieser Fähigkeit folgt. Um das herauszufinden, müssen wir feststellen, ob das Supergedächtnis schon in früher Kindheit auftritt. Falls HSAM genetisch bedingt ist, sollten wir die beteiligten Gene entdecken können. Doch bisher haben wir keine Indizien dafür, dass die Begabung unter Verwandten von Betroffenen häufiger auftritt.

Immerhin können wir schon ein paar vorläufige Aussagen über diese außergewöhnlichen Menschen machen. Erstens entwickeln HSAM-Personen ihr überlegenes Erinnerungsvermögen nicht deshalb, weil sie schneller lernen als andere, sondern weil sie Gelerntes besser behalten. Jemand mit durchschnittlichem Gedächtnis kann sich einige Tage lang

viele Details merken, doch binnen einer Woche verblasst die Erinnerung. Bei Menschen mit HSAM bleibt die Information viel länger präsent.

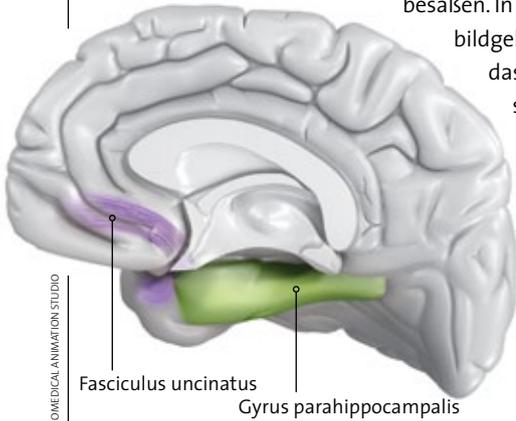
Zweitens wissen wir, dass die Gedächtnissysteme von HSAM-Individuen nicht wie präzise Video- und Audiorekorder jedes Sekundenbruchteils funktionieren. Insofern ähnelt HSAM nicht dem Fall von exzessivem Erinnerungsvermögen, den der sowjetische Psychologe Alexander Lurija (1902–1977) in seinem (auf Deutsch vergriffenen) Buch »Kleines Portrait eines großen Gedächtnisses« beschrieben hat. Lurijas Versuchsperson S. konnte sich mühelos riesige Mengen eher bedeutungsloser Fakten merken, beispielsweise Reihen und Spalten von Zahlen. Auch gleicht HSAM nicht der Fähigkeit von Gedächtniskünstlern, die durch intensives Üben und merktechnische Tricks zum Beispiel die Zahl Pi bis auf viele tausend Dezimalstellen aufsagen können.

Die Erinnerungen der HSAM-Gruppe sind weniger detailreich als die von Lurijas Versuchsperson S., aber dafür fein säuberlich einem ganz bestimmten Wochentag und Datum zugeordnet. Auch wissen wir, dass diese Fertigkeit anscheinend von selbst und ohne mühsames Lernen auftritt. Viele unserer Fragen haben mit einer persönlichen Erinnerung zu tun, etwa mit dem Wetter an einem bestimmten Tag. Die Testpersonen werden wohl kaum Zeit und Mühe darauf verwendet haben, sich so etwas eigens einzuprägen. Wenn man

## Supergedächtnis im Labortest

Zunächst mussten die Forscher klären, ob die Versuchspersonen sich tatsächlich wie behauptet an Jahrzehnte zurückliegende Vorkommnisse erinnerten. Das Team an der University of California in Irvine entwickelte ein mehrteiliges Testverfahren (rechts), dem zufolge mehrere Dutzend Personen ein hochgradig überlegenes autobiografisches Gedächtnis (HSAM, für highly superior autobiographical memory)

besaßen. In einem späteren Schritt wurde mit Hilfe bildgebender Verfahren untersucht, ob sich das HSAM-Gehirn von dem eines Menschen mit normalem Erinnerungsvermögen unterscheidet. Zwei Areale, die mit Gedächtnisleistungen zusammenhängen, fielen dabei besonders auf: Sowohl der Fasciculus uncinatus – ein Nervenstrang, der Schläfen- und Stirnlappen verbindet – als auch der Gyrus parahippocampalis sind bei HSAM-Personen dichter mit anderen Hirnregionen vernetzt.

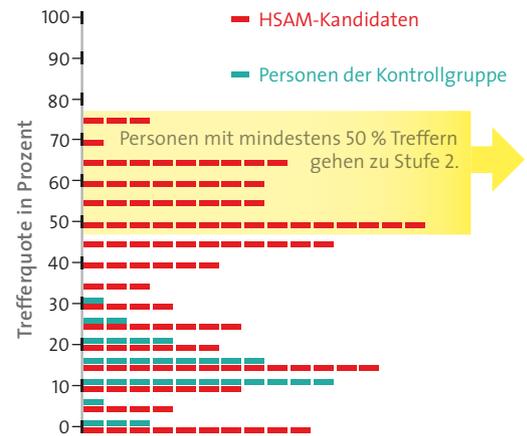


AXIS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

Fasciculus uncinatus  
Gyrus parahippocampalis

### Stufe 1: Nachrichten-Quiz

Ein gutes Drittel der selbst ernannten HSAM-Personen erinnerte sich an mehr als 50 Prozent von alten Tagesmeldungen und übertraf damit die Kontrollgruppe deutlich.



sie fragt, wie sie ihr Wissen erworben haben, antworten sie meist: »Das weiß ich einfach.« Und obwohl sie es durchaus genießen, ein Datum mit einem Erlebnis zu verknüpfen, haben sie im Allgemeinen kaum Interesse an Ereignissen vor ihrer Geburt.

Normalerweise begrüßen HSAM-Personen ihre spezielle Begabung. Darin unterscheiden sie sich von der Hauptfigur in der Kurzgeschichte »Das unerbittliche Gedächtnis« des argentinischen Schriftstellers Jorge Luis Borges (1899–1986). Darin wird Funes durch einen Sturz vom Pferd fähig, sich an sämtliche nachfolgenden Erlebnisse detailliert zu erinnern; er vermag das Bild jedes Blatts an jedem Baum wachzurufen, den er je gesehen hat. Seine Erinnerungen quälen ihn: Er vergleicht sein Leben mit einem Müllhaufen. Price erzählte uns zwar, ihre Erinnerungen seien eine Last, doch die meisten HSAM-Personen sind froh, lebhaften Zugang zu ihrer Vergangenheit zu haben. Zumeist führen sie ein aktives Berufs- und Sozialleben. Mehrere treten öffentlich als Schauspieler, Kabarettist, Geiger oder Nachrichtensprecher auf.

Ihre außergewöhnlichen Fähigkeiten verleihen diesen Menschen allerdings keineswegs übermenschliche Kräfte, mit denen sie ihre Berufskollegen in den Schatten stellen. Der Kabarettist Robert Petrella nutzte seine Gabe, um zum Privatvergnügen ein Buch zu schreiben, in dem er für jeden Tag seines Erwachsenenlebens das schönste Erlebnis festhielt. Doch das tat er in seiner Freizeit, während er eine Fernsehshow produzierte.

Die Untersuchung von HSAM reiht sich in eine reichhaltige Forschungsgeschichte über Menschen mit ungewöhnlichen psychischen Schwächen und Stärken ein. Im Jahr 1881 berichtete der französische Psychologe Théodule Ribot von

Hirnschädigungen, die neue Erinnerungen verhindern, während ältere bestehen bleiben. Ähnliches fand Brenda Milner von der McGill University in Montreal (Kanada): In den 1950er Jahren untersuchte sie den berühmten Patienten Henry Molaison – zunächst nur als »H. M.« bekannt –, der unfähig wurde, neue autobiografische Erinnerungen zu bilden, nachdem ihm zur Epilepsiebehandlung die vorderen medialen Schläfenlappen in beiden Hirnhälften chirurgisch entfernt worden waren. Doch seine Erinnerungen für frühere Erlebnisse blieben großteils ebenso intakt wie sein prozedurales Gedächtnis für das Erlernen von Bewegungsabläufen.

Diese Befunde zwangen zu der damals neuartigen Einsicht, dass im Gehirn separate Systeme für unterschiedliche Gedächtnistypen verantwortlich sind, was die Gedächtnisforschung revolutionierte. Unsere Entdeckung, wonach manche Menschen sich sehr stark und dauerhaft sowohl an Privaterebnisse als auch an öffentliche Ereignisse erinnern, sollte mit der Zeit ebenfalls zu neuen Erkenntnissen darüber führen, wie unser Gehirn Erinnerungen speichert und wachruft.

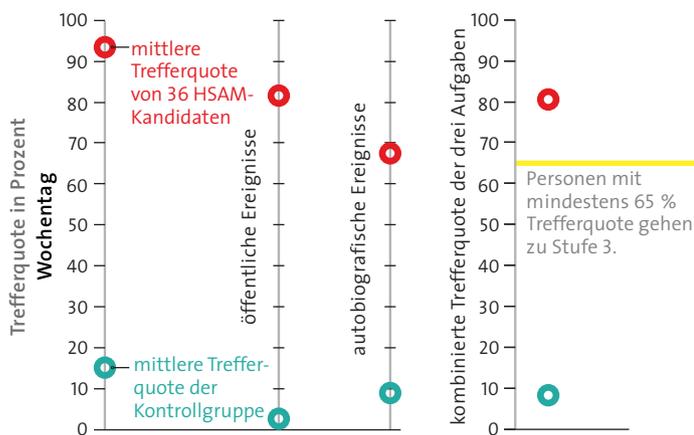
### Die Evolution der Erinnerung

Seit der deutsche Psychologe Hermann Ebbinghaus (1850–1909) das menschliche Gedächtnis zu erforschen begann, wurde vielfach bewiesen, dass wir uns Lernmaterial durch Wiederholung besser merken. Selbst kurzzeitiges Abrufen einer Erinnerung kann diese dauerhaft verstärken, wie Henry L. Roediger III von der Washington University in St. Louis und Jeffrey D. Karpicke von der Purdue University in West Lafayette (Indiana) gezeigt haben.

Allerdings wird ein Mensch mit normalem Gedächtnis selbst durch fleißiges Üben kaum die Fähigkeiten unserer

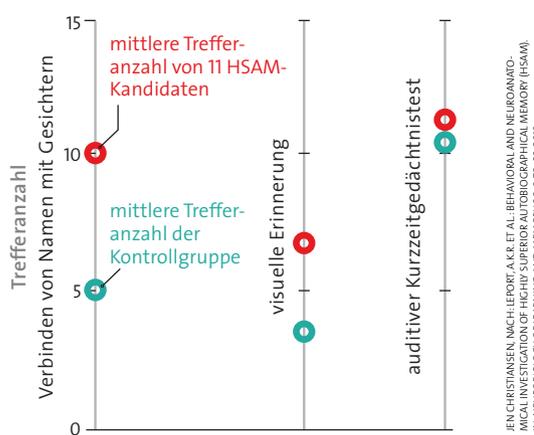
## Stufe 2: Datum-Test

Die HSAM-Gruppe erzielte verblüffend gute Ergebnisse, wenn sie zu zehn zufällig ausgewählten Daten den Wochentag angeben und sich an öffentliche sowie nachprüfbar private Ereignisse dieses Tags erinnern sollten.



## Stufe 3: Kognitive Gedächtnistests

Eine Untergruppe der HSAM-Personen zeigte nur bei einigen kognitiven Gedächtnistests – Verbinden von Namen mit Gesichtern und Erinnern von Bildern – gute Leistungen, blieb aber bei mehreren anderen durchschnittlich, etwa bei einem Test des Kurzzeitgedächtnisses.



JEN CHRISTENSEN, NICH LEPORT, AKRILET AL.: BEHAVIORAL AND NEUROANATOMICAL INVESTIGATION OF HIGHLY SUPERIOR AUTIOBIOGRAPHICAL MEMORY (HSAM). IN: NEUROBIOLOGY OF LEARNING AND MEMORY 98, S. 78-92, 2012

HSAM-Probanden erwerben, die niemals für unsere Tests probten. Wie McGaugh in jahrelangen Untersuchungen immer wieder feststellte, bilden wir alle aus emotional wichtigen Erlebnissen stabilere Gedächtnisinhalte. Unsere neue und faszinierende Entdeckung besagt aber, dass HSAM-Personen selbst aus eher trivialen Ereignissen mühelos starke Erinnerungen formen.

Trotz des recht beträchtlichen Aufsehens in den Medien haben uns bisher nur einige hundert HSAM-Kandidaten kontaktiert, unter denen wir rund 50 echte Fälle identifizieren konnten. Das ist ein winziger Bruchteil der Menschen, die von unserer Forschung durch Fernsehen und Zeitungen erfahren. Warum ist diese Begabung so selten, wenn sie eine vorteilhafte Anpassung an die Wechselfälle des Lebens darstellt? Vielleicht ist HSAM das evolutionäre Überbleibsel einer einst wichtigen und nun fast verlorenen Fähigkeit. Vor dem Aufkommen des Buchdrucks wurde menschliches Kulturgut größtenteils mündlich von einer Generation zur nächsten weitergegeben, in Form von Geschichten und Belehrungen. In einer Welt ohne Schrift verschafft ein überlegenes Gedächtnis seinem Träger einen gehobenen Status unter seinesgleichen. Mit der Schriftkultur schwindet der Vorteil einer derart hochgeordneten mentalen Fähigkeit allmählich und hat sich heute vielleicht durch die Einführung von Computern und Smartphones ganz erledigt.

Möglicherweise besitzen viele der von uns in den ersten Tests verworfenen HSAM-Kandidaten irgendeine andere mentale Begabung, die wir noch entdecken müssen. Einige haben vielleicht deutliche Erinnerungen an ihre Vergangenheit, ohne sie wie die HSAM-Personen mental zu datieren. Wie dem auch sei: Hirnforschern eröffnen sich neue Wege,

um die Funktionsweise des Gedächtnisses besser zu verstehen, indem sie Fälle von überragender Erinnerungsleistung untersuchen, statt wie sonst vorwiegend geistige Behinderungen zu betrachten. ~

## DIE AUTOREN



**James L. McGaugh** ist Forschungsprofessor an der University of California in Irvine; sein Spezialgebiet ist die Neurobiologie von Lernen und Gedächtnis sowie der Zusammenhang zwischen Erinnerung und Emotion.

**Aurora LePort** absolviert ein Aufbaustudium in Neurowissenschaften an derselben Universität; sie führt psychologische und hirnpfysiologische Untersuchungen an Personen mit überdurchschnittlichem Gedächtnis durch.

## QUELLEN

**LePort, A. et al.:** Behavioral and Neuroanatomical Investigation of Highly Superior Autobiographical Memory (HSAM). In: Neurobiology of Learning and Memory 98, S. 78–92, 2012

**Lurija, A. R.:** The Mind of a Mnemonist. A Little Book about a Vast Memory. Basic Books, New York 1968

**McGaugh, J. L.:** Memory and Emotion: The Making of Lasting Memories. Columbia University Press, New York 2003

## LITERATURTIPP

**Fields, R. D.:** Wie Erinnerungen haften bleiben. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 62–69

Artikel über physiologische Mechanismen der Erinnerung

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1319584](http://www.spektrum.de/artikel/1319584)

TITELTHEMA: KOSMOLOGIE

# Das Schwarze Loch am Beginn der Zeit

Nach dem kosmologischen Standardmodell begann das Weltall mit der »Singularität« des Urknalls – mit einem Zustand, bei dem alle physikalischen Beschreibungen versagen. Eine neue Hypothese postuliert nun als Ursprung des Alls ein Schwarzes Loch in einem höherdimensionalen Universum.

Von Niayesh Afshordi, Robert B. Mann und Razieh Pourhasan



Wenn ein massereicher Stern als Supernova explodiert, kann ein Schwarzes Loch entstehen, das von einer Wolke aus Gas und Staub umgeben ist. In einem hypothetischen Universum mit einer zusätzlichen Raumdimension könnte aus einem vergleichbaren Vorgang unser dreidimensionaler Kosmos hervorgegangen sein.

Das berühmte Höhlengleichnis des antiken Philosophen Platon (428–348 v. Chr.) handelt von Menschen, die ihr Leben angekettet in einer dunklen Höhle verbringen. Hinter ihnen brennt ein Feuer, und zwischen ihnen und dem Flammenschein ziehen Objekte vorbei, die Schatten auf eine vor den Gefesselten liegende Wand werfen. Die zweidimensionalen Schatten sind alles, was diese Menschen je zu sehen bekommen – ihre einzige Realität. Die engen Ketten hindern die Gefangenen daran, zu erkennen, dass die Welt in Wirklichkeit eine zusätzliche Dimension besitzt, womit sich alle Phänomene erklären, die sie sehen.

Platons Gleichnis ähnelt dem neuen kosmologischen Modell, das wir vorschlagen. Vielleicht leben wir alle in einer gigantischen kosmischen Höhle, die mit dem Beginn der Zeit entstand. Dem herkömmlichen Modell zufolge begann das Universum mit einem Urknall, der von einem unendlich dichten Punkt ausging. Doch nach unseren Berechnungen lässt sich der Anfang des Universums auf eine Epoche vor dem Urknall zurückführen, in der es eine zusätzliche Raumdimension gab. Und diese hinterließ vielleicht sogar Spuren, die wir durch astronomische Beobachtungen nachweisen könnten.

Das All, das wir wahrnehmen und vermessen, besitzt neben der Zeitdimension drei Raumdimensionen. In unserem Szenario ist dieses »dreidimensionale Universum« nur der »Schatten« einer Welt mit vier Raumdimensionen. Unser gesamtes Weltall entstand demnach, während ein Stern in dem Suprauniversum kollabierte, wobei die Implosion eine dreidimensionale Hülle um ein vierdimensionales Schwarzes Loch erzeugte. Unser Universum ist diese Hülle.

### Das holografische Prinzip

Warum postulieren wir etwas, das auf den ersten Blick so absurd anmutet? Wir haben dafür zwei Gründe. Erstens sind unsere Ideen keine leeren Spekulationen, sondern beruhen auf der Mathematik, die Raum und Zeit beschreibt. In den vergangenen Jahrzehnten haben Physiker die so genannte holografische Theorie ausgearbeitet. Mit diesem mathematischen Werkzeug übersetzen sie die Beschreibung von Ereignissen, die in einer gewissen Anzahl von Dimensionen statt-

## DIE SERIE IM ÜBERBLICK

### DIE GEBURT DES UNIVERSUMS

Teil 1	► <b>Das Schwarze Loch am Beginn der Zeit</b> <i>Niayesh Afshordi, Robert B. Mann und Raziye Pourhasan</i>	Februar 2015
Teil 2	► Signalfeuer des Urknalls: die Inflation <i>Lawrence M. Krauss</i>	März 2015
Teil 3	► Die ersten Sterne <i>Michael D. Lemonick</i>	April 2015

finden, in die Physik einer anderen Raumgeometrie. Zum Beispiel können Forscher Gleichungen der Flüssigkeitsdynamik in zwei Dimensionen relativ einfach lösen und diese Lösungen verwenden, um Vorgänge in einem viel komplizierteren System zu verstehen – etwa die Dynamik eines dreidimensionalen Schwarzen Lochs. Mathematisch sind die beiden Beschreibungen austauschbar: Die Flüssigkeit dient als perfektes Analogon für das exotische Schwarze Loch (siehe SdW 12/2014, S. 50).

Der Erfolg des holografischen Prinzips hat viele Wissenschaftler überzeugt, dass dabei mehr im Spiel ist als eine simple mathematische Transformation. Vielleicht sind die Grenzen zwischen den Dimensionen weniger stabil, als wir dachten. Ähnlich wie Platons Gefangene glauben wir möglicherweise nur, die Welt sei dreidimensional, während wir sie erst richtig verstehen können, sobald wir in der vierten Dimension nach Erklärungen suchen.

Der zweite Grund für unser vierdimensionales Weltmodell ist, dass seine genaue Untersuchung uns helfen kann, grundlegende Fragen über Ursprung und Struktur des Kosmos zu klären. Gemäß der modernen Kosmologie folgte unmittelbar auf den Urknall die so genannte Inflation – eine rapide Expansionsphase des Raums, in der das frühe Universum sein Volumen schlagartig um den Faktor  $10^{78}$  oder noch mehr vergrößerte. Doch diese Expansion liefert keinerlei Erklärung für die Ursache des Urknalls. Unser vierdimensionales Universum hingegen könnte das größte Geheimnis entschlüsseln: Woraus entstand das Universum?

### Fünf kosmologische Probleme

Auf das vierdimensionale Universum kamen wir, als wir die Fragen betrachteten, die das dreidimensionale aufwirft. Der Erfolg der modernen Kosmologie täuscht nämlich über einige grundlegende und komplexe Rätsel hinweg, die sich vielleicht mit einer holografischen Erklärung lösen lassen.

Kosmologen können die gesamte Geschichte des Universums mit nur wenigen Gleichungen, die vor allem von Albert Einstein stammen, und fünf unabhängigen Parametern vom heutigen Tag bis zu einem winzigen Sekundenbruchteil nach dem Urknall zurückverfolgen. Die fünf Parameter sind die

## AUF EINEN BLICK

### DIE URSACHE DES URKNALLS

**1** Die moderne Kosmologie verfügt über ein bemerkenswert genaues Bild von der Geschichte des Universums. Doch dabei bleiben einige grundlegende Fragen offen. Deren größte betrifft **das Wesen des Urknalls**, mit dem unser Universum plötzlich und heftig aus einem unendlich dichten Punkt hervorging.

**2** Die Autoren haben eine Hypothese entwickelt, die erklären könnte, was hinter dem Urknall steckt: der **Gravitationskollaps eines Sterns** in einem Universum mit **vier Raumdimensionen**.

**3** Das neue Szenario löst auf einen Schlag mehrere kosmologische Grundprobleme – und es lässt sich durch genaue Analysen der **kosmischen Hintergrundstrahlung überprüfen**.

Dichte der gewöhnlichen Materie, der Dunklen Materie und der Dunklen Energie (darüber gleich mehr) sowie die Amplitude und die Form der Quantenfluktuationen im frühen Universum. Dieses so genannte  $\Lambda$ -CDM-Modell ( $\Lambda$  für die kosmologische Konstante Lambda, CDM für Cold Dark Matter, kalte Dunkle Materie) kann hunderte, wenn nicht tausende gemessene Daten erklären, und zwar über Entfernungen, die von einer Million Lichtjahre bis zu 10 Milliarden Lichtjahren reichen – bis an den Rand unseres beobachtbaren Universums. Doch diese Erfolge bedeuten nicht, dass unsere Aufgabe erledigt ist. Noch immer stehen wir vor fundamentalen Fragen über das Wesen des Kosmos.

### **Problem 1: Wie verstehen die fünf Parameter nicht.**

Ein zentrales Rätsel betrifft die Dichte von Materie und Energie im Universum. Bis vor wenigen Jahrzehnten glaubten die Astronomen, die aus den chemischen Elementen des Periodensystems bestehende gewöhnliche Materie sei die vorherrschende Form von Masse und Energie. Neuere kosmologische Beobachtungen haben dieses Bild radikal revidiert – und wurden mit drei Nobelpreisen gewürdigt. Heute wissen wir, dass die Dichte der normalen Materie bloß 5 Prozent der gesamten Energiedichte des Universums ausmacht. Weitere 25 Prozent steuert die Dunkle Materie bei, eine unsichtbare Substanz, die sich nur durch ihre Gravitationsanziehung bemerkbar macht. Und zu 70 Prozent besteht das Universum aus mysteriöser Dunkler Energie. Sie verursacht, dass sich die Expansion des Universums beschleunigt, statt sich wie ursprünglich erwartet durch die Gravitationsanziehung der Materie zu verlangsamen. Was Dunkle Materie und Dunkle Energie sind und warum sie derart große Teile des Alls ausmachen, wissen wir nicht.

Vielleicht fänden wir Antworten auf diese Fragen, wenn wir den Urknall besser verstünden – den abrupten Beginn von Raum und Zeit in einem heißen Plasma aus Strahlung

und Teilchen bei einer Temperatur von über  $10^{27}$  Grad. Es ist kaum vorstellbar, wie aus der Situation in den ersten Augenblicken nach dem Urknall der heutige Zustand des Universums hervorgehen konnte: ein Kosmos mit fast gleichförmiger Temperatur und mit im Großen und Ganzen flacher Geometrie, das heißt ohne Raumkrümmung.

Die kosmische Inflation liefert die derzeit beste Erklärung für die großräumige Struktur des Alls: Sie sorgt für ein flaches Universum, indem sie alle gekrümmten Regionen der Raumzeit ausbügelt, und bringt es auf gleichförmige Temperatur. Außerdem bläht sie wie ein kosmischer Vergrößerungsapparat winzige Quantenfluktuationen der Energiedichte auf kosmische Größe auf. Diese Fluktuationen bilden wiederum die Keime für das Wachstum von Strukturen wie Galaxien, Sternen, Planeten und schließlich sogar für die Entstehung von lebenden Organismen.

Die Inflation gilt allgemein als ein sehr erfolgreiches Erklärungsmodell (siehe Kasten auf den folgenden Seiten). Jahrzehntlang haben Kosmologen dessen Vorhersagen mit immer präziseren Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung verglichen, in der winzige Temperaturschwankungen die Dichtefluktuation im frühen Universum widerspiegeln. Das Planck-Weltraumobservatorium der europäischen Weltraumbehörde ESA hat erst kürzlich die wichtigsten Aussagen des Inflationsmodells bestätigt: Im Wesentlichen ist unser Universum flach, und seine Massenverteilung weicht nur um weniger als 1 zu 60 000 von völliger Gleichförmigkeit ab. Außerdem stimmen Amplitude und Form der großräumigen Materiefluktuationen einigermaßen mit dem erwarteten Vergrößerungseffekt überein, den die Inflation auf das Quantenvakuum ausüben sollte.

### **Problem 2: Wir verstehen die Inflation nicht wirklich.**

Aber was trieb diese Inflation an, für die immerhin eine Menge Energie nötig war? Nach gängiger Vorstellung war das Uni-

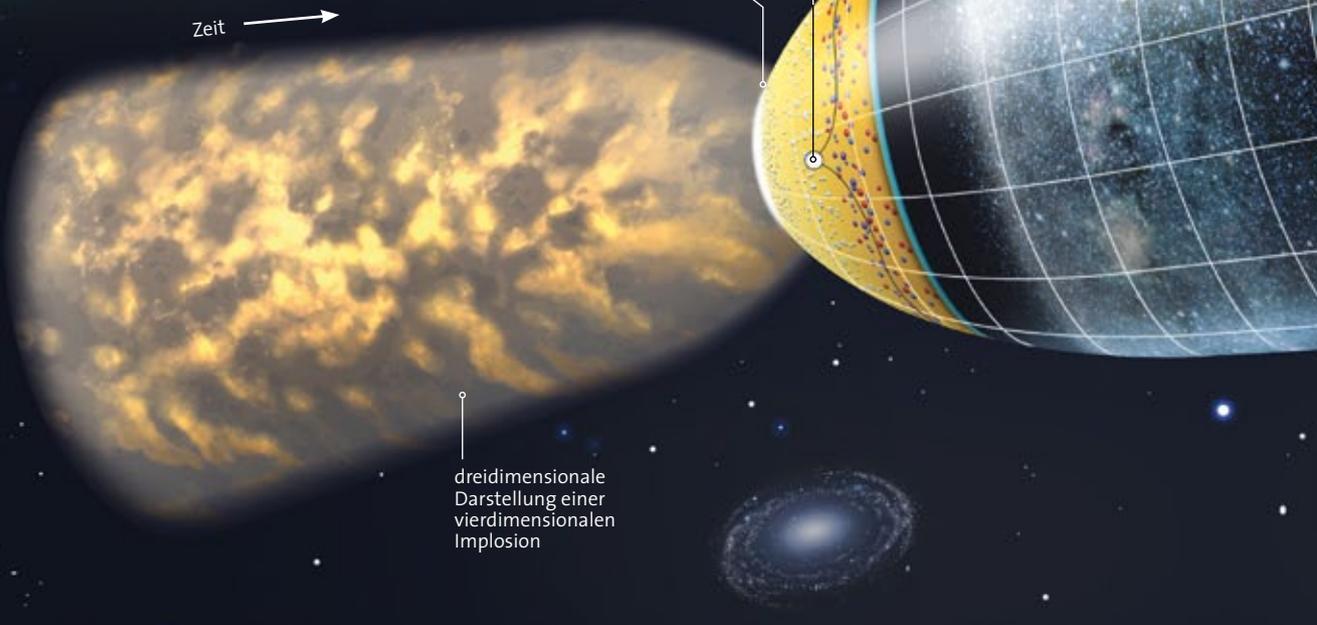


Die runde Gas- und Staubwolke (roter Kreis links im Bild) verhüllt ein Schwarzes Loch – das Überbleibsel einer gewaltigen Sternexplosion in unserem dreidimensionalen Weltraum.

NASA / JPL / CALTECH

## Was vor dem Urknall geschah

Nach gängiger Auffassung liegt dem Urknall eine Singularität zu Grunde, ein unendlich dichter Punkt als Ursprung des Universums. Doch es bleibt unklar, wie eine Singularität unsere Welt erzeugen soll. Die Autoren schlagen eine Alternative vor: Unser All entstand, als ein Stern in einem vierdimensionalen Universum zu einem Schwarzen Loch kollabierte. Von der Singularität dieses Schwarzen Lochs wurde unsere Welt durch einen dreidimensionalen Ereignishorizont abgeschirmt. Hier wird der Vorgang in drei Dimensionen abgebildet, denn ein vierdimensionaler Kosmos übersteigt unser Vorstellungsvermögen.



GEORGE REISECK

versum kurz nach dem Urknall von einem hypothetischen Quantenfeld namens Inflaton erfüllt. Das 2012 mit dem Large Hadron Collider am europäischen Kernforschungszentrum Cern entdeckte Higgs-Teilchen hat viele Eigenschaften mit den Quantenteilchen des Inflatonfelds gemeinsam und ist ein möglicher Kandidat dafür. Das Inflaton wäre sowohl für die anfängliche beschleunigte Expansion verantwortlich als auch für die Struktur unseres Alls, denn die einzigen merklichen Dichteunterschiede im frühen Universum werden durch die winzigen Quantenfluktuationen des Inflatonfelds verursacht.

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

Unser Online-Dossier zum Thema »Kosmologie« finden Sie unter



[www.spektrum.de/t/kosmologie](http://www.spektrum.de/t/kosmologie)



ESO / LUIS CALÇADA

Doch das Inflaton löst unsere Probleme nicht, sondern schiebt sie nur ein Stück zurück. Wir wissen nichts über seine Eigenschaften, seine Herkunft und seinen Nachweis. Wir sind uns nicht einmal sicher, ob es wirklich existiert.

Außerdem verstehen die Physiker nicht, was die Inflation beendete. Wenn irgendein Energiefeld ein exponentiell expandierendes Universum antreibt, muss es einen Grund geben, warum dieses Feld plötzlich zu existieren aufhört. Auch haben wir keine befriedigende Erklärung für den Ursprung der fünf Parameter im  $\Lambda$ -CDM-Modell, die sehr präzise gewählt werden müssen, um mit den Beobachtungen übereinzustimmen. Und uns fehlt eine zufrieden stellende Beschreibung der Geschichte unseres Kosmos vor der Inflationsphase, das heißt in den ersten  $10^{-35}$  Sekunden nach dem Urknall.

### Problem 3: Wir verstehen nicht, wie alles begann.

Der blinde Fleck der Kosmologie ist der Urknall selbst – die plötzliche, heftige Entstehung von Raum, Zeit und Materie aus einem unendlich dichten Punkt, einer so genannten Singularität. Das ist etwas unvorstellbar Bizarres: Raum und Zeit krümmen sich zu einem Punkt zusammen, Zukunft und Vergangenheit sind ununterscheidbar. Alle physikalischen Gesetze brechen zusammen. Eine Singularität ist ein Univer-



zweidimensionale Darstellung des dreidimensionalen Universums

sum ohne Gesetz und Ordnung, aus dem alles Mögliche entstehen kann. Nichts spricht dafür, dass eine Singularität ein derart geordnetes Universum wie das unsere zu erzeugen vermag.

Eigentlich sollte daraus eher ein völlig chaotisches Weltall hervorgehen, in dem von einem Punkt zum nächsten riesige Temperaturunterschiede herrschen. Außerdem wäre kaum zu erwarten, dass die Vergrößerungskraft der Inflation alles glatt ausbügelt. Sind die Fluktuationen zu ausgeprägt, kann die Inflation vielleicht überhaupt nicht beginnen. Die Probleme einer Singularität kann Inflation allein jedenfalls nicht lösen.

Singularitäten sind seltsam, aber nicht selten. Sie entstehen auch im Zentrum von Schwarzen Löchern, den kollabierten Überbleibseln massereicher Sterne. Alle Sterne sind natürliche Fusionsreaktoren, die leichte Elemente – vorwiegend Wasserstoff – zu schwereren verschmelzen. Die Kernfusion versorgt den Stern so lange mit Energie, bis sich der Kernbrennstoff schließlich erschöpft und die Schwerkraft die Oberhand gewinnt. Falls die Sternmasse mindestens das Zehnfache unserer Sonne beträgt, kollabiert der Stern und explodiert als Supernova. Wenn der Stern noch größer ist – 15 bis 20 Sonnenmassen –, hinterlässt die Supernova einen ungemein dichten Sternenrest, der unaufhalt-

sam weiter zusammenstürzt und schließlich als punktförmiges Schwarzes Loch endet.

Dem extrem starken Schwerfeld in der Nähe eines Schwarzen Lochs vermag nichts zu entkommen, nicht einmal Licht. Dieser alles verschluckende Bereich hat eine Außengrenze in Form einer Kugelfläche, den so genannten Ereignishorizont. Sobald irgendetwas, zum Beispiel Sternenmaterial, diese Grenze überschreitet, wird es vom übrigen Universum abgeschnitten und unweigerlich zur Singularität im Zentrum gezogen.

Wie beim Urknall brechen im Zentrum eines Schwarzen Lochs die physikalischen Gesetze zusammen. Es gibt aber einen entscheidenden Unterschied: den Ereignishorizont, der äußere Beobachter vor der unberechenbaren, katastrophalen Wirkung der Singularität schützt; dieser Umstand wird als kosmische Zensur bezeichnet.

Die Umhüllung durch den Ereignishorizont begrenzt die Wirkung der Singularität. Da ihre krassen Effekte nicht entkommen können, gelten für alle Beobachtungen die gängigen physikalischen Gesetze. Aus einiger Entfernung betrachtet ist das Schwarze Loch eine sehr einfache, glatte und gleichförmige Struktur, die nur durch Masse, Drehimpuls und gegebenenfalls elektrische Ladung beschrieben wird. Wie Physiker scherzhaft sagen, hat das Schwarze Loch »keine Haare«, das heißt keine weiteren Eigenschaften.

Nach üblichem Verständnis versteckt sich die Urknall-Singularität dagegen nicht hinter einem Ereignishorizont, der ihre katastrophale Gesetzlosigkeit bändigen würde. Doch wir schlagen nun ein Szenario vor, das den Urknall in eine Art Fata Morgana verwandelt. Gemäß dieser Idee ist dessen Singularität von einer Hülle umgeben, die uns vor ihren sprunghaften und regellosen Effekten schützt.

### Kollaps in einer zusätzlichen Dimension

Eine solche Hülle unterscheidet sich vom gewöhnlichen Ereignishorizont in einem wichtigen Punkt. Da wir unser Universum in drei Raumdimensionen wahrnehmen, muss auch der Ereignishorizont, der die Singularität im Herzen des Urknalls umgibt, drei Raumdimensionen besitzen und nicht bloß zwei wie jener eines Schwarzen Lochs. Wenn wir annehmen, dass dieser Ereignishorizont ebenfalls aus einem kosmischen Kollaps hervorging – so wie ein zweidimensionaler Ereignishorizont durch den Kollaps eines dreidimensionalen Sterns ent-



steht –, dann muss jener Zusammenbruch in einem Universum mit vier Raumdimensionen stattgefunden haben.

Ein Szenario mit mehr als drei Raumdimensionen ist fast so alt wie die allgemeine Relativitätstheorie selbst. Die Idee wurde ursprünglich von dem deutschen Mathematiker Theodor Kaluza (1885–1954) und dem schwedischen Physiker Oskar Klein (1894–1977) in den 1920er Jahren entwickelt. Sie geriet fast in Vergessenheit und wurde erst in den 1980er Jahren im Rahmen der Stringtheorie wieder aufgegriffen; diese Theorie beschreibt Elementarteilchen als Schwingungszustände eindimensionaler Fäden oder Strings. Später nutzten Theoretiker den Ansatz für eine Kosmologie mit so genannten Branen, wobei Bran ein von Membran abgeleitetes Kunstwort ist.

Die Grundidee einer Branwelt besagt, dass unser dreidimensionales Universum in eine größere Welt von vier oder

mehr Raumdimensionen eingebettet ist. Das dreidimensionale Universum wird Bran genannt, und das größere Universum Bulk (für englisch: große Menge). Alle bekannten Materie- und Energieformen bewegen sich in unserer dreidimensionalen Bran wie ein auf eine Leinwand projizierter Film – oder wie die Schattenwirklichkeit für Platons Höhlenbewohner. Eine Ausnahme bildet die Gravitation: Sie durchdringt den gesamten höherdimensionalen Bulk.

Falls ein Bulkuniversum mit vier Raumdimensionen schon vor dem Urknall existiert hat, gäbe es in diesem Suprauniversum vermutlich vierdimensionale Sterne und Galaxien. Diese höherdimensionalen Strahlungsquellen würden genau wie unsere dreidimensionalen Sterne im Lauf der Zeit ihren Brennstoff verbrauchen und zu Schwarzen Löchern kollabieren.

## Vieldeutige Spuren im Hintergrund



Das BICEP2-Teleskop analysiert die kosmische Mikrowellenstrahlung.

**Am 17. März 2014 meldete die BICEP-Keck-Kollaboration**, die am Südpol mit Mikrowellenteleskopen den kosmischen Strahlungshintergrund auf seine Polarisation – unterschiedliche Schwingungsebenen der Mikrowellen – untersucht, eine vermeintliche Sensation: Man habe Polarisationsmuster entdeckt, die sich als Spuren von Gravitationswellen unmittelbar nach dem Urknall und während der Phase der kosmischen Inflation deuten ließen.

Träfe diese Interpretation zu, so würde sie eine 30 Jahre alte Vorhersage des Inflationsmodells bestätigen: Die explosive Expansion in den allerersten Momenten nach dem Urknall erzeugte nicht nur Dichte- und Temperaturfluktuationen, sondern auch Gravitationswellen, die sich heute als eine Art Verwirbelung in feinsten Polarisationsmessungen der kosmischen Mikrowellenstrahlung bemerkbar machen sollten.

Doch die Entdeckerfreude war wohl voreilig. Zum Beispiel hätten Spuren derselben Gravitationswellen auch in den Temperaturfluktuationen auftreten müssen, die das Planck-Weltraumobservatorium der Europäischen Weltraumorganisation ESA misst – doch das war bisher nicht der Fall. Außerdem werden auch die vom Staub in unserer Milchstraße ausgehenden Mikrowellen durch galaktische Magnetfelder »verwirbelt« und polarisiert; somit ist unklar, inwieweit die BICEP-Keck-Daten überhaupt den kosmischen Strahlungshintergrund betreffen.

**Was bedeutet all das für die holografische Theorie des Urknalls?** Vorderhand bleiben wir bei der Erforschung des frühen Universums auf magere und widersprüchliche Daten angewiesen. Die Rekonstruktion der ersten Augenblicke unseres Alls wird noch viel Zeit und Glück erfordern.

Wie sieht ein vierdimensionales Schwarzes Loch aus? Es hat ebenfalls einen Ereignishorizont – eine Grenzfläche ohne Wiederkehr, aus der kein Licht entkommen kann. Doch an Stelle einer zweidimensionalen Fläche wie beim gewöhnlichen Schwarzen Loch erzeugt ein vierdimensionales Ereignishorizont mit drei Raumdimensionen.

Tatsächlich ergibt unser vierdimensionales Kollapsmodell, dass das beim Zusammenbruch ausgestoßene Material eine langsam expandierende dreidimensionale Bran um den dreidimensionalen Ereignishorizont bilden kann. Unser Universum ist diese »Drei-Bran« – eine Art Hologramm eines vierdimensionalen Sterns, der zu einem Schwarzen Loch kollabiert ist. In diesem Modell bleibt die kosmische Urknall-Singularität vor uns verborgen; sie wird für immer hinter einem dreidimensionalen Ereignishorizont eingesperrt sein.

### Ein All aus Abfall

Für unser Modell spricht zunächst einmal, dass es die nackte Singularität am Beginn des Universums eliminiert. Aber was ist mit den anderen hartnäckigen Problemen der Kosmologie, insbesondere mit der Tatsache, dass der Kosmos nahezu flach und äußerst gleichförmig strukturiert ist? Da das vierdimensionale Bulkuniversum schon beliebig lange existiert haben mag, hätten etwaige heiße und kalte Stellen im Bulk viel Zeit gehabt, sich auszugleichen. Das Bulkuniversum wäre glatt, und unser Drei-Bran-Universum würde diese Glattheit erben. Außerdem besäße auch ein vierdimensionales Schwarzes Loch fast keine Eigenschaften – es hätte »keine Haare« –, und darum wäre auch unser daraus entstehendes Drei-Bran-Universum glatt. Je größer die Masse des vierdimensionalen Sterns, desto flacher die Drei-Bran. Somit ist unser All einfach deshalb so flach, weil es aus dem Abfall besteht, den der Kollaps eines schweren Sterns hinterlassen hat.

Auf diese Weise erklärt unser Modell des holografischen Urknalls nicht nur die rätselhafte Gleichförmigkeit und Flachheit des Universums, ohne sich auf die Inflation der Standardkosmologie zu berufen, sondern beseitigt auch die zerstörerischen Effekte der anfänglichen Singularität.

Die Idee mag weit hergeholt erscheinen. Daher ist es gut, dass sie sich auf mehrere Arten testen lässt. Der Schlüssel ist die kosmische Hintergrundstrahlung. Außerhalb unserer Drei-Bran sollte es zusätzliches vierdimensionales Bulkmaterial geben, das durch die Schwerkraft des Schwarzen Lochs nahe herangezogen wurde. Nach unseren Berechnungen erzeugen in diesem Bulkmaterial auftretende Temperaturfluktuationen ihrerseits Fluktuationen in der Drei-Bran, die wiederum den Strahlungshintergrund geringfügig, aber messbar verzerren. Unsere Vorhersagen weichen von den neuesten Daten der Planck-Sonde um rund 4 Prozent ab, doch diese Diskrepanz kann an Nebeneffekten liegen, die wir noch nicht berücksichtigt haben.

Falls das vierdimensionale Schwarze Loch außerdem rotiert – was bei Schwarzen Löchern die Regel ist –, sieht unsere Drei-Bran nicht in allen Richtungen gleich aus. Die großräumige Struktur unseres Universums wäre nicht ganz isotrop.

Astronomen könnten diese Richtungsabhängigkeit als kleine Unterschiede des Strahlungshintergrunds in verschiedenen Himmelsrichtungen nachweisen.

Der holografische Urknall löst zwar ein riesiges Rätsel – den Ursprung unseres Universums –, wirft aber zugleich neue Fragen auf. Vor allem diese: Woher stammt das Vorläuferuniversum unseres Weltalls?

Für die Suche nach einer Antwort können wir wieder Platons Gleichnis heranziehen. Die Gefangenen werden schließlich befreit, doch als sie aus der Höhle treten, blendet die Sonne sie völlig. Es dauert lange, bis ihre Augen sich an das Tageslicht gewöhnen. Zunächst nehmen sie nur Schatten und Widerschein wahr, später können sie am Nachthimmel Mond und Sterne erkennen. Schließlich begreifen sie, dass die Sonne der Grund ist, warum es überhaupt etwas zu sehen gibt – Tag und Nacht, Jahreszeiten und Schatten. Doch wie es kommt, dass die Sonne scheint, das verstehen Platons befreite Gefangene genauso wenig, wie wir das vierdimensionale Bulkuniversum verstehen. Aber zumindest wissen sie nun, wo sie nach einer Antwort suchen müssen. ~

### DIE AUTOREN



**Niyesh Afshordi** (links) ist Assistenzprofessor für Physik und Astronomie an der University of Waterloo

(Kanada) sowie Hochschullehrer für Kosmologie und Gravitation am Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo. **Robert B. Mann** ist Professor für Physik und Astronomie an derselben Universität und Mitglied des Perimeter Institute. Er war Präsident der Canadian Association of Physicists und wurde für seine Lehrtätigkeit mehrfach ausgezeichnet. Zu seinen Interessengebieten gehören Quanteninformation und Schwarze Löcher. **Razieh Pourhasan** ist Doktorandin am Perimeter Institute und an der University of Waterloo. Sie wurde in Shiraz (Iran) geboren und studierte theoretische Physik an der Universität Shiraz.

### QUELLE

**Pourhasan, R. et al:** Out of the White Hole: A Holographic Origin of the Big Bang. In: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2014, Artikel Nr. JCAP04(2014)005, 2014

### LITERATURTIPPS

- Bojowald, M.:** Der Ur-Sprung des Alls. In: Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 26–32  
*Erklärung des Urknalls im Rahmen der Schleifen-Quantengravitation als Kollaps eines Vorgängeruniversums*
- Dvali, G.:** Die geheimen Wege der Gravitation. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 48–55  
*Höhere Dimensionen als Erklärung für kosmologische Phänomene*
- Maldacena, J.:** Schwerkraft – eine Illusion? In: Spektrum der Wissenschaft 3/2006, S. 36–43  
*Beschreibung der holografischen Theorie*

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323148](http://www.spektrum.de/artikel/1323148)

# Das Ende des Teekanneneffekts

Es erscheint fast schon als Naturgesetz, dass Tee- und Kaffeekannen tropfen. Nun versprechen hydrophobe Tüllen Abhilfe.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»Gott erschuf die Festkörper,  
aber der Teufel die Oberflächen.«

Wolfgang Pauli (1900–1958)

Wer kennt nicht das leidige Problem, dass sich Tee oder Kaffee kaum tropffrei aus der Kanne in die Tasse befördern lässt? Nachdem Generationen von Kannendesignern an dieser Herausforderung scheiterten, könnten sie diesen so genannten Teekanneneffekt nun aber doch noch in den Griff bekommen. Französische Forscher sinnen nämlich auf Abhilfe.

Den Kern des Problems bildet ganz offensichtlich die Tülle. Zwar scheint sie für Laien genau so konstruiert zu sein, dass sie den Flüssigkeitsstrom gezielt zu lenken vermag. Trotzdem passiert es immer wieder: Der Tee folgt seinen eigenen Wegen. Unter

scheinbarer Missachtung der Schwerkraft stürzt er sich nicht in die Tasse, sondern fließt aus dem Schnabel heraus, krümmt sich an dessen Unterseite wieder zurück zur Kanne und landet, wo er nicht hingehört, nämlich auf der Tischdecke.

## Kein Ausweg aus der Gefahrenzone?

Dabei geben wir uns doch jedes Mal so viel Mühe. Mit angemessenem Schwung lassen wir den Strahl so schnell und steil aus der Öffnung herauschießen, dass der Tee möglichst keinerlei Ablenkung zum Schnabelrand erfährt und sich im freien Fall

vom Ausgießer in die Tasse bewegt. Aber dann neigen wir die Kanne hektisch wieder zurück, weil sich die Tasse zu schnell füllt, und geraten unversehens erneut in die Gefahrenzone. Während wir nämlich vollauf damit beschäftigt sind, den Strahl weiterhin ins Ziel zu steuern, verringern sich die Fließgeschwindigkeit sowie der Winkel zwischen Flüssigkeitsstrom und Tülle so sehr, dass der Tee schließlich doch wieder den Schleichweg nimmt.

Die naheliegende Frage, wie sich der Flüssigkeitsstrahl für einen der beiden möglichen Wege »entscheidet«, beschäftigt Physiker spätestens seit den 1950er Jahren. Mal nahmen sie die Scherung der Flüssigkeit infolge der Krümmung der Tülle und die damit verbundene Wirbelbildung in den Blick, mal untersuchten sie den Bernoulli-Effekt, bei dem der äußere Luftdruck die Flüssigkeit gegen die gekrümmte

Verringert man allmählich den Flüssigkeitsstrom, der aus einer Teekanne fließt (1, 2, 3), scheint die Tülle zunehmend anziehende Kräfte zu entwickeln (4, 5). Steuert man nun gegen, indem man den Strom wieder anschwellen lässt, kehrt sich der Effekt nicht sofort um. Stattdessen bleibt der Strahl noch einige Zeit an der Tülle haften (6).



H. JOACHIM SCHLICHTING



Nicht im Sinne des Erfinders: Statt im freien Fall aus der Tülle zu fließen, trotz das Wasser der Schwerkraft.

Wand drückt. Die Benetzbarkeit der Tüloberfläche spielt manchen Wissenschaftlern zufolge ebenfalls eine Rolle, wenn auch nicht die entscheidende. Die bislang vielleicht überzeugendste Arbeit zum Teekanneneffekt erschien aber erst vor einigen Jahren. Eine französische Forschergruppe um Cyril Duez von der Universität Lyon konnte nämlich zeigen, dass das Fließverhalten vor allem durch die Beschaffenheit des Ausgusses bestimmt wird.

### Nachjustieren zwecklos

Vorab ein kleiner Exkurs. Wer dem Phänomen auch nur ein wenig Aufmerksamkeit schenkt, erkennt sofort die Bedeutung der Fließgeschwindigkeit. Nur wenn wir den Tee schnell genug ausgießen, löst sich der Flüssigkeitsstrahl vom Schnabel ab; unterhalb des kritischen Werts bleibt er an der Kanne haften. In letzterem Fall ist das Malheur kaum noch zu vermeiden: Justiert man nämlich nach und steigert die Geschwindigkeit wieder, zeigt sich überraschend, dass der kritische Wert plötzlich gar nicht mehr ausreicht, um den Strahl wieder zu lösen (siehe die Fotos links).

Wo manchen das Gefühl plagt, die Welt habe sich gegen ihn verschworen, sieht der Physiker schlicht eine so genannte Hysterese am Werk. Demnach gibt es einen Geschwindigkeitsbereich, in dem sowohl der erwünschte als auch der unerwünschte Flüssigkeitsweg stabil sein können. Welche Entscheidung das System fällt, hängt dann von seiner

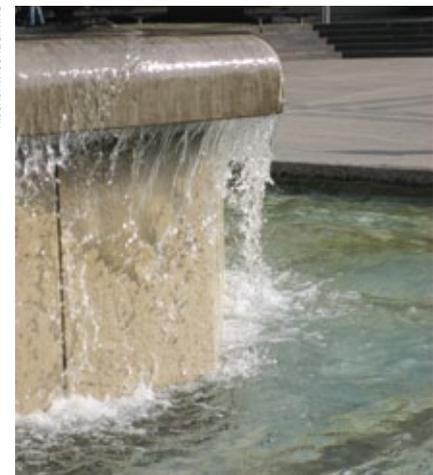


Nicht nur Teekannen unterliegen dem Teekanneneffekt. Felsformationen wie diese in Kappadokien (links) bildeten sich vermutlich in geologischen Zeiträumen: Weiches Tuffgestein (helle Bereiche) wurde erodiert, weil von einer Schicht festeren Gesteins (dunkel) Wasser daran herabließ. Derselbe Effekt tritt bei Brunnen auf (rechts). Wären sie lange genug in Betrieb, würde auch hier der Unterbau allmählich abgetragen.

Vorgeschichte ab. Verringert man in einer Situation, in der die Flüssigkeit in freiem Fall die Kanne verlässt, die Fließgeschwindigkeit, geht das System bei einem bestimmten kritischen Wert abrupt in eine gebundene Strömung entlang des Schnabels über. Liegt aber umgekehrt bereits eine gebundene Strömung vor und erhöht man nun die Geschwindigkeit, geht der Strahl in den freien Fall über – aber erst bei einer deutlich höheren kritischen Geschwindigkeit. Erfahrungsgemäß bestimmen Form und Oberfläche der jeweiligen Tülle, in welchem Wertebereich diese Übergänge stattfinden. Eine Metallkanne mit sehr dünnwandigem, spitzem Schnabel erlaubt geringere Fließgeschwindigkeiten und ist darum weniger kleckerträchtig als eine Porzellan-kanne mit gerundetem Profil.

### Phänomen mit mikroskopischen Ursachen

»Im Großen müssen wir das Kleine kennen lernen«, schrieb einst der erste deutsche Experimentalphysiker Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799). Folgen wir also seinem Rat und suchen nach den mikroskopischen Effekten, welche die entscheidenden Vorgänge steuern. Ausgangspunkt ist die Ausbildung einer Grenzfläche zwischen Wasser und fester Unterlage. Ist dafür weni-



ger Energie nötig als für eine Grenzfläche zwischen Wasser und Luft, tendiert die Natur zur Vergrößerung ersterer zu Ungunsten letzterer. Dies macht sich als anziehende Kraft zwischen Wasser und Unterlage bemerkbar, als so genannte Adhäsionskraft. Ihre Wirkung zeigt sich in der Größe des Kontaktwinkels: Ein kleiner Kontaktwinkel zwischen den Medien entspricht starker Benetzbarkeit, das heißt großer Benetzungsfläche, und umgekehrt (siehe Grafik unten).

Anfangs wehrt sich die strömende Flüssigkeit gegen die Adhäsionskraft: Träge, wie sie ist, will sie ihre Richtung beibehalten. Wird die Adhäsionskraft jedoch groß genug, vermag sie die Flüssigkeit trotzdem aus der Strömungsrichtung abzulenken. Das muss auch so sein, denn dieser Effekt trägt dazu bei, dass der Flüssigkeitsstrahl der konkaven Krümmung der Tülle zu folgen vermag, zumindest bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit.

Aber es kommt etwas hinzu. Der Flüssigkeitsstrom, der sich schließlich als Strahl ablöst, ist zunächst noch durch einen Meniskus, also einen charakteristischen gewölbten Flüssigkeits Hals, mit der Unterlage verbunden (siehe Grafik oben rechts). Das Verdienst von Cyril Duez' Team besteht in der

Entdeckung, dass sich wegen dieses Meniskus die benetzte Grenzfläche vergrößert. Da der Meniskus wiederum vom Kontaktwinkel abhängt, ist es letztlich dieser, der die Größe der Grenzfläche und damit die Stärke der Kraft bestimmt, mit welcher der Flüssigkeitsstrahl aus seiner Richtung abgelenkt wird. Kurz gesagt: Hydrophile Oberflächen (also solche mit kleinem Kontaktwinkel, siehe Grafik unten) tropfen mehr, weil sie für stärkere Ablenkung sorgen als hydrophobe (mit großem Kontaktwinkel).

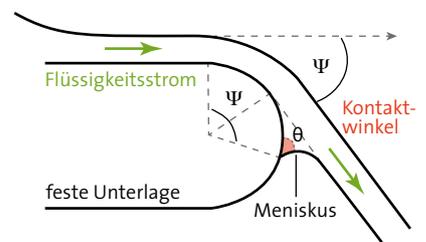
Könnte man eine ideale nicht-tropfende Teekanne folglich dadurch schaffen, dass man ihre Tülle mit einer hydrophoben Beschichtung versieht? Machen wir die Probe aufs Exempel und rußen die Tülle einer Teekanne mit Hilfe einer Kerzenflamme an der entscheidenden Stelle ein. Zumindest die in meinem Haushalt aufzutreibenden Tee- und Kaffeekannen lassen sich mit Hilfe des stark hydrophoben Rußes dazu bewegen, ordentlich zu funktionieren, sogar weit gehend unabhängig vom Krümmungsradius der Tüllenkannte. Warum die Hersteller diesen Trick mit der Wasser abweisenden Oberfläche nicht von vornherein einsetzen, bleibt allerdings unklar.

**Werden Oberflächen veredelt, darf nichts tropfen**

Wissenschaftlern wäre dieser Anwendungsfall ohnehin egal. Verfahrenstechnikern geht es im Zusammenhang mit dem Teekanneneffekt vor allem um die so genannte Vorhangbeschichtung. Dabei werden Farben, Lacke und andere Flüssigkeiten gewissermaßen »ausgegossen«, um Oberflächen zu versiegeln, zu lackieren oder anderweitig zu veredeln – der Effekt stört dabei, weil er den Vorgang unkontrollierbar machen kann.

Selbst auf Plätzen und Parkanlagen ist man gelegentlich mit dem Phäno-

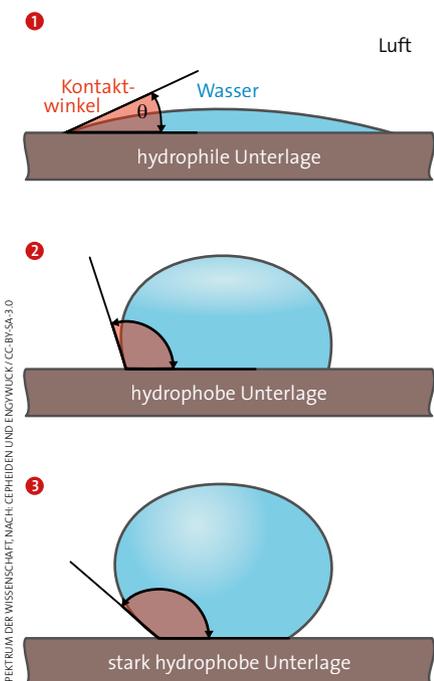
**Je hydrophiler eine Oberfläche, desto geringer ist der Kontaktwinkel  $\Theta$  und desto stärker die Benetzung, also die Größe der benetzten Fläche.**



SPÉKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH DUEZ, C. ET AL.: WETTING CONTROLS SEPARATION OF INERTIAL FLOWS FROM SOLID SURFACES. IN: PHYSICAL REVIEW LETTERS 104, ART. 084503, 2010. FIG. 4B

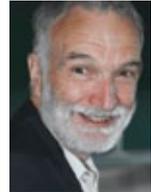
**Forscher um Cyril Duez von der Universität Lyon zufolge entscheidet der Kontaktwinkel  $\Theta$  darüber, wie groß der Krümmungswinkel  $\Psi$  des Flüssigkeitsstroms ist. Wird  $\Psi$  zu groß, beginnt die Flüssigkeit an der Unterkante des Festkörpers entlangzulaufen.**

men konfrontiert. Aus manchen Brunnen fällt das Wasser nämlich nicht frei herunter, sondern fließt unter dem überhängenden Rand entlang (siehe Foto S. 49). Weil der Unterbau solcher Brunnenbecken oft aus weicherem Stein als das Becken selbst besteht, kann er erodieren, zumindest wenn man in geologischen Zeiträumen denkt. Die pilzförmigen Steinformationen, die man beispielsweise in Kappadokien vorfindet (siehe ebenfalls Fotos S. 49), sind möglicherweise genau so entstanden. Im Verlauf von Jahrmillionen wurde weiches Tuffgestein, auf das Wasser von einer Schicht festeren Gesteins herabließ, Opfer des Teekanneneffekts – der sich damit als wesentlich älter erweist als die Teekanne selbst. ~



SPÉKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH CEPHEIDEN UND ENOWIUCK/CC-BY-SA-3.0

**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.

**QUELLE**

**Duez, C. et al.:** Wetting Controls Separation of Inertial Flows from Solid Surfaces. In: Physical Review Letters 104, 084503, 2010

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323149](http://www.spektrum.de/artikel/1323149)

# 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!



# Barbaren auf dem Thron

Germanische Anführer avancierten ab dem späten 5. Jahrhundert in ehemals römischen Provinzen zu Königen. Ihre Karriere verdankten sie einer geschickten Gratwanderung zwischen ihrer eigenen und der gallorömischen Kultur.

Von Stefanie Dick

**G**ekrönten Häuptern kommt heutzutage in Europa vor allem eine repräsentative Funktion zu. In früheren Zeiten aber regierten sie, gestützt auf eine adlige Oberschicht, über Volk und Reich. Die Ursprünge der Monarchie reichen im Abendland bis in jene Umbruchphase zurück, in der aus der Spätantike das frühe Mittelalter hervorging. Historiker und Archäologen zeigten inzwischen: Das Imperium Romanum trieb diese Entwicklung unabsichtlich voran.

Im 1. Jahrhundert v. Chr. war es in den nordalpinen Raum bis zum Rhein vorgedrungen, und die in den neuen Provinzen ansässige überwiegend keltische Bevölkerung übernahm allmählich die mediterrane Kultur. Auf der anderen Rheinseite aber begann in den Augen der Römer das Barbaricum, das heißt ein unzivilisiertes und potenziell feindliches Terrain. Zwar gilt die Vorstellung inzwischen als überholt, Rom habe nach der verlorenen Varusschlacht 9 n. Chr. alle Eroberungsambitionen aufgegeben. Faktisch aber fungierte der Fluss von da an für fast fünf Jahrhunderte als natürliche Grenze gegen die »Germanen«, wie man sie nannte.

## AUF EINEN BLICK

### KARRIERELEITER DER KRIEGER

**1** Mit der Eroberung Galliens im 1. Jahrhundert v. Chr. kamen die von den Römern als »**Germanen**« bezeichneten Gruppen in Kontakt mit der Kultur des Mittelmeerraums.

**2** Ab der Zeitenwende lässt sich ein **römischer Einfluss** archäologisch nachweisen. Insbesondere Beutezüge und Söldnertätigkeit brachten Geld und Produkte ins Land.

**3** Mit der Zeit entstand eine **germanische Kriegerelite**, deren Anführer auf ehemals römischem Gebiet im 5. Jahrhundert miteinander konkurrierende Reiche gründeten. Der Franke Childerich I. obsiegte und legte den Grundstein für das Königtum des Mittelalters.

Diese Bezeichnung stellte allerdings eine starke Vereinfachung dar, suggeriert sie doch Homogenität, während die in jenen Gebieten lebenden Gruppen ethnisch, kulturell und politisch sehr verschieden waren. Zwar hatten ihre Sprachen einen gemeinsamen Ursprung, den Linguisten in Anknüpfung an die römischen Konventionen als Germanisch bezeichnen. Aber schon im 1. Jahrhundert v. Chr. war daraus eine Vielzahl von Einzelsprachen hervorgegangen. Grundsätzlich könnte in einigen Gebieten noch eine Verständigung untereinander möglich gewesen sein, doch spätestens in nachchristlicher Zeit dürfte ein an der Ostsee lebender »Germane« einen Bewohner des südlichen Barbaricums kaum noch verstanden haben.

Gemeinsam war ihnen hingegen ihre Lebens- und Wirtschaftsweise, wie die archäologische Forschung zeigt. Man lebte in überschaubaren Siedlungen, die selten mehr als 200 Bewohner fassten; unwegsames Gelände trennte die Territorien der Dörfer voneinander. Ackerbau und Viehzucht, mit einfachen Mitteln betrieben, bildeten lange die Lebensgrundlage. Nennenswerte Überschüsse waren damit kaum zu erwirtschaften, also mussten alle Individuen der Gemeinschaft dabei mitwirken, die Äcker zu bestellen und Vorräte für den Winter anzulegen, Gebrauchsgüter herzustellen beziehungsweise zu reparieren. Unter derartigen Bedingungen werden zwar manche Mitglieder mehr Autorität besessen haben als andere, doch über solche Rangabstufungen hinaus konnten sich nach heutigem Verständnis kaum größere soziale Unterschiede ausbilden.

Das änderte sich etwa um die Zeitenwende. Die ältesten Hinweise bieten die beispielsweise anhand von Feuerstellen rekonstruierten Grundrisse der Häuser in den Siedlungen: Während die meisten höchstens zehn Meter lang waren, erreichten andere 30 Meter. In den größeren Häusern nahmen auch die als Stallungen identifizierten



Bauarbeiter stießen 1653 im heute belgischen Tournai auf die Grabstätte Childerichs I., der im 5. Jahrhundert die fränkische Monarchie begründete. Nur wenige Stücke des Grabschatzes sind heute noch erhalten (im Bild: mit Gold und Granaten geschmückte Teile eines Schwertgriffs und einer Scheide).



Der so genannte Große Ludovisische Schlachtsarkophag stand vermutlich außerhalb der Stadtgrenzen Roms in einem Grabbau des 3. Jahrhunderts. Die Front zeigt eine Schlacht zwischen Römern und Barbaren, ihrer Kleidung nach Germanen. 1621 entdeckt, gelangte der Sarkophag in die Kunstsammlung des Kardinals Ludovico Ludovisi – daher der Name (Ausschnitt links: Offizier mit Kriegsgefangenem).

Bereiche mehr Fläche ein. Es wurde also mehr Vieh gehalten, die Eigentümer waren demnach wirtschaftlich bessergestellt als der Großteil der Dorfbewohner.

Ebenfalls in diese Richtung weisen die als Herrenhöfe bezeichneten Wohnstätten in Norddeutschland. So stand etwa auf der Feddersen Wiede im heutigen Landkreis Cuxhaven ein Hof, der sich durch die Größe und die Zahl der Nebengebäude von allen anderen der Siedlung abhob. Die Besitzer des Anwesens nahmen zweifellos eine gesellschaftliche Vorrangstellung ein, die politischen Einfluss verlieh, so dass hier die Anfänge einer Elitenbildung sichtbar werden.

Dies spiegelt sich seit dem Übergang vom 1. zum 2. Jahrhundert n. Chr. auch in den so genannten Fürstengräbern wider: aufwändig angelegten Grabkammern, in denen die Verstorbenen mit auffallend vielen und hochwertigen Beigaben bestattet wurden. Und während die Mehrzahl der Menschen verbrannt und in Urnen beigesetzt wurde, erfuhren diese Toten eine Körperbestattung.

Dass zu den Grabbeigaben immer wieder auch römische Importwaren gehörten, zum Beispiel Tafel- und Trinkgeschirre aus Silber, Bronze, Keramik oder Glas, liefert einen wichtigen Hinweis für den Grund solcher gesellschaftlichen Differenzierung. Nach wie vor hätten landwirtschaftliche Erträge nicht ausgereicht, solche Güter einzutauschen. Aber



ANG IMAGES / MARCO RIBATTI UND SERGE DOMINGIE



Der »Reiterstein von Hornhausen« schmückte Ende des 6. oder 7. Jahrhunderts wohl das Grab eines fränkischen Kriegers. Das Relief einer Schlange (unten) verweist in die germanische Mythologie.

den schriftlichen Berichten römischer Chronisten lässt sich entnehmen, dass die »Germanen« mit einem anderen Pfund wuchern konnten: ihren militärischen Fähigkeiten. Sei es, dass sie den Rhein überquerten und Siedlungen sowie Landgüter überfielen oder stattdessen Subsidien genannte Zahlungen erhielten, um solche Beutezüge zu unterlassen, sei es, dass sie sich als Söldner anwerben ließen – das Kriegswesen bescherte Erträge, die anders nicht zu erwirtschaften waren.

Diese Kämpfer beteiligten sich freilich immer weniger an der landwirtschaftlichen Produktion, im Gegenteil: Sie mussten versorgt werden. Im Allgemeinen kann man sich die Bevölkerung des Barbaricums in der fraglichen Zeit wohl als bis in die einzelnen Siedlungsgemeinschaften hinein zweigeteilt vorstellen: Neben einer ortsfesten bäuerlichen Gruppe entstand ein zunehmend mobiler, die Krieger und ihre Familien umfassender Bevölkerungsteil, der für beständigen Güterzufluss von außen sorgte, aber auch darauf angewiesen war.

Da erfolgreiche Militäroperationen auf geregelte Befehlsstrukturen angewiesen sind, waren die Kriegergruppen sicherlich hierarchisch organisiert und unterstanden einem auf Grund seiner Erfahrung und Tapferkeit gewählten Anführer. Vermutlich führte er auch bei Verhandlungen mit römischen Offiziellen das Wort. Die nannten ihn General (dux), Fürst (princeps) und früh auch schon König (rex) – ein Versuch, ihr Gegenüber und seine Verhandlungskompetenzen staatsrechtlich einzuordnen. Tatsächlich entsprach diese Sicht nicht den wahren Verhältnissen; vielmehr bildeten sich herrschaftliche Führungsstrukturen, die solche Titel verdienten, erst allmählich heraus. Eher traf es schon die römische

Ansprache solcher Gemeinschaften als »gentes« (von lateinisch: gens = Geschlecht, Stamm), womit die Römer wohl Gruppen meinten, die noch keinen Staat begründet hatten.

Der Niedergang des Weströmischen Reichs und der Rückzug Roms aus den nordalpinen Provinzen im 5. Jahrhundert beschleunigte die gesellschaftliche Entwicklung der Germanen aber dramatisch. Alamannen, Thüringer, Burgunder, Westgoten und Franken drangen nun in die einstigen linksrheinischen Provinzen vor und konkurrierten miteinander um die verbliebenen römischen Ressourcen wie Kulturland und Zentralorte.

Es waren die Franken, deren »Regnum Francorum« genanntes Reich sich im 6. Jahrhundert durchsetzte. Als ehemalige Verbündete Roms besaßen sie dafür auch eine besonders gute Ausgangsposition: Bereits 358 waren fränkische Verbände von Kaiser Julian in Toxandrien (heute in den Niederlanden gelegen) angesiedelt worden, um als Gegenleistung die Rheingrenze zu verteidigen. Das war eine für beide Seiten günstige Regelung: Rom erhielt den dringend benötigten militärischen Nachschub und die fränkischen Krieger eine ökonomische Absicherung ihres Status durch die römischen Soldzahlungen. Es ist gewiss kein Zufall, dass Gregor von Tours in seiner Chronik den fränkischen Anführer Childerich (gestorben 481/82) wiederholt auf der Seite Roms kämpfen lässt.

Mit diesem Anführer betritt eine Schlüsselfigur für das germanische Königtum die Bühne. Inmitten der allgemeinen Auflösungserscheinungen gelang es ihm nicht nur, seine Stellung zu festigen, sondern sogar, sie im Einvernehmen mit dem oströmischen Kaiser noch auszubauen und das Reich sukzessive nach Westen und Süden zu erweitern.

### Bestattet mit königlichem Prunk

Bei Ausschachtungen für ein Hospiz war sein Grab 1653 in Tournai (heute in Belgien) von Arbeitern entdeckt worden. Ein Siegelring mit seinem Porträt und der Umschrift »CHILDERICI REGIS« identifizierte den Toten, der mit Waffen, römischen Goldmünzen und zahlreichen anderen kostbaren Beigaben dort die letzte Ruhestätte gefunden hatte. Die meisten Fundstücke gelten heutzutage als verschollen, doch der französische Gelehrte Jean-Jacques Chifflet (1588–1660) hatte eine für seine Zeit ungewöhnlich penible Dokumentation erstellt. Ihre Auswertung vermittelt einen einzigartigen Einblick in das Leben eines fränkischen Anführers in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts.

Man hatte für Childerich ein monumentales Hügelgrab aufgeschüttet. An dessen Rändern wurden 21 Pferde mit begraben. Die äußere Erscheinung der Bestattung entspricht damit den Bräuchen und Vorstellungen, wie sie auch in anderen germanischen Fürstengräbern dieser Zeit zum Ausdruck kommen. Das gilt auch für typische Grabbeigaben wie einen Armreif aus massivem Gold, zahlreiche mit Granaten besetzte, goldene Schmuck- und Zierstücke sowie kostbare Waffen.

Daneben aber finden sich deutliche Belege, dass Childerich zudem zur römischen Welt gehörte. So deuten Experten



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK NACH STEIGEMANN, C. ET AL. (Hrsg.): CREDO - CHRISTIANISIERUNG EUROPAS IM MITTELALTER, BAND 2, KATACOM-MICHAELIMHOFF-VERLAG, 2013, S. 142

Ende des 5. Jahrhunderts hatte Childeric I. seine Franken im Reigen der germanischen Reiche gut aufgestellt und seine Machtposition intern gefestigt. Nachdem sein Sohn Chlodwig den Anspruch auf Nachfolge durchsetzen konnte, unterwarf er im Lauf seiner Regentschaft die benachbarten Reiche und begründete die fränkische Königsdynastie der Merowinger.

in seinem Grab gefundene byzantinische Goldmünzen als Lohn für geleistete Militärdienste. Ein golddurchwirkter Offiziersmantel und eine goldene Zwiebelknopffibel gelten als römische Militärabzeichen.

Als Anführer einer fränkischen Gruppierung avancierte Childeric offenbar zum römischen Offizier, und als solcher konnte er umgekehrt für Beute beziehungsweise Sold sorgen und damit seinen Status in den eigenen Reihen festigen. Er bewegte sich souverän zwischen zwei Kulturen, der erwähnte Siegelring ist ein bemerkenswertes Beispiel hierfür. Weil die

Franken noch keine eigene Schrift hatten, verweist das »CHILDERICI REGIS« zunächst auf den römischen Kulturkontext, dem Inhalt nach aber auf die Position des Trägers in der germanischen Gesellschaft. Weder für ihn noch für seine Zeitgenossen waren beide Seiten voneinander zu trennen, liefen doch die Abkommen mit dem Imperium stets über ihn als Mittelsmann.

Für die Bestattung zeichnete sein Sohn Chlodwig verantwortlich. Denn indem er seinen Vater für die fränkische Elite sichtbar als Herrscher inszenierte, untermauerte Chlodwig seinen eigenen Anspruch auf die Nachfolge.

Er hatte mit seiner Bewerbung offenbar Erfolg, wie ein Brief des Bischofs Remigius von Reims aus den 480er Jahren erweist. Als Vertreter der gallorömischen Senatorenschicht sprach er ihn zunächst als König an und bemerkt dann: »Es ist zu uns die laute Kunde gelangt, dass du die Verwaltung der Belgica secunda übernommen hast.« Mit der einstigen römischen Organisation hatte dies allenfalls dem Namen nach zu tun, denn weder die Provinzbezeichnung noch der Hinweis auf deren Verwaltung entsprechen ihrem ursprünglichen Gehalt. Sie boten aber weiterhin einen formalen Rahmen, der ein gewisses Maß an Regelmäßigkeit, Stabilität, Ordnung und Legitimation garantierte. Dabei ist es bezeichnend, dass auch hier der Königstitel als Kennzeichen einer germanischen Machtstellung und der Aspekt eines römischen Amtes verwoben sind.

### Römischer Purpur für den Franken

Als Roms Legionen abzogen, hinterließen sie keine menschenleeren Gebiete. Die Mehrheit der einfachen Bevölkerung blieb dort, ebenso Teile der Oberschicht. Die musste sich nun mit den Franken arrangieren – aber diese umgekehrt auch mit ihnen, bildeten sie doch eine Minderheit. Zudem erhoben die oströmischen Kaiser formal Anspruch auf das einstige Reichsgebiet. Zwar verfügten sie nicht über die notwendigen militärischen Ressourcen, aber sie versuchten, durch Geschenke und Subsidien auf die Anführer Einfluss zu nehmen. Geschickt verstand es Chlodwig, das zu nutzen. Im Jahr 508 schickte Kaiser Anastasios von Byzanz eine Gesandtschaft zu ihm nach Tours, um ihn zum Konsul zu ernennen. Die überreichte Würdezeichen wie purpurne Gewänder und ein Diadem. Obschon der Titel damals keine Funktion mehr hatte, festigte er die Machtstellung des Franken gegenüber der gallorömischen Bevölkerung.

Während Letztere an Zentralgewalt und kaiserliche Herrschaft gewöhnt war, kannten die Franken Herrschaft vor allem in Form militärischer Führung und auf militärische Belange bezogen. Aus diesen unterschiedlichen Traditionen ergaben sich Konflikte, wie Gregor von Tours überliefert: Nachdem Chlodwig mit seinen Männern eine Kirche ausgeraubt hatte, erhoffte der zuständige Bischof einen geweihten Krug zurück. Chlodwig war einverstanden und bat seine Anhänger bei der Beuteteilung in Soissons zusätzlich um dieses

Stück. Alle waren einverstanden – bis auf einen Krieger. Mit den Worten »Nichts sollst du davon haben, als was dir nach dem Recht das Los zuteilt!« schlug er den Krug entzwei.

Einem römischen Feldherrn wäre es zweifellos möglich gewesen, den Wunsch des Bischofs zu erfüllen. Doch selbst als siegreicher Anführer musste sich Chlodwig dem Losentscheid beugen. Die Empörung des Kriegers zeigt in aller Deutlichkeit, dass ein Königtum als zentrale Herrschaftsinstitution unter den Franken im ausgehenden 5. Jahrhun-

## Nichts sollst du haben, als was dir nach dem Recht das Los zuteilt!

dert noch keineswegs voll ausgebildet war. Es ist bezeichnend, dass Chlodwig auf die nächste Heeresversammlung warten musste, um die Demütigung zu rächen: Als Anführer rügte er die angeblich schlampige Ausrüstung seines Widersachers – und spaltete ihm den Schädel.

Insgesamt hat er die Entwicklung der Monarchie und die Konsolidierung des Frankenreichs deutlich vorangetrieben. Indem er konkurrierende Anführer benachbarter Verbände ausschaltete und damit seinen Machtbereich ständig ausdehnte, schuf er die Grundlage für ein Großreich, das drei Jahrhunderte später weite Teile Europas umspannen sollte. Sein Übertritt zum Christentum in der Zeit zwischen 497 und 507 war ein wichtiger Schritt zur kulturellen Integration von gallorömischer und germanischer Bevölkerung. Es entstand ein Volk mit einer gemeinsamen fränkisch-christlichen Identität. Als Chlodwig 511 starb, ging die Herrschaft an seine Nachkommen über. Die Merowinger, wie die von ihm begründete Dynastie genannt wird, regierten als Könige das Reich der Franken, bis sie 751 den Karolingern das Feld überlassen mussten. ~

### DIE AUTORIN



Die promovierte Historikerin **Stefanie Dick** lehrt Mittelalterliche Geschichte an der Universität Kassel.

### LITERATURTIPPS

**Becher, M.:** Chlodwig I. Der Aufstieg der Merowinger und das Ende der antiken Welt, C.H.Beck, München 2011

*Ebenso fundierte wie spannende Darstellung der frühfränkischen Geschichte*

**Dick, S.:** Der Mythos vom »germanischen« Königtum. Studien zur Herrschaftsorganisation bei den Germanisch sprechenden Barbaren bis zum Beginn der Völkerwanderungszeit. Ergänzungsband 69 zum »Reallexikon der Germanischen Altertumskunde«, De Gruyter, Berlin, New York 2008

*Zwischen Alter und Mittelalterlicher Geschichte vermittelnd unternimmt dieses Buch eine umfassende Darstellung der Entstehung frühmittelalterlichen Königtums.*

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323151](http://www.spektrum.de/artikel/1323151)

# Stadt, Land, Flucht

Trieb die »Völkerwanderung« Galliens Landbevölkerung in die Städte? Oder suchte umgekehrt die gallische Oberschicht auf dem Land Zuflucht vor dem römischen Fiskus? Am Beispiel der »villa rustica« decken Historiker den Gesellschaftswandel im spätantiken Gallien auf.

Von Christian Witschel

Die Landwirtschaft war im Römischen Reich wie in allen vormodernen Gesellschaften der wichtigste Wirtschaftszweig. So verwundert es nicht, dass die meisten seiner Einwohner auf dem Land lebten. Das galt zumindest zeitweise sogar für die Angehörigen der Oberschicht. Mochten sie auch durch Ämter und gesellschaftliche Verpflichtungen an die Stadt gebunden sein, bezogen sie den Großteil ihrer Einkünfte doch von ihren Landgütern, den »villae rusticae«. Daher hielten sie sich regelmäßig dort auf, um nach dem Rechten zu sehen, aber auch, um der Hektik der Metropolen eine Weile zu entfliehen. Weil sie dabei nicht auf einen standesgemäßen Rahmen verzichten wollten, waren diese Güter entsprechend ausgestattet. So entstand ab der mittleren Republik der Typus der ländlichen Villa, die einerseits eine Betriebseinheit für die Produktion beispielsweise von Getreide, Wein oder Olivenöl darstellte, andererseits eine luxuriöse Elitenresidenz.

Das traf ebenso auf Gallien zu, wo sich im Zuge der Romanisierung seit dem 1. Jahrhundert n. Chr. eine zum italischen Kernland analoge Siedlungs- und Wirtschaftsweise etabliert hatte. Die Veränderungen, die Gallien vom mittleren 3. bis zum späten 6. Jahrhundert erlebte, sollten sich daher auch in der Entwicklung des ländlichen Raums widerspiegeln. Doch leider sind nur wenige geeignete schriftliche Quellen über

## AUF EINEN BLICK

### BEWÄHRTES BEWAHRT

**1** Das **Leben und Arbeiten auf dem Land** spielte im spätantiken Gallien eine wichtige Rolle. Es ist in den Schriftquellen lediglich für die Belange der Oberschicht gut dokumentiert, nicht für die breite Bevölkerung.

**2** **Siedlungsarchäologen** versuchen, die Wissenslücke zu schließen. Insbesondere Veränderungen in den Strukturen von Landgütern – »villae rusticae« – und ländlichen Siedlungen sollten dazu Informationen liefern.

**3** Es zeichnet sich ab, dass einige gängige Hypothesen die historische Realität nicht treffen. Insgesamt hatten antike **Siedlungsmuster** auf dem Land weit länger Bestand als bislang angenommen.



die Verhältnisse dort erhalten. Literarische Texte etwa aus der Feder des Ausonius oder des Sidonius Apollinaris neigten zu einer romantischen Verklärung und konzentrierten sich überdies auf das Leben der Besitzenden, während die Situation der einfachen Landbevölkerung in den Hintergrund trat. Archäologische Forschungen können diese Lücke schließen, seien es Ausgrabungen oder Oberflächenprospektionen. Bislang sind aber nur wenige ländliche Siedlungsplätze in Gallien großflächig und mit modernen Methoden ergraben worden. Bei Villen lag der Fokus zudem meist auf den Hauptgebäuden, lieferte also vor allem Informationen zu den Lebensumständen der Oberschicht. Auch systematische, das heißt in einem definierten Raster erfolgende Begehungen, bei denen jedes Artefakt, und sei es noch so klein, verzeich-

net wird, um beispielsweise anhand von Häufungen bestimmter Fundkategorien auf funktionale Zusammenhänge zu schließen, wurden bislang zu selten unternommen.

Die wenigen Ausnahmen wie in vom Braunkohleabbau betroffenen Regionen von Köln lassen aber bereits an etablierten Vorstellungen zweifeln. So wurde in der Spätantike offenbar häufiger wieder mit Holz gebaut. Weil davon nur geringe Reste erhalten geblieben sind, haben Archäologen solche Strukturen früher oft übersehen beziehungsweise niedriger bewertet als die Überreste steinerner Bauten.

Zudem wurden sowohl die Dichte der ländlichen Besiedlung in der Kaiserzeit wie ihre Kontinuität in der Spätantike erheblich unterschätzt. Eine lange angenommene Entvölkerung des Landes, also eine regelrechte Flucht größerer Grup-



Im Süden Galliens, unweit der antiken Stadt Elusates, lag das Pyrenäen-Landgut Séviac. Bei Grabungen kamen wertvolle Mosaiken ans Licht, von denen einige aus dem 5. Jahrhundert stammen, das Forschern eigentlich als Zeit des Niedergangs galt.

## Kirchen auf dem Land

**Fernab der Städte lebten die Gallorömer der Spätantike eine intensive Religiosität.** So besaßen einige Villen kleine Tempel, und es gab zahlreiche größere Heiligtümer verschiedener Götter. Trotz der Hinwendung der Kaiser zum Christentum seit Konstantin bestanden viele davon bis in das späte 4. oder gar frühe 5. Jahrhundert fort. Das belegen nicht nur archäologische Befunde etwa im Umland von Trier, sondern auch Berichte über die Gegenmaßnahmen von Bischöfen wie Martin von Tours. Allmählich aber setzte sich das Christentum auch auf dem Land durch, und laut der schriftlichen Überlieferung errichteten manche Villenbesitzer ab dem späten 4. Jahrhundert Kirchen

auf ihren Landgütern. Archäologisch sind diese allerdings erst ab dem späten 5. oder frühen 6. Jahrhundert nachzuweisen, und das nur recht selten.

In Aquitanien wurden solche Gotteshäuser erst errichtet, als sich der Lebensstil in den Villen bereits zu verändern begann. Denn im Umkreis solcher Kirchen wurden nun auch Bestattungsorte angelegt, teilweise in Räumen der Villen. Andere Teile der Landgüter scheinen aber als Wohneinheiten fortbestanden zu haben; hier müssen der Besitzer und weitere Personen gewohnt haben, die den Sakralraum als Kirche und Grablege nutzten.

pen in die Städte, schließen Forscher heutzutage aus, zumal die meisten urbanen Zentren zur selben Zeit erheblich an Siedlungsfläche verloren. Auch rückte die Landbevölkerung wohl nicht in größeren Dörfern zusammen wie vermutet, sondern wohnte weiterhin in verschieden großen verstreuten Siedlungen. Allerdings scheint deren Zahl im Lauf der Spätantike tatsächlich zurückgegangen zu sein, in den einzelnen Regionen in unterschiedlichem Maß. Diese Einschätzung könnte sich aber auch einem noch ungenügenden archäologischen Forschungsstand verdanken.

### Überlieferung und Archäologie im Widerspruch

Schwierig einzuschätzen bleibt dabei vor allem, welche längerfristigen Auswirkungen die Invasionen von germanischen Gruppen hatten, die mitunter tief nach Gallien eindrangten. Bis in das späte 20. Jahrhundert hinein haben Forscher damit einschneidende Zäsuren in der Siedlungsgeschichte Galliens verbunden. Heute erscheinen die Folgen weniger dramatisch. Selbst in dem besonders betroffenen Norden Galliens blieben viele Höfe und Weiler bis weit ins 5. Jahrhundert hinein bewohnt. Das gilt umso mehr für Südwestgallien, wo etwa die große Invasion der Jahre 406 bis 409 laut einigen Beschreibungen rauchende Trümmer zurückgelassen haben soll. Hinzu kommt, dass einige Jahre später die Westgoten von der römischen Verwaltung in dieser Region angesiedelt wurden. Das scheint auf einen markanten Einschnitt in der Villenkultur hinzudeuten – den der archäologische Befund allerdings nicht bestätigt. Die meisten Prachtvillen blieben im 5. Jahrhundert bewohnt, einige wurden in der fraglichen Zeit sogar noch ausgebaut (siehe Foto S. 58/59).

Komplizierter wird das Bild, wenn man fragt, welche Bedeutung die Villa als typisch römische Siedlungsform in diesem Kontext noch besaß. Vor allem in Nordgallien bestanden zwar einige der in der Kaiserzeit etablierten Landgüter auch in der Spätantike fort, in besonderer Verdichtung im Umkreis der Kaiserresidenz Trier. Viele wurden jedoch nur noch teilweise und in stark veränderter Weise genutzt. Häufig scheint der Besitzer gewechselt zu haben, wobei die neuen Bewohner keinen Wert mehr auf römische Standards legten.

So hat man Thermen aufgegeben und in Repräsentationsräumen der Hauptgebäude Zwischenwände aus Holz errichtet, was sehr viel einfacher wirkte als die bis dahin dominierende Steinbauweise. Auch Siedlungen, die in dieser Zeit neu gegründet wurden, bestanden nun bisweilen aus mehreren in Holzbauweise errichteten Langhäusern sowie dazwischen verstreuten Grubenhäusern – Letztere waren in die Erde eingetieft für Vorratshaltung und Handwerk (siehe Grafik rechts). Funde wie etwa Münzen beweisen aber, dass diese »unrömisch« wirkenden Siedlungen bis mindestens zur Mitte des 5. Jahrhunderts weiterhin in großräumige wirtschaftliche Austauschsysteme eingebunden waren. Gegen eine Verarmung der ländlichen Bevölkerung bis zu dieser Zeit sprechen auch reich ausgestattete Gräber, der schlichten Bauweise der Häuser zum Trotz.

Von den Bewohnern der Siedlungen wissen wir nur wenig. Gerade für Nordgallien stellt sich die Frage, in welchem Maß dort im genannten Zeitraum bereits Germanen lebten, denen man die Ansiedlung innerhalb der Grenzen des Imperium Romanum seit dem späten 3. Jahrhundert gestattet hatte. Manche waren Kriegsgefangene, andere hingegen wurden angeworben. Sie sollten Äcker bestellen und häufig auch Kriegsdienst leisten. Vermutlich spiegeln die erwähnten neuartigen Siedlungsformen diese Veränderung wider, zumal die Fundobjekte bisweilen ebenfalls germanisch geprägt sind.

In vieler Hinsicht anders stellt sich das Bild in Aquitanien dar, einer reichen Region im Südwesten Galliens. Hier lässt sich die in zeitgenössischen Berichten erwähnte Ansiedlung der mit Rom verbündeten Westgoten im Jahr 418 archäologisch kaum fassen. Falls deren Eliten einige der Villen übernahmen, müssen sie die römische Kultur also außerordentlich schnell angenommen haben.

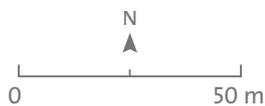
Und noch etwas unterschiedlich in Aquitanien von der Entwicklung in Nordgallien: Die Prachtvillen wurden gerade im späten 4. und früheren 5. Jahrhundert eher noch ausgebaut. Offenbar war die dortige Oberschicht nach wie vor in der Lage, sich in gewohnter Weise zu inszenieren. So gab es repräsentative Innenhöfe, Badegebäude sowie mit Fußbo-

denmosaiken und Wandmalereien prachtvoll ausgestattete Räume, in denen der Besitzer hochrangige Gäste empfing. Sehr wichtig war den spätantiken Villenbesitzern Aquitaniens auch die Demonstration ihrer Bildung. Dazu dienten beispielsweise marmorne Skulpturen, die Themen aus der antiken Mythologie betrachteten. Solche Statuen waren nicht selten ererbte oder auf dem Kunstmarkt erworbene ältere Stücke; manche hat man aber erst in der Spätantike neu gefertigt, was spezialisierte und sicher gut bezahlte Werkstätten voraussetzt. Die Repräsentation des herausgehobenen sozialen Status lässt sich auch in den Grabmonumenten nachweisen, die oft im Umkreis der Villen angelegt wurden. Dort ließen sich die Besitzer in eigens dafür hergestellten Sarkophagen bestatten, deren Reliefs vom Wohlstand dieser ländliche Welt kündete. Erst im Lauf des 6. Jahrhunderts be-

gann sich auch in dieser Region der Lebensstil zu verändern. Nun wurde nur noch ein Teil der Gebäude bewohnt, die Räume auch hier durch Einbauten unterteilt. Manche Gebäude und Räume der Villen dienten nun zudem als Grabstätten.

Ungeachtet ihres Repräsentationscharakters waren die meisten Villen landwirtschaftliche Betriebseinheiten, und insofern ist ihre Entwicklung von großer wirtschaftshistorischer Bedeutung. Die Gesamthöhe der agrarischen Produktion Galliens in der Spätantike ist schwer einzuschätzen. Insbesondere ist strittig, ob die vermeintliche Verringerung von Landgütern und Weilern in bestimmten Regionen einen Rückgang der ökonomischen Dynamik anzeigt. Für eine solche Annahme spricht, dass weniger ertragreiche beziehungsweise schwieriger zu bestellende Zonen während dieser Epoche häufig aufgegeben wurden. Zudem scheint das spät-

-  römisches Landgut des 1.–3. Jahrhunderts (Hauptgebäude und Nebengebäude)
-  dörfliche Ansiedlung des späteren 4. Jahrhunderts (mit Wohnhäusern aus Holz und so genannten Grubenhäusern)
-  Maas
-  Anhäufung von Münzen
-  einzelne Münzen



In der belgischen Region Flandern haben Archäologen in den 1980er Jahren die Stätte Het Kamp erforscht. Sie fanden eine »villa rustica« aus dem 1. Jahrhundert, die im 3. Jahrhundert niederbrannte und verlassen wurde. Wie Grubenhäuser zeigen, siedelten sich Mitte des 4. Jahrhunderts auf dem Gelände Germanen an. Da viele römische Bronzemünzen entdeckt wurden, handelten die Bewohner mit der Bevölkerung der Umgegend – oder dienten selbst in der römischen Armee.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAFIK, NACH F. STROOBANTS 2013, G. DE BOE, M. DE BIE & L. VAN IMPE 1992, G. DE BOE 1981, KARTEN DER FLANDERS HERITAGE AGENCY

antike Gallien kaum noch landwirtschaftliche Produkte exportiert zu haben; vielmehr stand die Versorgung der eigenen Städte und der Armee im Vordergrund. Die Zentren des Weinanbaus verlagerten sich nach Norden, wo zwischen dem 3. und dem 5. Jahrhundert etwa entlang der Mosel oder in der Pfalz Wein produziert, dann aber vor allem regional verhandelt wurde. Auch das Handwerk gedieh im ländlichen Raum. So fertigten im Hinterland des römischen Köln Werkstätten, die auf dem Gelände von Villen operierten, luxuriöse Glasgefäße in großem Stil. Insgesamt blieb die wirtschaftliche Situation Galliens in der Spätantike also recht stabil.

Zu den unbewiesenen Thesen zählt auch, dass mehr und mehr fruchtbares Land immer weniger und immer reichen Menschen gehörte. Aussagekräftige schriftliche Quellen hierzu sind dünn gesät, und archäologische Befunde helfen kaum weiter, da sie in der Regel wenig über die Besitzverhältnisse auf dem Land verraten. Sicher ist beispielsweise, dass man aus der Größe und Pracht eines Villengebäudes nicht direkt auf den Umfang des zugehörigen Landguts schließen darf. Weiterhin lassen etwa die Briefe des Ausonius erkennen, dass riesige zusammenhängende Besitzungen nicht die Regel waren, sondern Angehörige der Eliten eher eine Vielzahl mittelgroßer Güter besaßen, die mitunter über den gesamten Mittelmeerraum verteilt waren.

### Pächter statt Sklaven

Ebenfalls nicht einfach zu klären ist, wer die eigentliche Arbeit dort verrichtete. Sklaven scheinen im spätantiken Gallien in der Landarbeit selten eingesetzt worden zu sein. Die meisten Bauern waren wohl so genannte Kolonen, die als Pächter seit dem Beginn der Spätantike durch neue rechtliche Regelungen an das Land, das sie bewirtschafteten, gebunden waren. Sie waren vom personenrechtlichen Status her aber weiterhin frei – es führte kein direkter Weg vom spätantiken Kolonat zur mittelalterlichen Leibeigenschaft. Wo diese abhängigen Arbeitskräfte wohnten, ist nur schwer auszumachen. Viele der aquitanischen Prachtvillen weisen nämlich keine erkennbaren Bereiche hierfür auf, waren also vielleicht eher Residenzen des Besitzers beziehungsweise seines Verwalters, während die Pächter ein Stück weg davon lebten.

Der zunehmende Ausbau von Großvillen in bestimmten Regionen während der Spätantike hat ferner zu der These inspiriert, die Eliten hätten die Städte verlassen, um sich den Forderungen der staatlichen Administration zu entziehen. Ihre »villae rusticae« hätten sie mit Mauern und Türmen befestigen lassen, um dort eine Art eigenrechtliche Schutzherrschaft über die Pächter auszuüben. Weil die Eliten mit diesem Verhalten ihr steuerbares Kapital wie auch ihre Expertise der Kontrolle des Staats entzogen, hätte diese Entwicklung erheblich zum Untergang des Römischen Reichs im Westen beigetragen.

Einer genaueren Prüfung hält keine der Vorstellungen stand. So widersprechen die schriftlichen Quellen einer massiven Stadtflucht der Oberschicht. Vielmehr pendelten die

Eliten Galliens auch in der Spätantike zwischen Stadt und Land. Ausonius beschreibt das in einem seiner Gedichte wie folgt: »Wann immer ein Überdruß mich dazu bringt, den Ort zu wechseln, trete ich von eine Sphäre in die andere über und kann so im beständigen Wechsel Stadt- und Landleben gleichermaßen genießen.«

Eine Ummauerung der Villen kam zwar vor, den archäologischen Befunden zufolge jedoch nur selten. Die meisten Großvillen blieben offene Anlagen, die sich gerade nicht nach außen hin abgrenzten. Allenfalls Teilareale wurden befestigt. So im Hinterland von Köln, wo die Nähe zur Rheingrenze Anlass gab, am Rand eines Gehöfts einen stark befestigten Turm (»burgus«) zu errichten, der bei Angriffen als Rückzugsort, normalerweise schlicht als Getreidespeicher diente.

Wie lange also dauerte die von den Römern entwickelte Villenkultur fort? Als ganz Gallien ab der Mitte des 5. Jahrhunderts in das fränkische Reich integriert wurde, bedeutete dies vor allem für den Norden wohl eine erhebliche Zäsur: Bestehende Siedlungen wurden aufgelassen; neue entstanden in einigem Abstand von den alten Gutshöfen, wenn man auch ihre Ackerflächen weiterhin bestellt hat. Für Mittelgallien lassen sich hingegen einzelne Großvillen anführen, in denen sogar noch im 6. Jahrhundert neue Mosaikfußböden verlegt wurden. In einem Fall ist durch eine Inschrift der Besitzer bekannt – ein Germane namens Steleucus. Auch in Südwestgallien blieben einzelne Villenareale bis in das Früh- oder Hochmittelalter bewohnt; und nicht selten wurden auf ihrem Gelände romanische Kirchen errichtet. Die römische Villenkultur bestand im Süden also in Einzelfällen weit länger fort als gedacht, und mitunter bildeten die Landgüter schließlich den Kern von mittelalterlichen Dörfern, was auf eine langfristige Kontinuität ländlicher Siedlungsstrukturen hindeutet. ~

### DER AUTOR



Der Althistoriker **Christian Witschel** lehrt an der Universität Heidelberg und ist derzeit Geschäftsführender Direktor des Heidelberg Center for the Cultural Heritage.

### QUELLEN

- Balmelle, C.:** Les demeures aristocratiques d'Aquitaine: Société et culture de l'Antiquité tardive dans le Sud-Ouest de la Gaule. Ausonius, Bordeaux, Paris 2001
- Van Ossel, P., Ouzoulias, P.:** Rural Settlement Economy in Northern Gaul in the Late Empire: An Overview and Assessment. In: Journal of Roman Archaeology 13, S. 133–160, 2000
- Ouzoulias, P. et al. (Hg.):** Les campagnes de la Gaule à la fin de l'Antiquité; Actes du Colloque Montpellier 1998. Édition APDCA, Antibes 2001
- Rupp, V., Birley, H. (Hg.):** Landleben im römischen Deutschland. Theiss, Stuttgart 2012

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323772](http://www.spektrum.de/artikel/1323772)

# 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 Helmholtzgymnasiums« 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

GRUPPENTHEORIE

# Die Tücken des Bilderaufhängens

Wie hängt man mit  $n$  Nägeln und einer Schnur ein Bild so auf, dass es herunterfällt, sowie man auch nur einen Nagel zieht?

VON JEAN-PAUL DELAHAYE

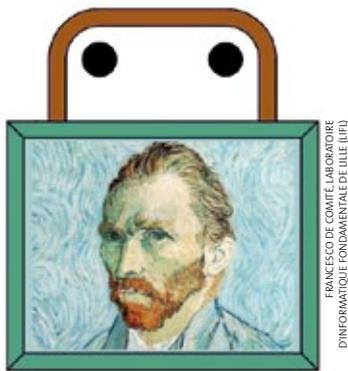
Schlagen Sie zwei Nägel in die Wand. Hängen Sie an diese Nägel ein Bild auf die übliche Weise (Bild rechts, oben). Wenn einer der Nägel aus der Wand rutscht, hält der andere noch die Schnur und mit ihr das Bild. In dieser Situation stellt sich eine – für einen Mathematiker – vollkommen naheliegende Frage: Kann man die Schnur so um die Nägel schlingen, dass das Bild schon dann fällt, wenn nur ein Nagel verschwindet?

Nennen wir eine solche Anordnung eine Podger-Aufhängung, nach einer Figur aus dem Roman »Drei Männer in einem Boot« von Jerome K. Jerome. Onkel Podger nimmt bereitwillig eine wichtige Aufgabe – ein Bild aufzuhängen – auf sich, um sie sodann ebenso bereitwillig an andere weiterzuveteilten. Obendrein schimpft er die ganze Zeit auf die Ungeschicklichkeit der anderen – und stellt sich selbst so dämlich an, dass hinterher nicht nur das Glas zerbrochen und die Leinwand aus dem Rahmen gefallen ist, sondern der Rest des Dorfs mit Blutstillen und Aufräumen alle Hände voll zu tun hat.

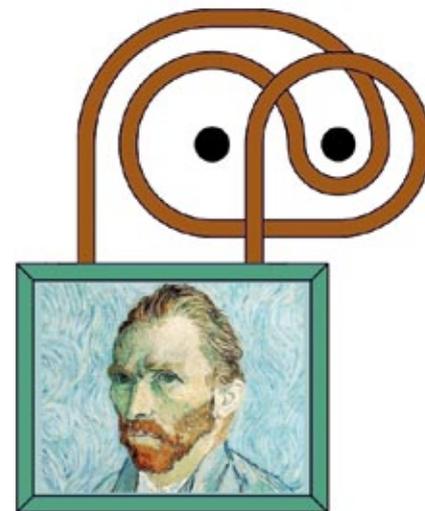
Es gibt auch ernsthafte Anwendungen für eine Podger-Konstruktion. In der Industrie kann sie bewirken, dass zur Verhütung weiteren Schadens ein ganzes Fließband stehen bleibt, wenn auch nur eine Station ausfällt.

Das »Problem des Bilderaufhängens« (»picture-hanging puzzle«) gehört zum Grenzbereich von algebraischer Topologie, Informatik – und Unterhaltungsmathematik. Eine große Gruppe amerikanischer Forscher hat sich zu seiner Lösung zusammengetan: aus dem MIT Vater und Sohn Martin

und Erik Demaine sowie Ronald Rivest (dessen Name das R zum RSA-Verschlüsselungsverfahren beigesteuert hat), von der Yale University Yair Minsky, Joseph Mitchell von der State University of New York at Stony Brook und Mihai Pătraşcu vom Forschungslabor von AT&T.



FRANCESCO DE COMPTÉ, LABORATOIRE D'INFORMATIQUE FONDAMENTALE ET THEORIE (LIF)



Das obere Bild bleibt auch mit nur einem der beiden Nägel hängen. Gilt das ebenso für das untere? Auflösung S. 66!

Erstmals veröffentlicht hat das Problem ein Mensch namens A. Spivak, über den sonst nichts bekannt ist, 1997 in der Zeitschrift »Quantum«. Seitdem sind viele Varianten erschienen, woraufhin die Mathematiker sich genötigt sahen, sich neue theoretische Werkzeuge zuzulegen, und bei der Gelegenheit ein paar schöne, aber nicht einfache Theoreme entdeckten.

Auf die Lösung des ursprünglichen Problems kann man noch durch Probieren kommen – auf dem Papier oder mit echter Schnur. Das wird mühsamer für die Verallgemeinerung, die wir das » $n$ -Nägel-Problem« nennen wollen: Schlinge eine Schnur so um  $n$  in einer Reihe eingeschlagene Nägel, dass bereits das Ziehen eines einzigen Nagels die Schnur von allen anderen Nägeln befreit und somit das Bild zu Boden bringt. Wer das mit echtem Material probieren will, braucht eine lange Schnur und sehr viel Geduld, denn die verschiedenen Fäden neigen zur Spontanverknötung.

Bei mehr als vier Nägeln hilft keine Geschicklichkeit mehr, sondern nur noch die Algebra. Die entscheidende Idee stammt von Neil Fitzgerald, damals am Imperial College in London: Beschreibe jede Verschlingung als Element der freien Gruppe mit  $n$  Elementen. Wer das tut, kann noch viel verschlungener Probleme stellen und lösen (siehe »Zehn Probleme«, S. 68).

Freie Gruppen kommen in der Mathematik an verschiedenen Stellen vor, vor allem in der algebraischen Topologie – jenem Teilgebiet, das mit algebraischen Mitteln topologische Gebilde wie

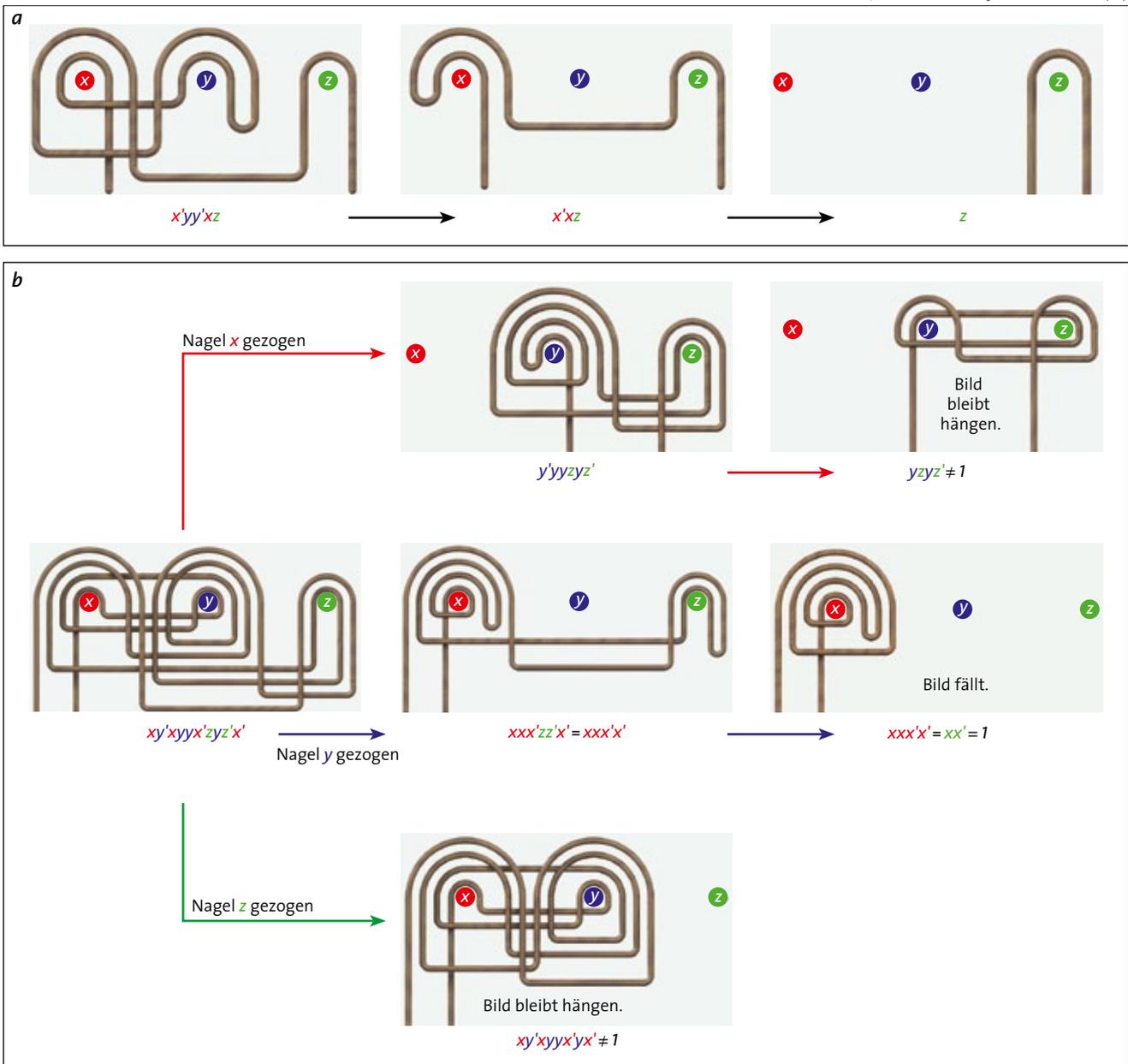
Knoten und Flächen klassifiziert. Für eine freie Gruppe braucht man zunächst nichts weiter als ein paar »erzeugende Elemente«. Nehmen wir zum Beispiel drei Stück und nennen sie  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Wir brauchen uns nicht die geringsten Gedanken darüber zu machen, was  $x$ ,  $y$  und  $z$  sein sollen; diese Information können wir zu einem späteren Zeitpunkt nachtragen oder gar nicht.

Jedes erzeugende Element bekommt noch einen Kollegen, der durch einen Strich gekennzeichnet ist, und jeden endlich langen Ausdruck aus  $x, y, z, x', y'$  und  $z'$  (jedes »Wort«, das aus diesen sechs »Buchstaben« in beliebiger Anzahl zusammengesetzt ist) nennen wir ein Element der freien Gruppe.

Es handelt sich in der Tat um eine Gruppe im mathematischen Sinn.

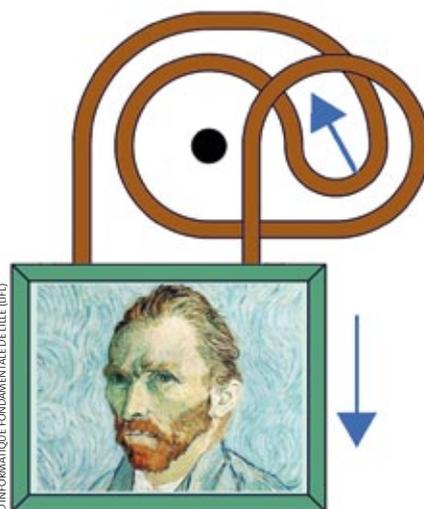
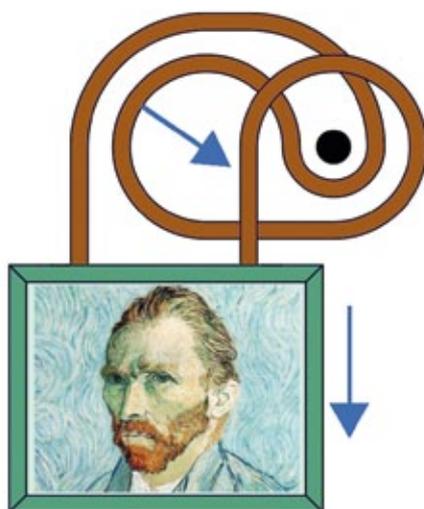
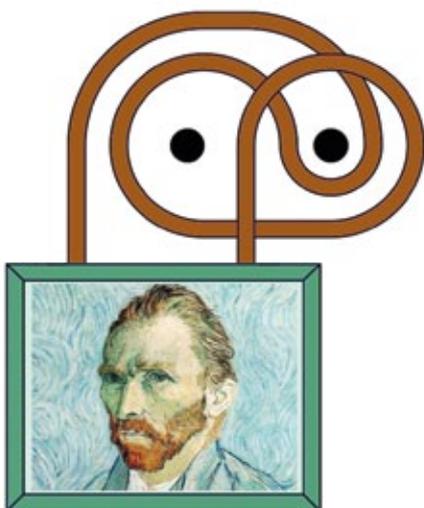
Denn man kann je zwei Elemente stets zu einem dritten verknüpfen, indem man die beiden Wörter ohne Leerzeichen aneinanderhängt (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 72). Das neutrale Element der Gruppe ist das leere Wort, das gar keine Buchstaben enthält. Da man das aber so schlecht sehen kann, schreibt man 1 dafür. Es gilt also  $s1 = 1s = s$  für jedes Ele-

FRANCESCO DE COMITÉ, LABORATOIRE D'INFORMATIQUE FONDAMENTALE DE LILLE (LIFL)



Eine Schnur strammzuziehen ist, wie einen algebraischen Ausdruck zu vereinfachen. So wie die Schnur in der Anordnung  $a$  verschlungen ist, hängt das Bild am Ende nur an Nagel  $z$ . Zieht

man in der Verschlingung  $b$  den Nagel  $x$  oder  $z$ , so halten die jeweils anderen beiden Nägel das Bild. Zieht man allerdings  $y$ , so fällt es herunter.



FRANCESCO DE COMITÉ, LABORATOIRE D'INFORMATIQUE FONDAMENTALE DE LILLE (IFIL)

Zieht man bei dieser Schnur einen der beiden Nägel, dann fällt das Bild.

ment  $s$  der freien Gruppe. Das inverse Element zu  $x$  ist  $x'$  und umgekehrt, entsprechend für die anderen Buchstaben. Es gelten also die Rechenregeln  $xx' = x'x = 1$ ,  $yy' = y'y = 1$ ,  $zz' = z'z = 1$ ; und das sind auch schon die einzigen Regeln überhaupt. Gäbe es weitere Abhängigkeiten unter den Elementen der Gruppe, könnte man sie nicht mehr frei nennen.

Zum Beispiel sind  $s = xyxx'y'z'z$  und  $r = zzzx'xy'z'$  zwei Elemente unserer Gruppe. Aber die sehen komplizierter aus, als sie sind. So kann man  $s$  vereinfachen, indem man aus seiner Mitte das  $xx'$  streicht; das ist ja gleich 1. Es ergibt sich  $s = xy'y'z'z$ ; nun sind  $y$  und  $y'$  aneinandergeraten und löschen sich gegenseitig aus, desgleichen  $z'$  und  $z$ , so dass von dem ganzen langen Ausdruck nur  $s = x$  übrig bleibt. Entsprechend reduziert sich  $r$  auf  $r = zzz$ , was man manchmal auch als  $z^3$  ausdrückt. Man denkt sich nämlich die Verknüpfung, welche die Gruppe definiert, gerne als Multiplikation; aber Vorsicht: Kommutativ ist unsere Multiplikation nicht.  $xy$  ist etwas anderes als  $yx$ . Deshalb darf man auch einen Ausdruck wie  $xyx'y'$  nicht zu 1 vereinfachen, denn es ist nicht erlaubt, statt  $yx'$  in der Mitte einfach  $x'y$  zu schreiben.

**Formeln stramm ziehen**

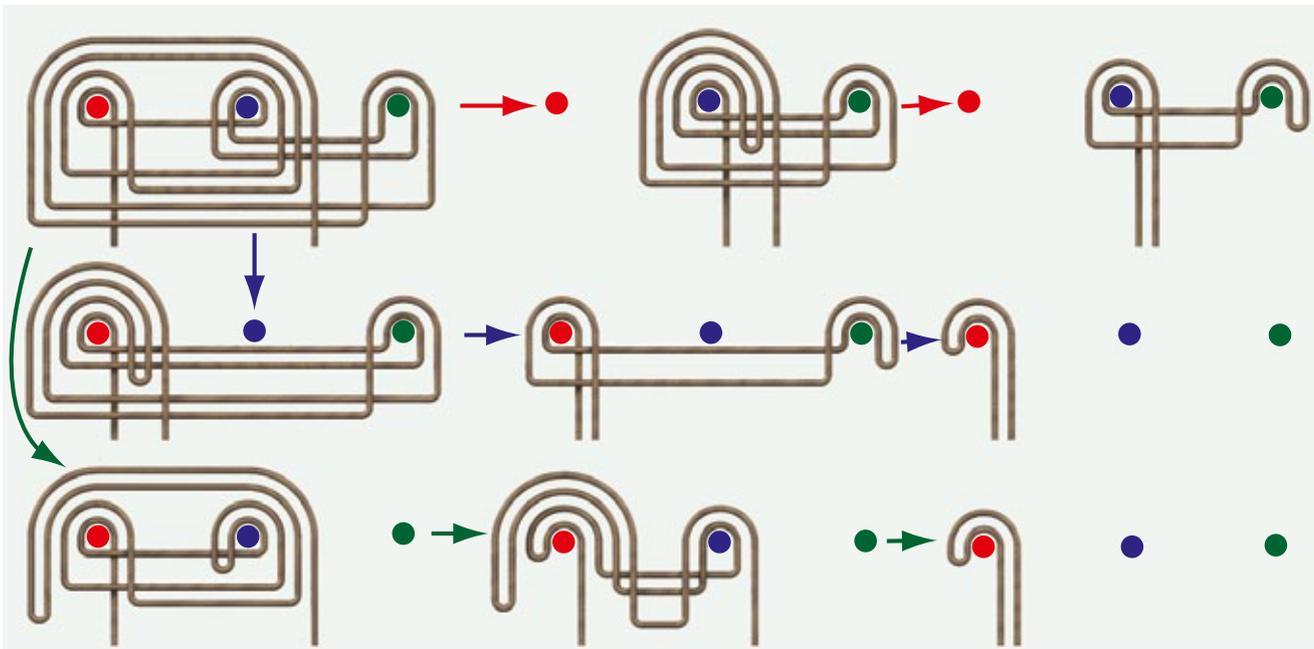
Man weise nun jedem Nagel, der in der Wand steckt, ein erzeugendes Element einer freien Gruppe zu. Unsere Buchstaben  $x$ ,  $y$  und  $z$  vertreten also drei Nägel. Dann folgen wir dem Weg der Schnur von einem Ende zum anderen und schreiben ein  $x$ , wenn sie den Nagel  $x$  im Uhrzeigersinn umläuft, und ein  $x'$ , wenn sie es gegen den Uhrzeigersinn tut. Ebenso verfahren wir für  $y$  und  $z$ . Über diese Vorschrift entspricht jedem Element der freien Gruppe ein Schnurweg und umgekehrt. Wenn die Schnur erst rechtsherum um Nagel  $x$  läuft und unmittelbar darauf linksherum um denselben Nagel, dann kann man sie stramm ziehen, und sie läuft überhaupt nicht mehr um Nagel  $x$ . Das entspricht der Gleichung  $xx' = 1$ , oder allgemeiner: Aus jedem Wort der freien Gruppe darf man Paare wie  $xx'$ ,  $x'x$  und so weiter streichen.

Auf diese Weise kann man bequem ausrechnen, ob die Schnur, so wie sie um die Nägel gelegt ist, das Bild hält oder nicht. Man übersetze ihren Weg in die entsprechende Folge der Symbole  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  und vereinfache diese so weit wie möglich. Wenn am Ende nichts von dem ganzen Ausdruck übrig bleibt, fällt das Bild, und es handelt sich um eine Podger-Aufhängung. Anderenfalls sagen einem die verbleibenden Symbole, welche Nägel das Bild halten.

Damit haben wir das Rüstzeug beisammen, um das allgemeine  $n$ -Nägel-Problem in ein nettes kleines algebraisches Problem zu verwandeln – und es zu lösen, ohne uns in irgendwelchen Schnüren zu verheddern. Was passiert, wenn wir die Schnur zum Beispiel nach der Vorschrift  $xy'xyx'zyz'x'$  um die drei Nägel gelegt haben und jetzt den Nagel  $y$  ziehen? Ganz einfach: Wir streichen alle  $y$  und  $y'$  aus dem Ausdruck und vereinfachen dann, so weit es geht (siehe Bild S. 65). Und schon ist das  $n$ -Nägel-Problem auf die symbolische Ebene transportiert worden. Dort lautet es: Finde ein Element der freien Gruppe mit den Erzeugenden  $x_1, x_2, \dots, x_n$  und der Eigenschaft, dass das Element selbst sich nicht zu 1 vereinfacht (das Bild also nicht von vornherein fällt), genau das aber geschieht, wenn man einen der Nägel zieht, das heißt eines der erzeugenden Elemente  $x_1, x_2, \dots, x_n$  gleich 1 setzt.

Für  $n=2$  ist die kürzeste Lösung nicht schwer zu finden und besteht aus vier Symbolen:  $xyx'y'$  (Bild links). Und da es nicht darauf ankommt, in welcher Reihenfolge man die Nägel mit Namen versieht oder ob man bei einem beliebigen Nagel konsequent rechts und links vertauscht, sind auch  $xy'x'y$ ,  $x'yxy'$ ,  $x'y'xy$ ,  $yx'y'x'$ ,  $y'xyx'$ ,  $yx'y'x$  und  $y'x'yx$  gleichwertige Lösungen. Es gibt unendlich viele weitere Möglichkeiten wie zum Beispiel  $xyyx'yx'y'y'y'$ ; aber die sind unnötig kompliziert.

Da man sich dank der Algebra nicht mit verhedderten Schnüren auseinandersetzen muss, findet man für  $n=3$  sogar durch Probieren eine Lösung. Ich bin auf  $x'y'zyxy'x'z'xy$  gekommen. Rechnen wir's nach (Bild rechts oben):



Bei dieser Verschlingung genügt es schon, wenn man einen der drei Nägel zieht, damit das Bild abstürzt.

- Nagel  $x$  gezogen:  $y'zy'z'y = y'zz'y = y'y = 1$ ,
- Nagel  $y$  gezogen:  $x'zxx'z'x = x'zz'x = x'x = 1$ ,
- Nagel  $z$  gezogen:  $x'y'yxy'x'xy = x'xy'x'xy = y'y = 1$ .

Für mehr als drei Nägel möchte man, bei aller Liebe zur Algebra, nicht mehr herumprobieren. Stattdessen verwendet man ein Induktionsprinzip. Man ersinnt ein Verfahren, das aus einer Lösung für  $n$  Nägel eine für  $n+1$  Nägel macht. Da die Lösung für zwei Nägel bekannt ist, kann man sie zur Grundlage nehmen und durch Anwendung des Verfahrens Lösungen für drei, vier, fünf ... Nägel finden.

So funktioniert das Rezept: Sei  $s$  eine Lösung für  $n$  Nägel. Wir nennen die Zeichenfolge, die  $s$  zum leeren Wort macht,  $s'$  (das »Inverse« von  $s$ ):  $ss' = 1$ . Wie findet man  $s'$ ? Man muss nur die Folge der Buchstaben in  $s$  umkehren und jedem Buchstaben einen Strich hinzufügen, mit der Maßgabe, dass zwei Striche sich gegenseitig auslöschten wie zwei Minuszeichen. So schreibt sich beispielsweise das Inverse von  $xyz'x'y$  als  $(xyz'x'y)' = y'xzy'x'$ . Wenn jetzt der Buchstabe  $z$  dem  $(n+1)$ -sten

Nagel entspricht, dann ist  $szs'z'$  eine Lösung des  $(n+1)$ -Nägel-Problems.

Warum? Wenn man unter den ersten  $n$  Buchstaben einen wegnimmt, dann wird  $s = 1$ , denn  $s$  war eine Lösung für  $n$  Nägel, ebenso wird  $s' = 1$ . Also bleibt  $zz'$ , was sich zu 1 vereinfacht. Lässt man  $z$  weg, so bleibt  $ss'$ , und das ist ebenfalls gleich 1. Was zu beweisen war.

Wenden wir dieses Verfahren auf die Lösung  $S_2 = xyx'y'$  des 2-Nägel-Problems an. Es gilt  $S_2' = yxy'x'$ , und daraus ergibt sich  $S_3 = S_2zS_2'z' = xyx'y'zyxy'x'z'$ . Das ist nicht die Lösung, die ich durch Probieren gefunden habe, aber sie hat immerhin die gleiche Länge. Das Verfahren findet Lösungen für alle  $n$ , aber das sind keineswegs die einzigen.

Der nächste Schritt macht aus  $S_3$  eine Lösung für vier Nägel:  $S_4 = S_3tS_3't' = xyx'y'zyxy'x'z'tzxyx'y'z'yxy'x't'$ .

Man kann sich zahlreiche weitere Aufhängungsprobleme ausdenken (»Zehn Probleme«, S. 68). Und die amerikanischen Forscher haben einen weitreichenden Satz bewiesen: Jede dieser Forderungen, die man überhaupt an eine Schnur stellen kann, ist erfüllbar.

Ein Beispiel: Wir wollen das Bild derart an fünf Nägel  $x, y, z, t$  und  $u$  hängen,

dass es genau dann fällt, wenn man  $x$  und  $y$  zieht oder  $x, z$  und  $t$  oder  $y, t$  und  $u$ . In allen anderen Fällen, das heißt wenn  $(x$  oder  $y)$  und  $(x$  oder  $z$  oder  $t)$  und  $(y$  oder  $t$  oder  $u)$  in der Wand bleiben, soll es hängen bleiben. Es hilft nichts, in dem letzten Satz, der genau die logische Verneinung der Bedingung fürs Hinfallen ist, muss man Klammern setzen, damit klar ist, in welcher Reihenfolge die logischen Operationen »und« und »oder« anzuwenden sind.

### Ein Universalschlingverfahren

Ist das möglich? Ja, und die sechs Forscher haben einen Algorithmus angegeben, mit dem man die Schnur so schlingt, dass alle Forderungen erfüllt werden. Das gilt allgemein für jede Bedingung, die sich in der »disjunktiven Normalform« ohne Negation schreiben lässt, das heißt als  $(x_i$  und  $x_j$  und  $x_k \dots)$  oder  $(x_l$  und  $x_m$  und  $x_p \dots)$  oder  $(x_q$  und  $x_r$  und  $x_s \dots)$  oder ... Hier tragen die Nägel die Namen  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , und in jeder Klammer darf man eine andere Auswahl aus dem Sortiment der Nummern treffen. (Selbstverständlich dürfen in einer Klammer auch nur ein oder zwei Nägel stehen.)

## Zehn Probleme

➤ Problem 1 (»1 von 3«): Das Bild fällt, wenn man einen der drei Nägel  $x_1, x_2, x_3$  zieht.

➤ Problem 2 (»2 von 3«): Das Bild fällt genau dann, wenn man beliebige zwei von drei Nägeln zieht.

➤ Problem 3 (»1 und 2«): Das Bild fällt, wenn man  $x_1$  oder  $x_2$  und  $x_3$  zusammen zieht, nicht aber, wenn man nur  $x_2$  oder  $x_3$  zieht.

➤ Problem 4 (»1 von 4«): Das Bild fällt, wenn man einen der vier Nägel  $x_1, x_2, x_3$  und  $x_4$  zieht.

➤ Problem 5 (»2 von 4«): ..., wenn man genau zwei der vier Nägel zieht.

➤ Problem 6 (»3 von 4«): ..., wenn man genau drei der vier Nägel zieht.

➤ Problem 7 (»2 + 2 von 2 + 2«): Das Bild hängt an zwei blauen und zwei roten Nägeln. Es fällt, wenn man beide blauen oder beide roten zieht, nicht aber, wenn man zwei verschiedenfarbige Nägel zieht.

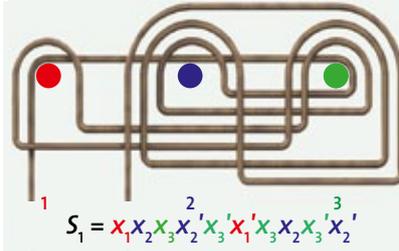
➤ Problem 8 (»1 + 2 von 2 + 2«): Das Bild fällt, wenn man beide roten oder einen blauen Nagel zieht. Es bleibt hängen, wenn man nur einen roten Nagel zieht und keinen blauen.

➤ Problem 9 (»1 + 3 von 3 + 3«): Das Bild hängt an drei blauen und drei roten Nägeln. Es fällt, wenn man einen blauen Nagel oder alle drei roten zieht. Es bleibt hängen, wenn man nur einen oder zwei rote zieht.

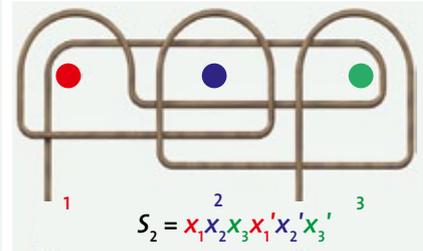
➤ Problem 10 (»1 + 2 von 3 + 3«): Das Bild fällt, wenn man einen blauen Nagel oder beliebige zwei rote zieht. Es bleibt hängen, wenn man nur einen roten Nagel und keinen blauen zieht.

In den nebenstehenden Lösungen bezeichnet  $[A, B]$  das Wort  $ABA'B'$ .

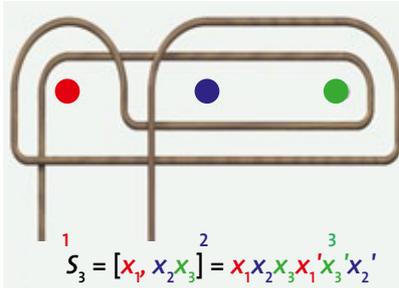
Problem 1



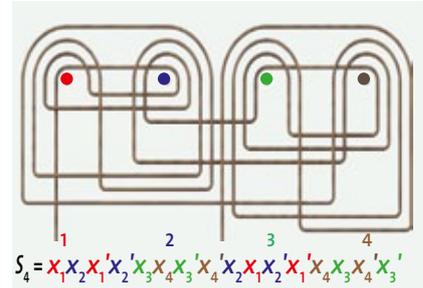
Problem 2



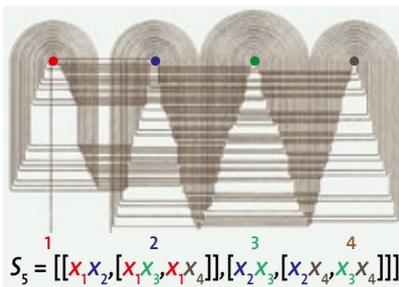
Problem 3



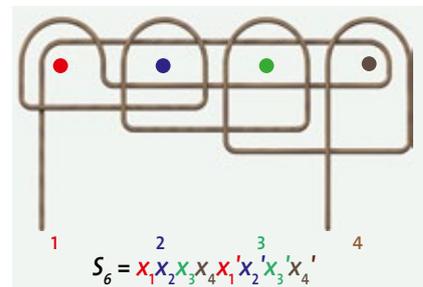
Problem 4



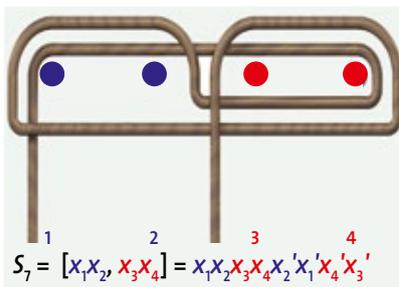
Problem 5



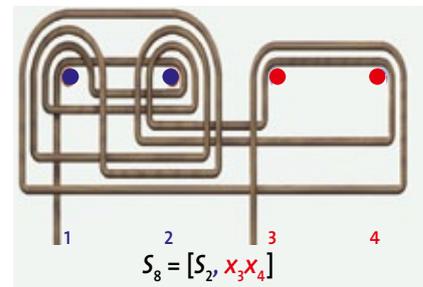
Problem 6



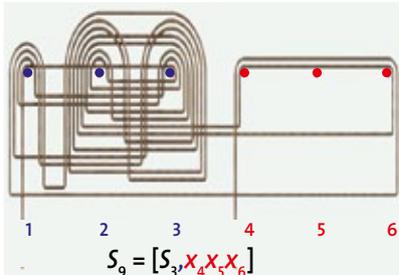
Problem 7



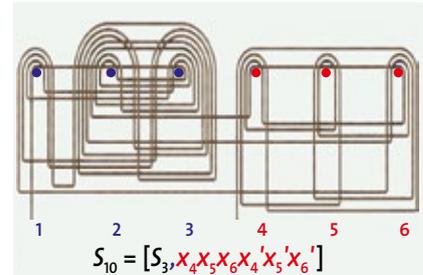
Problem 8



Problem 9



Problem 10



Offensichtlich kann man nicht alles verlangen. Es ist zum Beispiel unmöglich, die Schnur so zu winden, dass das Bild fällt, wenn man  $x$  zieht, nicht aber, wenn man  $x$  und  $y$  zieht. Diese so genannte Monotoniebedingung ist in der Tat hinreichend für die Existenz einer Lösung. Wenn also die Forderung monoton (mit anderen Worten: nicht offensichtlich absurd) ist, dann lässt sie sich in der disjunktiven Normalform ohne Negation schreiben und ist somit erfüllbar. Damit ist dieses mathematische Problem so schön erledigt, wie man es sich nur wünschen kann: In allen Fällen, wo man vernünftigerweise eine Lösung erwarten kann, gibt es eine, und sogar ein konstruktives Verfahren, um sie zu finden.

Ist damit das  $n$ -Nägel-Problem für die Mathematiker abgehakt? Keineswegs! Unterwegs sind neue Probleme aufgetaucht, die vor allem die algorithmische Komplexität des Lösungsverfahrens betreffen.

Einige von ihnen harren noch der Lösung. Zwei Beispiele:

► Wie viele Zeichen enthält eine kürzeste Lösung des klassischen  $n$ -Nägel-Problems (Ziehen eines beliebigen einzelnen Nagels befreit das Bild), und sind das weniger als  $n^2$  Zeichen?

► Gegeben ist eine (echte oder durch Symbole beschriebene) Schnur, die um  $n$  Nägel gewunden ist und das Bild hält. Wie findet man die kleinste Menge an Nägeln, deren Ziehen das Bild befreit? Gibt es insbesondere ein Verfahren, das wesentlich schneller zum Ziel kommt als stures Durchprobieren?

Wenn Sie demnächst eine Ausstellung zeitgenössischer Kunst besuchen und mit den Werken gar nichts anfangen können: Bewundern Sie statt der künstlerischen Leistung der Maler die der Mathematiker und malen Sie sich freudig aus, wie man durch eine ganz kleine Ursache – Ziehen eines einzigen Nagels – eine spektakuläre Wirkung erzielen könnte.  $\approx$

## DER AUTOR



**Jean-Paul Delahaye** ist Professor an der Université de Lille und forscht am Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (UFL).

## QUELLEN

**Demaine, E. et al.:** Picture-Hanging Puzzles. In: Proceedings of the 6th International Conference on Fun with Algorithms, FUN 2012, Venice, June 4–6, 2012. Lecture Notes in Computer Science 7288. Springer, Heidelberg 2012. Online unter <http://arxiv.org/pdf/1203.3602v2.pdf>

**Spivak, A.:** Brainteasers B 201: Strange Painting. In: Quantum, Mai/Juni 1997, S. 13

## WEBLINK

Dieser Artikel im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1323150](http://www.spektrum.de/artikel/1323150)

# WENN DER SCHUH EINMAL DRÜCKT: Spektrum RATGEBER

In unserer Digitalreihe **Spektrum RATGEBER** finden Sie wichtige Tipps zu Themen, die den Alltag betreffen – ob beruflich oder privat.



Ratgeber »Beruf und Karriere« (€ 4,99)



Ratgeber »Schule heute« (€ 3,99)

ALS PDF  
ZUM  
DOWNLOAD

Ebenfalls erschienen:



Ratgeber »Lernhilfen für Kinder« (€ 2,49)



Ratgeber »Kommunikation und Rhetorik« (€ 2,49)

Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:

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

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



Hier QR-Code per  
Smartphone scannen!

# Satellitengestützte Fossiliensuche

Bisher gehörte zum Auffinden bedeutender Fossilagerstätten eine gute Portion Glück. Doch nun könnte die Auswertung von Satellitenbildern bewirken, dass Kollege Zufall ein für alle Mal ausgedient hat.

Von Robert L. Anemone und Charles W. Emerson



ANDREW GEIGER

**A**n einem brütend heißen Tag im Juli 2009 holperte ein Pulk Geländewagen auf einer kaum erkennbaren Piste quer durch das Great Divide Basin, eine abflusslose Hochfläche im Südwesten des US-Bundesstaates Wyoming. Ziel der Expedition war ein Gebiet namens Salt Sage Draw, wo man wertvolle Fossilien zu finden hoffte, die aus der Zeit vor 55 bis 50 Millionen Jahren stammten. Damals, zu Beginn des Eozäns, begannen die Vorfahren vieler moderner Säugetierordnungen die urtümlicheren Formen aus dem Paläozän zu ersetzen. Ich (Anemone) hatte seit 1994 etliche Teams von Feldforschern – Anthropologen, Paläontologen, Geologen – in das Great Divide Basin geführt. Wie sich im Lauf der Jahre herausstellte, war Salt Sage Draw ein günstiger Ort für Fossilienjäger; es gab dort gleich mehrere Fundstätten. Diesmal hatte ich jedoch Schwierigkeiten, das Gebiet wiederzufinden. Allmählich wur-

de mir klar, dass die Piste nicht diejenige aus den vorangegangenen Jahren war. Irgendwie hatten wir uns verfahren.

Als sich die Reifenspuren immer mehr im Wüstensalbei und hohen Gras verloren, stoppte ich die Karawane und ging ein kurzes Stück zu Fuß, um zu schauen, ob ich den Fahrweg weiter vorn wieder deutlicher erspähen konnte. Nachdem ich um einen Hügel gebogen war, bemerkte ich ganz in der Nähe eine ausgedehnte Sandsteinbank und sah, dass die undeutliche Piste genau daran entlangführte. Da Sandsteine im Great Divide Basin und vielen weiteren Sedimentbecken im Westen der USA oft Fossilien führen, beschlossen wir, uns hier vor der Weiterfahrt noch ein wenig nach interessanten Versteinerungen umzusehen. Wir hatten etwa eine Stunde lang das Gestein systematisch auf Händen und Knien abgesehen, als meine Doktoranden Tim Held und Justin Gish riefen, sie seien auf ein paar hübsche Säugetierkiefer gestoßen.

Die Jagd nach Fossilien in einem so riesigen Areal wie dem hier abgebildeten Great Divide Basin im US-Staat Wyoming ähnelte lange der sprichwörtlichen Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen. Satellitendaten ermöglichen nun jedoch ein gezielteres Vorgehen.



ANDREW GEIGER

Gespannt eilte ich zu ihnen hinüber. Fossile Kiefer mit Zähnen sind begehrt. Denn sie bieten genügend Anhaltspunkte zur Identifikation der zugehörigen Tierart, selbst wenn andere Teile des Skeletts fehlen. Zudem verraten sie, wovon sich das Tier ernährt hat.

Was dann folgte, lässt sich nur als Traum jedes Paläontologen bezeichnen. Meine Studenten hatten ein wahres Fossilien-Eldorado aufgespürt: keine gewöhnliche Fundstelle mit einer Hand voll Kieferknochen oder einigen Dutzend Zähnen und Knochen, die aus dem Sandstein herausgewittert waren, sondern ein echter Fossilienchatz, aus dem wir inzwischen fast 500 gut erhaltene Kieferfragmente und einige tausend Zähne und Knochen bergen konnten. Sie stammen von über 20 verschiedenen Säugetierarten, die hier vor ungefähr 50 Millionen Jahren lebten. Wir taufte den Platz »Tim's Confession« (Tims Bekenntnis). Er ist nicht nur die ergiebigste Lagerstätte im Great Divide Basin, sondern der reichste Fundort von Säugetierfossilien aus dem frühen Eozän im gesamten Westen der USA.

Mein Team war keineswegs das erste, das mehr oder weniger zufällig einen größeren Fossilfund machte. In der Geschichte der Paläontologie gab es zahlreiche solche Glücksfälle. Genau genommen hat sich die Art und Weise, wie Wirbeltierpaläontologen versuchen, ergiebige Fossilagerstätten zu lokalisieren, seit den frühen Tagen unserer Wissenschaft kaum geändert. Wie die Pioniere im 19. Jahrhundert stützen wir uns immer noch auf geologische und topografische Anhaltspunkte bei der Suche nach Stellen, an denen durch Verwitterung und Erosion möglicherweise Fossilien aus alten Sedimenten an die Erdoberfläche gelangt sind. Im Übrigen hängt es weitgehend vom Zufall ab, ob wir Erfolg haben. Meist bleibt uns der Lohn für die harte Arbeit der Fossilien-suche versagt.

Nach unserer Erfahrung mit Tim's Confession überlegte ich, ob es nicht bessere Wege gäbe, herauszufinden, wo gute Aussichten bestanden, unbekannte Fossilagerstätten zu entdecken. Wir wussten, dass die uns interessierenden Überreste in 55 bis 50 Millionen Jahre alten Sandsteinen vorkommen. Auch war uns bekannt, in welchen Bereichen des Sedimentbeckens einige dieser Schichten zu Tage treten und

somit zugänglich sind. Zwar half uns das, das Suchgebiet einzuengen. Doch blieben nach wie vor Tausende von Quadratkilometern Landfläche zu erkunden, und die Wahrscheinlichkeit war groß, am Ende mit leeren Händen dazustehen.

Eines Nachts im Feldlager begann eine Idee in mir aufzu-keimen. Draußen im Gelände, weitab von jeder zivilisatorischen Lichtverschmutzung, beobachteten wir oft vorbeiziehende Satelliten. Ich fragte mich, ob sich deren Blick über die gesamte, 10000 Quadratkilometer große Region und unser Expertenwissen über die lokale Geologie, Topografie und Paläontologie des Great Divide Basin nicht irgendwie kombinieren ließe, um eine Karte der potenziellen Fossilfundstätten zu erstellen. Vielleicht konnten Satelliten Merkmale der Erdoberfläche erkennen, die dem menschlichen Auge verborgen blieben und die uns helfen würden, weitere frei liegende Sandsteinschichten zu entdecken und diejenigen mit zugänglichen Fossilien von den anderen zu unterscheiden.

### Augen am Himmel

Natürlich haben auch früher schon Paläontologen darüber spekuliert, ob Satellitenbilder das Auffinden von Fossilien im Gelände erleichtern könnten. Als Spezialist für die versteinerten Zeugnisse aus der Stammesgeschichte der Primaten und des Menschen wusste ich, dass Berhane Asfaw vom Rift Valley Research Service in Addis Abeba und seine Mitarbeiter in den 1990er Jahren Aufnahmen aus dem All benutzt hatten, um Gesteinsaufschlüsse in Äthiopien aufzuspüren, die Fossilien von Urahnen des Menschen enthalten könnten. Etwa zur selben Zeit gelang es Richard Stucky vom Denver Museum of Nature & Science, im fossilreichen Wind River Basin im Zentrum Wyomings durch Analyse von Satellitenbildern unterschiedliche Gesteinseinheiten zu identifizieren und zu kartieren. Beide Projekte beruhten auf der Zusammenarbeit zwischen Paläontologen und Fernerkundungsspezialisten der NASA und bewiesen den Wert solcher disziplinübergreifenden Kooperationen. Allerdings fragte ich mich, ob es möglich war, den Satellitenbildern noch mehr Informationen zu entnehmen, um die Suche effizienter zu gestalten.

Ich wandte mich an einen Geografen, den Koautor dieses Artikels (Emerson), und wir erarbeiteten gemeinsam einen Plan. Wir würden uns frei zugängliche Bilder des Great Divide Basin vom Satelliten Landsat 7 und seinem Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) beschaffen, der von der Erdoberfläche reflektierte oder emittierte Strahlung zwischen dem blauen und infraroten Wellenlängenbereich registriert und sie in acht separaten Spektralbändern abbildet. Diese Bänder erlauben es zum Beispiel, kahlen von vegetationsbedecktem Boden zu unterscheiden oder Minerallagerstätten zu kartieren. Dann wollten wir eine Methode entwickeln, mit der wir die Strahlungsprofile bekannter ergiebiger Fossilfundstätten im Great Divide Basin anhand der Satellitenbilder beschreiben und dabei feststellen könnten, ob sie eine charakteristische spektrale Signatur gemeinsam haben. Sollte das der Fall sein, würden wir das gesamte Sedimentbecken vom Computer nach Gebieten absuchen lassen, wel-

## AUF EINEN BLICK

### GPS FÜR FOSSILIENJÄGER

**1** Zwar nutzen Paläontologen seit mehr als einem Jahrhundert **geologische und topografische Anhaltspunkte** bei der Suche nach versteinerten Überresten einstiger Lebewesen. Dennoch hängt der Erfolg nach wie vor größtenteils vom Zufall ab.

**2** Um viel versprechende Fundstellen auszumachen, nutzen neue Computermodelle von Satelliten ermittelte **spektroskopische Daten**, die Informationen über die Bodenbeschaffenheit liefern. Das sollte Fossilienjägern helfen, die Suchgebiete einzugrenzen.

**3** Erste Tests solcher **Modelle** im Westen der USA ergaben, dass sie die Chancen, Fossilagerstätten aufzuspüren, in der Tat beträchtlich erhöhen.



che dieselbe Signatur aufweisen und daher mit großer Wahrscheinlichkeit ebenfalls Fossilien enthalten. Wir könnten dann an Ort und Stelle überprüfen, ob die Prognose stimmt.

Die Suche nach einer gemeinsamen spektralen Signatur unserer bekannten Fossilagerstätten war diffizil. Denn dazu mussten wir für jeden Fundort die Kombination von Werten in den sechs Bändern des von den Landsat-Satelliten aufgenommenen elektromagnetischen Spektrums prüfen. Das lief letztlich darauf hinaus, höherdimensionale Muster zu erkennen – eine Aufgabe, in der Menschen nicht besonders gut sind. Computern fällt sie hingegen leicht. Deshalb nahmen wir ein künstliches neuronales Netz zu Hilfe: einen Rechner, der auf Mustererkennung spezialisiert ist.

Wie sich herausstellte, haben die bekannten Fossilfundstätten im Great Divide Basin in der Tat eine spektrale Signatur gemeinsam. Unser neuronales Netz konnte diese Sandsteinvorkommen daher mühelos von anderen Bodenarten

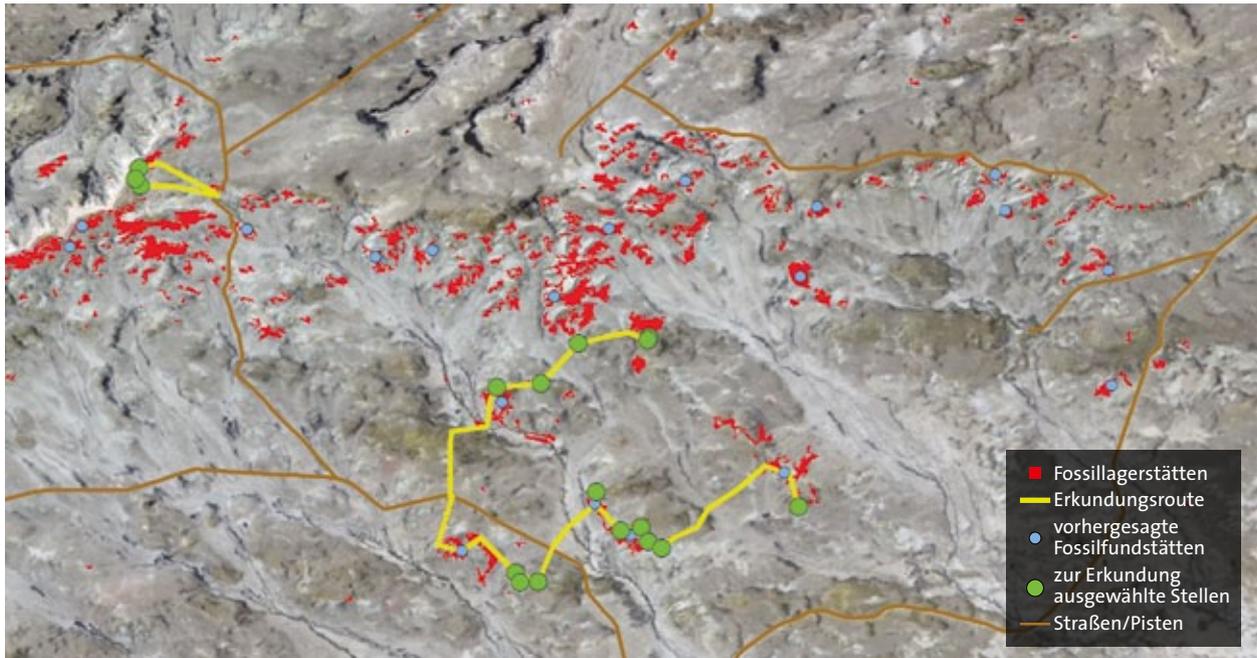
**Durch Zufall entdeckten Paläontologen 2009 im Great Divide Basin eine 50 Millionen Jahre alte Fossilagerstätte (links). Die Funde umfassten hunderte gut erhaltener Säugetierkiefer (oben). Mit Hilfe von Computermodellen konnte das Team seine Bemühungen inzwischen auf besonders viel versprechende Gebiete konzentrieren, darunter eine Gegend im Süden des erloschenen Vulkans Boar's Tusk (unten).**

wie Sumpfgebieten oder Sanddünen unterscheiden. Doch das nutzte uns erst einmal wenig. Neuronale Netze sind nämlich von Hause aus analytische »Black Boxes«: Sie können zwar Muster erkennen, aber nicht sagen, worin die entscheidenden Merkmale bestehen, die ein solches Muster ausmachen. Wie erfuhren also nicht, wie sich die charakteristischen Spektren verschiedener Landoberflächen tatsächlich in den sechs Bändern der Landsat-Daten unterscheiden –

## Schatzkarte für Paläontologen

**Computermodelle können aus Satellitenbildern** der bekannten Fossilfundstätten eines Gebiets deren charakteristisches Strahlungsprofil ermitteln und anschließend weitere Stellen in der Region identifizieren, die dasselbe Profil aufweisen und daher ebenfalls Fossilien bergen sollten. Eine auf diese Weise erstellte Karte mutmaßlicher Fundstätten (rot) im Great Di-

vide Basin diente den Autoren als Leitfaden beim Festlegen ihrer Erkundungsrouten (gelb) und bei der Auswahl der zu untersuchenden Stellen (blau). Dadurch konnten die beiden Forscher seit 2012 wesentlich mehr neue Fossilagerstätten (grün) aufspüren als bei vorhergehenden Expeditionen ohne eine solche Karte.



eine Information, die uns helfen würde, eine gezieltere Suche durchzuführen.

Ferner schränkt die Tatsache, dass das neuronale Netz nur einzelne Bildpunkte berücksichtigt, seine Verwendbarkeit ein. Die Größe eines Landsat-Pixels, der ein 225 Quadratmeter messendes Areal darstellt, entspricht leider nicht unbedingt der Ausdehnung einer Fossilagerstätte. Einige sind größer, andere kleiner. So stimmen die Vorhersagen des neuronalen Netzes über Ort und Ausdehnung potenzieller Fundorte (beziehungsweise einer bestimmten Art von Bodenbedeckung) nicht immer mit der Realität überein.

Um diese Begrenzung zu überwinden, musste es uns gelingen, benachbarte Pixel mit ähnlichem Spektrum gemeinsam zu analysieren und die charakteristische spektrale Signatur des gesamten Gebiets statistisch zu beschreiben. Wir griffen dazu auf die Methode der objektbasierten geografischen Bildanalyse zurück und wandten sie auf kommerziell erhältliche hochauflösende Satellitenbilder an, deren Pixel weniger als einen Quadratmeter messende Flächen repräsentieren. Mit diesem Verfahren lassen sich Satellitenaufnahmen in Bildobjekte – also in Gruppen von spektral homogenen Pixeln – zerlegen und diese dann durch statistische Parameter wie die mittlere Helligkeit oder die Textur charakterisieren. Solche Bildobjekte stimmen genauer mit interessanten Stellen am Boden überein, etwa mit Fossilagerstätten oder Waldflächen. Das ermöglicht ebenfalls Vorhersagen darüber, wo Fossilien zu finden sein sollten.

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

Unser Online-Dossier zum Thema »Fossilien – Spuren der Vergangenheit« finden Sie unter [www.spektrum.de/t/fossilien](http://www.spektrum.de/t/fossilien)



FRY, E., TISCHLINGER, H., PLOS ONE 7, E31945, 2012, FIG. 1B

trieren, die beide Modelle als besonders aussichtsreiche Fundstätten eingestuft hatten. Mit den Karten in der Hand fuhren wir in den Sommern 2012 und 2013 nach Wyoming, um zu sehen, wie zuverlässig die Prognosen waren.

Wir wurden nicht enttäuscht. Das künstliche neuronale Netz erwies sich als äußerst treffsicher beim Aufspüren von frei liegenden Sandsteinschichten. Diese sind fast immer eine Untersuchung wert, da im Great Divide Basin viele von ihnen Wirbeltierfossilien enthalten. Eines der ersten Sandsteinvorkommen, das wir im Juli 2012 erkundeten, lieferte gleich ein Dutzend Fossilien typischer Säugetiere des Eozäns, darunter das Urpferd *Hyracotherium*, den frühen Primaten *Cantius* und verschiedene andere Mitglieder der ausgestorbenen Gruppe der Condylarthra (Stammhuftiere). Das neuronale Netz führte uns auch zu einigen Lagerstätten mit Fossilien von wasserbewohnenden Wirbeltieren, darunter Fischen, Krokodilen und Schildkröten.

Das objektbasierte geografische Analysemodell leitete uns ebenfalls zu neuen Fundstellen. Nach einem Fehlstart – die ersten drei oder vier Stätten entpuppten sich als Nietenkonzentrierten wir uns auf den Nordteil des Great Divide Basin nahe einer Lokalität namens Freighter Gap, um unsere neue Fossilsuchmethode acht Tage lang intensiv zu testen. Der Doktorand Bryan Bommersbach, der uns noch eine Woche zuvor auf einem langen Geländemarsch zu einer Stelle geführt hatte, an der nichts zu finden war – wir taufte sie »Bryan's Folly« (Bryans Torheit) –, übernahm die Auswahl der Gebiete, die wir auf Grund der Modellvorhersagen absuchen würden. Fast sofort stießen wir vielerorts auf Fossilien. Wir suchten an 31 verschiedenen Plätzen, die unser Modell als vom Spektrum her vergleichbar mit bekannten Fundorten eingestuft hatte, und entdeckten an 25 von ihnen Wirbeltierreste. Das ist eine viel höhere Trefferquote als bei der herkömmlichen Suche. Zehn dieser Plätze bargen Fossilien von Säugetieren, wobei eine Fundstätte aus dem späten Paläozän datiert – ein extrem seltener Glücksfall.

Ähnliche Vorhersagemodelle wie die von uns entwickelten sollten auch außerhalb des Great Divide Basin funktionieren. Wo immer Satellitenbilder vorliegen und eine Hand voll Fossilfundorte zur Eichung bekannt sind, lässt sich eine maßgeschneiderte Karte erstellen, die wahrscheinliche Lagerstätten zeigt.

Versuchsweise testeten wir, ob unser neuronales Netz, das ja speziell für das Great Divide Basin entwickelt und geeicht war, auch im nahe gelegenen Bison Basin, das versteinerte Überreste von Säugetieren aus dem zeitlich späteren Paläozän enthält, die dort bereits bekannten Positionen fossilführender Sedimentablagerungen finden würde. Zu unserer Freude identifizierte es tatsächlich die drei ergiebigsten Fundorte. Hätten die Forscherteams, die dieses riesige Gebiet in der Vergangenheit erkundeten, schon unser Vorhersage-

modell zur Verfügung gehabt, wären sie also viel schneller fündig geworden.

Wir selbst steigerten bei unseren Kampagnen 2012 und 2013 dank der Auswertung von Satellitenbildern mit Computerhilfe die Trefferquote erheblich: Wir entdeckten viel mehr Fossilien in kürzerer Zeit. Doch bleibt noch manches zu tun. Vor allem wollen wir unsere Modelle verfeinern, damit sie die

spektrale Signatur ergiebiger Fundstätten differenzierter erfassen. Und wir arbeiten daran, mehr einschränkende Bedingungen in unsere Vorhersagemodelle einzuarbeiten, um die Zahl falsch posi-

tiver Resultate bei den erstellten Karten zu verringern, so dass sie wirklich nur die aussichtsreichsten Gebiete anzeigen.

Dieses neue Instrumentarium wird, davon sind wir überzeugt, die Zukunft der paläontologischen Exploration auf solidere und wissenschaftlichere Füße stellen und dafür sorgen, dass das Glück bei bedeutenden Fossilfunden keine maßgebliche Rolle mehr spielt. Dieses Ziel lohnt den Aufwand. Schließlich ist die Aufgabe, die wechselvolle Geschichte des irdischen Lebens aufzudecken, viel zu interessant und wichtig, um sie den Launen des Zufalls zu überlassen. Wir können es uns einfach nicht leisten, weitere 15 Jahre warten zu müssen, um wieder eine Stätte wie »Tim's Confession« zu finden. ~

## Dank der Auswertung von Satellitenbildern per Computer entdeckten wir deutlich mehr Fossilien

### DIE AUTOREN



**Robert L. Anemone** (links) leitet die Abteilung für biologische Anthropologie und Paläoanthropologie an der University of North Carolina in Greensboro. Als Paläontologe, der sich für die Evolution der Primaten interessiert, hat er Gelände-

arbeiten in Wyoming, Montana, Kenia und Südafrika geleitet. **Charles W. Emerson** ist außerordentlicher Professor für Geografie an der Western Michigan University in Kalamazoo. Neben seiner Mitwirkung beim Erstellen von Vorhersagekarten für die Fossilienuche ist er an einem Projekt beteiligt, das Satellitenbilder heranzieht, um die Produktivität von Reisfeldern in einem Landgewinnungsprojekt an der Küste Südkoreas zu überwachen.

### QUELLEN

**Anemone, R.L. et al.:** GIS and Paleoanthropology: Incorporating New Approaches from the Geospatial Sciences in the Analysis of Primate and Human Evolution. In: *American Journal of Physical Anthropology* 146, Supplement 553, S. 19–46, 2011

**Anemone, R.L. et al.:** Finding Fossils in New Ways: An Artificial Neural Network Approach to Predicting the Location of Productive Fossil Locations. In: *Evolutionary Anthropology* 20, S. 169–180, 2011

**Emerson, Ch.W., Anemone, R.L.:** An Artificial Neural Network-Based Approach to Identifying Mammalian Fossil Localities in the Great Divide Basin, Wyoming. In: *Remote Sensing Letters* 3, S. 453–460, 2012

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323156](http://www.spektrum.de/artikel/1323156)

# Die simulierte Zelle

Erstmals ist es gelungen, ein vollständiges Computermodell eines einzelligen Organismus zu erstellen. Das bietet einen neuen, überaus aufschlussreichen Einblick in die Mechanismen des Lebens und weist zudem den Weg zu innovativen Methoden der Krankheitsbekämpfung.

Von Markus W. Covert

Die Eingebung kam mir auf dem Fahrrad, am Valentinstag 2008. Während ich gemütlich von der Arbeit nach Hause radelte, brütete ich über einem Problem, das mich und viele Fachkollegen seit über einem Jahrzehnt beschäftigte: Könnten wir das Getriebe des Lebens – mit all seiner bewundernswerten, geheimnisvollen und Schwindel erregend komplexen Biochemie – mit dem Computer simulieren?

Unter dieser »Simulation des Lebens« verstehen wir ein Computerprogramm, das die Vorgänge in einer lebenden Zelle originalgetreu nachbildet – allen voran Ernährung, Wachstum und Fortpflanzung. Das Modell arbeitet dann kor-

rekt, wenn es das gleiche Verhalten zeigt wie das natürliche Vorbild, insbesondere im zeitlichen Ablauf.

Schon ein lückenhaftes und ungenaues Modell würde die Biologie gewaltig voranbringen und ganz neue Perspektiven eröffnen: Wissenschaftler probieren die Ideen für ihre Experimente »im Trockenen« aus, bevor sie viel Zeit und Geld auf »nasse« Laborversuche verwenden. Arzneimittelentwickler setzen probeweise gewisse Moleküle außer Funktion und machen so diejenigen ausfindig, deren Ausfall der Bakterienzelle am meisten schadet. Im Labor konzentrieren sie sich dann auf Medikamente, die genau diese Moleküle hemmen, und lassen alle anderen außer Acht. Bioingenieure wie ich betreiben



Gentechnik am Modell und stellen dadurch simulierte Mikroorganismen mit speziellen Eigenschaften her, zum Beispiel solche, die aufleuchten, wenn sie mit einem gewissen Virus infiziert werden, oder Bakterien, die Wasserstoff aus Erdöl herstellen können. Das ist nicht nur einfacher als echte Gentechnik, sondern auch risikoärmer: Simulierte Bakterien können nicht in die Umwelt entweichen. Und eines Tages können wir sogar ganze menschliche Zellen nachbilden und revolutionieren damit die medizinische Forschung. Denn viele Studien scheitern heute daran, dass manche Arten natürlicher menschlicher Zellen nicht kultiviert werden können.

Alle diese Anwendungen bleiben jedoch Luftschlöser, solange wir keinen Weg finden, das Geflecht aus chemischen Reaktionen und räumlichen Bewegungen zu entwirren, das dem Leben jeder Zelle zu Grunde liegt. Viele Arbeitsgruppen, darunter auch mein Labor an der Stanford University, hatten sich daran versucht, aber alle waren an einem gewissen Punkt stecken geblieben oder gänzlich gescheitert.

Als ich an jenem Valentinstag durch das Universitätsgelände radelte, ging mir meine aktuelle Arbeit durch den Kopf, bei der es darum ging, Mikroskopbilder und -videos von einzelnen lebenden Zellen zu verarbeiten. Da traf mich wie ein Blitz die Idee zur Simulation des Lebens: ganz klein anfangen! Knöpfen wir uns zunächst den primitivsten Organismus vor, über den es genügend Daten gibt – ein Bakterium namens *Mycoplasma genitalium* –, und beschränken uns auf eine einzige Zelle. Diese Vereinfachung könnte uns in die Lage verset-

## AUF EINEN BLICK

### EIN GANZES BAKTERIUM IM RECHNER

**1** Das **Computermodell** des Autors gibt das Leben eines Einzellers wieder – bis auf jedes einzelne Gen und die Menge jedes Moleküls genau.

**2** Selbst im **gegenwärtigen, noch unvollkommenen Zustand** liefert es überraschende Details, die am echten Bakterium nicht zu finden wären.

**3** Nach diesem ersten Erfolg wollen die Forscher **kompliziertere Strukturen modellieren**, bis hin zu menschlichen Körperzellen und ganzen Organen.

Damit eine Zelle sich teilt, muss sie nicht nur so groß werden, dass sie ihren Töchtern genügend Masse mitgeben kann, sondern ihr gesamtes Inventar einigermaßen gleichmäßig aufteilen. Ein Spindelapparat (zweites Bild) sorgt dafür, dass jede Tochterzelle von dem zuvor verdoppelten Chromosomensatz jeweils genau ein Exemplar bekommt.



ANDRE KUTSCHERAUER

## Zellmodellierung – Vergangenheit und Zukunft

### 20. Jahrhundert

**1967:** Francis Crick und Sydney Brenner formulieren das »Projekt K: die komplette Lösung von *Escherichia coli*« mit dem Ziel, den Bauplan des weit verbreiteten Darmbakteriums zu entschlüsseln, bis in die Einzelheiten seiner Genetik, Energieverarbeitung und Fortpflanzung.

**1984:** Harold Morowitz, damals an der Yale University, entwirft einen Plan, wie das Genom eines Bakteriums der Gattung *Mycoplasma* zu sequenzieren und daraufhin der gesamte Organismus zu modellieren sei.

**1984:** Ein Team unter Michael Shuler von der Cornell University beschreibt in einem Computermodell mit Hilfe von Differenzialgleichungen die meisten biologischen Prozesse, die am Wachstum einer einzelnen Zelle von *Escherichia coli* beteiligt sind – mit

Ausnahme der Genaktivität, denn das Erbgut des Bakteriums ist zu dieser Zeit noch nicht sequenziert.

**1989–1990:** Bernhard Palsson von der University of Michigan veröffentlicht ein umfassendes Modell für den Stoffwechsel menschlicher roter Blutkörperchen, das den pH-Wert und den Glukosegehalt des Blutes mit einbezieht.

**1995:** J. Craig Venter vom TIGR (The Institute for Genomic Research) und seine Kollegen veröffentlichen die vollständige Genomsequenz von *Mycoplasma genitalium*.

**1999:** Masaru Tomita und sein Team von der Keio University in Japan erstellen den Zellsimulator E-Cell, der auf Differenzialgleichungen beruht und 127 Gene enthält (die meisten sind von *M. genitalium*).

### 21. Jahrhundert

**2002:** Die Alliance for Cellular Signaling, ein Zusammenschluss von ungefähr 50 Wissenschaftlern, ruft ein ehrgeiziges Projekt mit zehn Jahren Laufzeit und zehn Millionen Dollar Fördermitteln ins Leben, das Mäusezellen modellieren will: B-Zellen des Immunsystems und Herzmuskelzellen. Das Projekt erzeugt einige überaus interessante Daten, aber die Manipulation von B-Zellen in einer Zellkultur stößt auf große Schwierigkeiten.

**2002:** Palsson, George Church von der Harvard University, Markus W. Covert und einige andere erstellen ein Modell von *Helicobacter pylori*, einem Bakterium, das beim Menschen Magengeschwüre und Magenkrebs auslösen kann.

**2004:** Palsson, Covert und drei weitere Wissenschaftler veröffentlichen ein Computermodell der 1010 Gene, die den Stoffwechsel und die DNA-Transkription von *E. coli* steuern. Sie zeigen, dass das Modell exakt die gleichen Ergebnisse liefert wie Laborexperimente an echten Bakterien.

**2012:** Covert und seine Mitarbeiter veröffentlichen das Computermodell einer ganzen Zelle von *M. genitalium*. Dieses simuliert erstmalig alle Gene und bekannten biochemischen Prozesse in einem ungeschlechtlichen Organismus.

**2013:** Covert und sein Team zeigen, dass ihr Modell die Aktivität mehrerer Enzyme genau vorhersagt.

zen, jeden bekannten biologischen Mechanismus in dieser Zelle nachzuvollziehen, und zwar bis in die Einzelheiten: wie sich der zur Schraubenlinie aufgewickelte Strang der DNA an gewissen Stellen öffnet, so dass dieses Stück in RNA übersetzt (»transkribiert«) wird; wie die Ribosomen nach der Vorlage dieser RNA Proteine synthetisieren; wie diese und alle anderen Akteure innerhalb der Zelle zusammenwirken; und wie daraufhin die Zelle wächst und sich schließlich teilt. Kurzum – ein ganzes Einzellerleben als Computeranimation.

Bisherige Simulationen hatten immer eine ganze Zellkolonie zum Gegenstand; denn fast alle Daten über das Verhalten echter Zellen stammen nicht von einzelnen Exemplaren, sondern von Populationen. Inzwischen kann man allerdings durch Fortschritte in der Biotechnologie und rechenstärkere Computer wesentlich besser mit einzelnen Zellen arbeiten. Mir wurde bewusst: Jetzt war das Werkzeug beisammen, um einen neuen Ansatz auszuprobieren.

Diese Gedanken schwirrten in meinem Kopf herum. Kaum war ich zu Hause, brachte ich meine ersten Ideen zu Papier. Am nächsten Morgen begann ich, Programmcode zu schreiben – erst einmal nur für zwei biologische Prozesse. Innerhalb einer Woche hatte ich ein paar Prototypen fertiggestellt, deren jeder einen bestimmten zellulären Vorgang

nachbildete. Was die an Ergebnissen lieferten, kam dem natürlichen Vorbild schon ziemlich nahe.

Ich zeigte meine Arbeit einigen anderen Biologen. Die meisten von ihnen hielten mich für komplett verrückt. Aber ich spürte, dass ich einer großen Sache auf der Spur war. Zwei außergewöhnlichen Masterstudenten, Jonathan R. Karr und Jayodita C. Sanghvi, ging es anscheinend ähnlich: Sie sahen genug Potenzial in meiner Herangehensweise und ließen sich auf eine Zusammenarbeit mit mir ein.

### Rückgriff auf die Vordenker

Die Aufgabe schien immens. Für das Modell von *M. genitalium* würden wir Dutzende dieser Module brauchen: für jeden biologischen Prozess einen Programmbaustein. Und in jedem von ihnen stecken zahlreiche Parameter, für die wir die richtigen Werte finden mussten: Wie stark binden sich Enzyme an ihre Zielmoleküle? Wie oft schubsen die Proteine sich gegenseitig von dem DNA-Strang, den sie gerade ablesen? Dazu müssten wir um die 1000 wissenschaftliche Veröffentlichungen nach Daten durchforsten, was selbst mit einer großen, motivierten Arbeitsgruppe Jahre in Anspruch nähme.

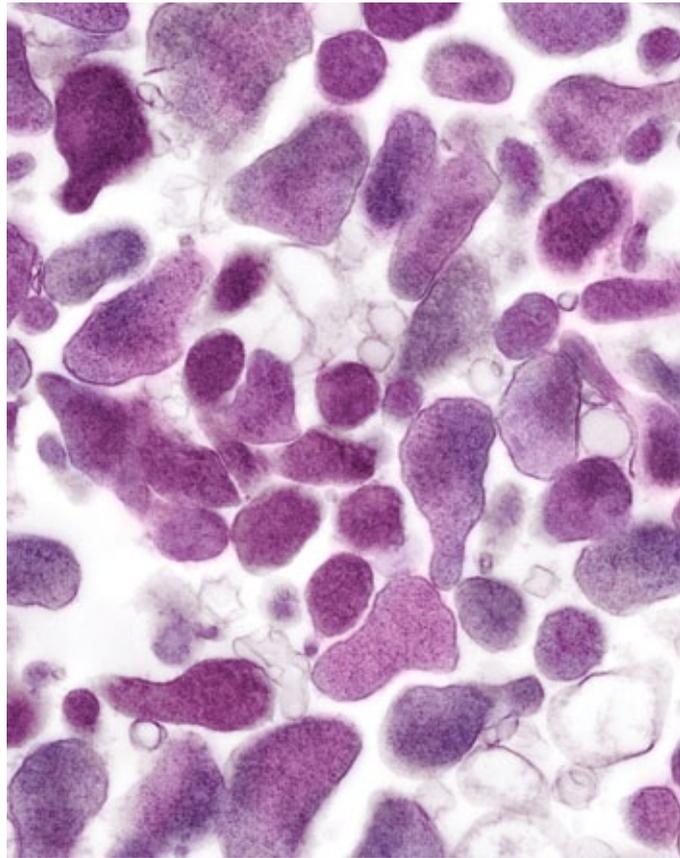
Bevor wir uns auf den langen Weg machten, holten wir uns Inspiration von einigen Vordenkern. Schon 1984 hatte der

### Zukunftsaussichten

Fernziel ist ein Computermodell einer menschlichen Zelle. Aber dafür ist nicht nur ungefähr die 40-fache Anzahl an Genen zu bewältigen; diese sind auch in Chromosomen mit viel komplizierteren Strukturen und Ablesemechanismen verpackt. Der Weg dorthin führt über einige Zwischenschritte:

- ▶ ein Modell einer ganzen Zelle für ein typischeres, besser untersuchtes Bakterium erstellen wie etwa *E. coli*;
- ▶ einen Eukaryoten (Einzeller mit Zellkern) modellieren, beispielsweise die Hefe *Saccharomyces cerevisiae*. In einem Eukaryoten befindet sich die DNA in einem membranumhüllten Zellkern statt wie in einem Bakterium frei im Zellplasma;
- ▶ ein Modell einer Tierzelle konstruieren, die einfach zu kultivieren ist, etwa ein Makrophage (eine Immunzelle) einer Maus;
- ▶ den ersten Entwurf einer modellierten menschlichen Zelle formulieren – wahrscheinlich wieder ein Makrophage;
- ▶ andere Arten menschlicher Zellen simulieren, vor allem solche, die eine wichtige Rolle bei verbreiteten Krankheiten spielen.

Das Bakterium *Mycoplasma genitalium* ist vermutlich die einfachste überhaupt mögliche Lebensform. Gleichwohl war es alles andere als einfach, seinen Lebenszyklus nachzubilden.



Biophysiker Harold Morowitz, damals an der Yale University, den Ausgangspunkt vorgegeben: Man fange mit den primitivsten Bakterien an, die ein Biologe kultivieren kann. Das sind eben die Mykoplasmen – sehr kleine Bakterien ohne Zellwände. Zwei Arten können bei Menschen Krankheiten auslösen: der sexuell übertragbare Parasit *Mycoplasma genitalium*, der den Vaginal- und den Harntrakt besiedelt, und *Mycoplasma pneumoniae*, der Erreger der so genannten atypischen Lungenentzündung. Ein Modell einer dieser Bakterienarten könnte also über den allgemeinen biologischen Erkenntnisgewinn hinaus unmittelbar medizinischen Nutzen abwerfen.

Zuallererst, so Morowitz, sei das Genom eines der beiden Mykoplasmen zu sequenzieren. Das gelang 1995 Craig Venter in seinem Institute for Genome Research für *Mycoplasma genitalium*; es besitzt nur 525 Gene. Menschliche Zellen hingegen haben deren mehr als 20 000.

Ich befand mich in meinem Masterstudium in San Diego, als Venters Team 1999 mit der Behauptung aufwartete, nur etwa 400 dieser 525 Gene seien überlebenswichtig – vorausgesetzt, die Mikroben werden in einer reichhaltigen Nährlösung gezüchtet. Wenig später gründeten Venter und seine Mitarbeiter das Unternehmen Celera, das die DNA-Sequenzierung kommerziell vorantrieb und sich mit dem offiziellen

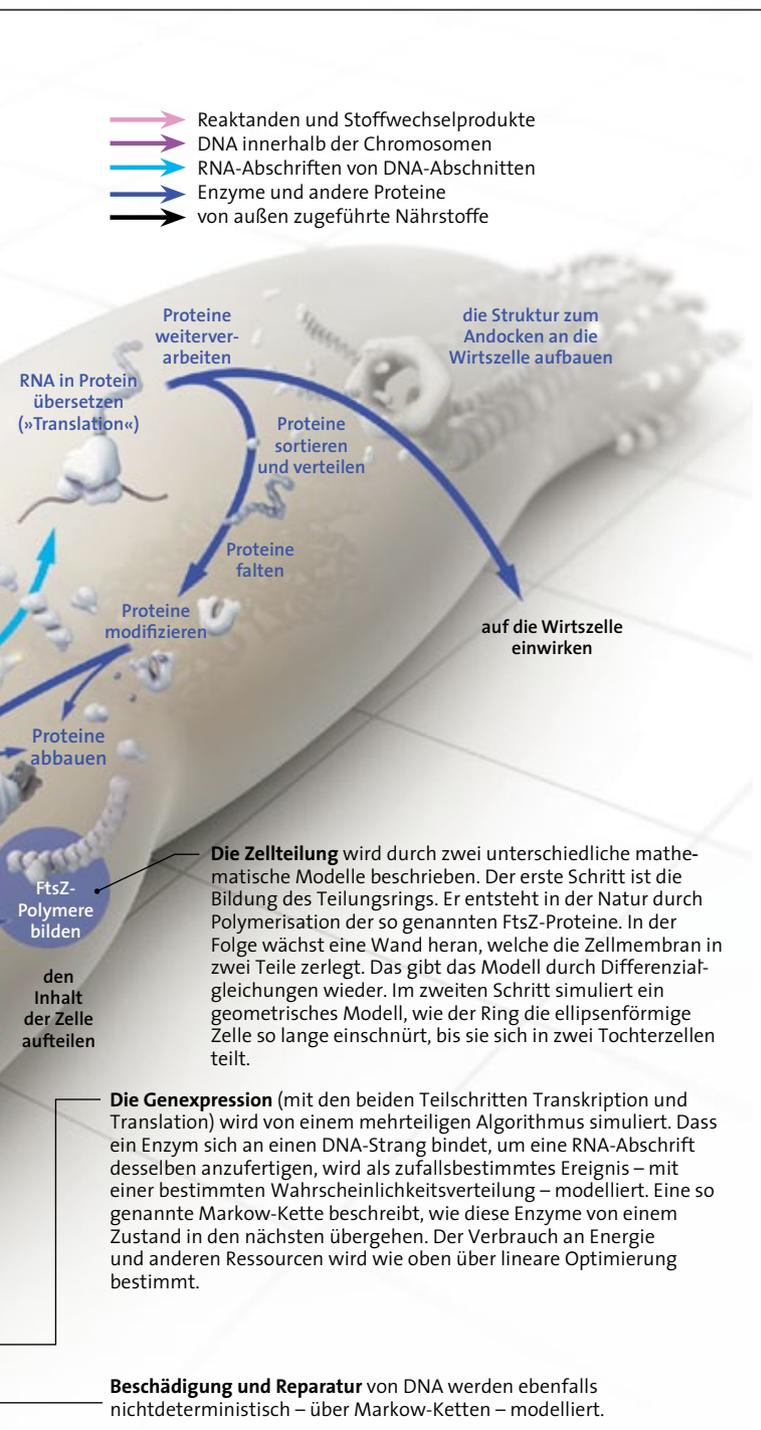
Human Genome Project ein Wettrennen um die Sequenzierung des menschlichen Genoms lieferte. Sie stellten die 400 essenziellen Gene einer *Mycoplasma*-Art künstlich her und zeigten, dass sie in einer Zelle funktionierten.

Auf mich und viele andere junge Biologen in den späten 1990er Jahren wirkten Venter und seine Leute wie Led Zeppelin 30 Jahre zuvor: Rebellen, die Musik spielten, die wir noch nie zuvor gehört hatten. Clyde Hutchinson, einer der Biologen in Venters »Band«, spielte die Leistung seiner Gruppe sogar noch herunter: Es sei durchaus möglich, eine funktionierende Zelle im Labor herzustellen, ohne in allen Einzelheiten zu verstehen, wie die einzelnen Teile zusammenpassen. Bei Software gehe das jedoch nicht. Erst wer eine Zelle in einem Computer simulieren könne, habe sie richtig verstanden.

Auch Morowitz hielt einen Zellsimulator auf Basis des Genoms von *Mycoplasma* für machbar: »Jedes Experiment, das im Labor durchführbar ist, kann auch auf dem Computer simuliert werden. Wie gut die Ergebnisse beider Methoden zusammenpassen, zeigt uns, wie vollständig unser Verständnis der Molekularbiologie ist.« Mit anderen Worten: Wo es nicht zusammenpasst, zeigen sich die Löcher in unserer Theorie.

Inzwischen können wir DNA-Sequenzen in kürzester Zeit auswerten – teilweise unterstützt durch Roboter. Dies alles





AXS BIO MEDICAL ANIMATION STUDIO/MACH KARR, JR. ET AL. A WHOLE-CELL COMPUTATIONAL MODEL PREDICTS PHENOTYPE FROM GENOTYPE IN CELL 150, S. 389-401, 2012

stecken Reaktionsraten und andere biochemische Kennzahlen, die durch Laborexperimente bestimmt werden müssen.

Sobald sich Computermodelle als funktionierend erweisen, kehrt sich der Informationsfluss um. Die Simulation verlangt nicht nach Experimenten, sondern spart sie ein. Die Zeit und Geld fressende Arbeit im Labor beschränkt sich auf jene Fragen, auf die auch die Simulation keine Antwort weiß. Überraschende Ergebnisse aus der nachgemachten Zelle lenken die Forschung am echten Objekt in neue, aussichtsreiche Richtungen, was wiederum den wissenschaftlichen Fortschritt vorantreibt. Einer der herausragenden Vorteile der Modelle: Da wir deren Parameter selbst bestimmen, können wir zwischen Ursache und Wirkung unterscheiden. Wegen dieser scheinbar grenzenlosen Möglichkeiten nennt der Molekularbiologe Masaru Tomita von der Keio University in Japan Simulatoren ganzer Zellen »eine große Herausforderung des 21. Jahrhunderts«.

Bereits als Masterstudent war ich beeindruckt von den ersten Zellmodellen der damaligen Zeit (Kasten S. 78/79). Die »große Herausforderung« ergriff Besitz von mir und ließ mich nicht los, selbst als ich längst mein eigenes Labor aufgebaut und mich anderweitig spezialisiert hatte – auf bildgebende Verfahren für einzelne Zellen. Und dann, auf jener Radfahrt im Februar, erkannte ich, wie ich sie angehen konnte.

### Der entscheidende Trick: Nur eine Zelle nachbauen

Um den Lebenszyklus eines Einzellers genau genug nachbilden zu können, mussten wir drei Probleme lösen: Erstens hatten wir all seine wichtigen Lebensfunktionen in mathematischen Formeln und Softwarealgorithmen auszudrücken – vom Stoffwechsel einschließlich der Bilanzen von Energie, Nährstoffen und Reaktionsprodukten über Synthese und Abbau von DNA, RNA und Proteinen bis hin zur Aktivierung der unzähligen Enzyme. Zweitens mussten wir einen umfassenden Rahmen entwickeln, in den alle diese Funktionen einzupassen waren. Das dritte Problem war in vieler Hinsicht das schwierigste: Für jeden der reichlich 1700 Parameter in dem Modell mussten wir einen Wert finden, der dem biologischen Vorbild entsprach – oder zumindest in der richtigen Größenordnung lag.

Auf der Suche nach diesen Werten für *Mycoplasma genitalium* haben Karr, Sanghvi und ich über 900 Veröffentlichungen ausgewertet, was volle zwei Jahre in Anspruch nahm. Aber am Ende blieb uns nichts anderes übrig, als für manche Parameter plausible Schätzwerte einzusetzen oder auf Ergebnisse von Experimenten mit anderen Mikroorganismen wie *Escherichia coli* zurückzugreifen. Das gilt zum Beispiel für die durchschnittliche Zeit, die ein Stück Boten-RNA aktiv bleibt, bis Enzyme es in seine Einzelteile zerlegen.

Bei jenem Aha-Erlebnis im Jahr 2008 wurde mir klar, dass eine schlichte Einschränkung diese wilden Vermutungen präzisieren und damit das Mammutprojekt auf eine handhabbare Größe zurechtstutzen könnte: Man bildet eine einzige Zelle nach statt einer ganzen Ansammlung, wie es fast alle anderen Studien vorher getan hatten. Beispielsweise

würde man bei einer großen Zellpopulation Wachstum und Fortpflanzung einfach durch eine Differenzialgleichung für die Gesamtmasse modellieren. Ob eine der vielen Zellen sich teilt oder stirbt, ist dabei so belanglos, dass das Modell gewissermaßen gar keine Notiz davon nimmt. Für eine einzelne Zelle dagegen ist ihre Teilung ein im Wortsinn einschneidendes Ereignis. Sie muss dafür nicht nur ihre Gesamtmasse verdoppeln, sondern auch die Menge jedes einzelnen Bestandteils, von der DNA über alle Proteine bis hin zur Zellmembran. Hinzu kommt das komplizierte Zusammenspiel der Prozesse, die den Teilungsvorgang auslösen.

Wenn unser Modell nur eine einzige Zelle abbildet, kann der Computer die Anzahl der Moleküle aller Arten über den gesamten Lebenszyklus hinweg nachverfolgen. Wenn am Ende die Bilanzen stimmen, dann können die Parameter, die in das Modell eingehen, nicht völlig falsch gewesen sein.

Insofern ist unser Modell gröber als diejenigen, die Tilman Rudack, Juan Perilla und Klaus Schulten in dieser Zeitschrift beschrieben haben (SdW 11/2014, S.86). Wir versuchen nicht, die Einzelheiten jeder Reaktion zwischen großen Molekülen aufzuklären, sondern begnügen uns damit, Werte für die Geschwindigkeit dieser Reaktionen einzusetzen. Dafür betrachten wir um Größenordnungen mehr Molekülsorten.

Ein weiteres Faktum hilft uns bei der Suche nach den richtigen Parametern: Ein Einzeller vermehrt sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit. *M. genitalium* zum Beispiel teilt sich unter normalen Laborbedingungen in der Regel alle neun bis zehn Stunden. Reproduktionszeiten unter sechs oder über fünfzehn Stunden sind sehr selten. Damit lässt sich der Wertebereich für viele Parameter eingrenzen, die sonst unbestimmt wären, zum Beispiel die Menge an Molekülen, welche den Beginn der DNA-Replikation auslösen.

## 28 Module zusammenstöpseln

Ich stellte ein Team aus Physikern, Biologen und Programmierern zusammen – darunter ein ehemaliger Softwareentwickler von Google –, und wir berieten darüber, welchen mathematischen Ansatz wir nehmen sollten. Michael Shuler, ein Biomediziningenieur an der Cornell University und gleichzeitig Pionier der Zellsimulation, hatte mit Hilfe von gewöhnlichen Differenzialgleichungen beeindruckende Modelle programmiert. Bernhard Palsson, einer meiner Lehrer in San Diego, hatte eine mächtige Technik namens Flux-Balance Analysis entwickelt, die Stoffwechselprozesse akkurat nachbildet. Andere Wissenschaftler hatten dagegen entdeckt, dass der Zufall in der Gentranskription eine wichtige Rolle spielt, und Zellteilung geht offensichtlich mit einer Änderung der Geometrie einher; beides ist mit den oben genannten Verfahren nicht darstellbar. Bereits in meinem Masterstudium hatte ich begriffen, dass es die eine Methode, die alle Funktionen einer Zelle korrekt beschreibt, nicht gibt.

Vielmehr hatte ich in meiner Dissertation ein Verfahren beschrieben, das zwei verschiedene mathematische Methoden zu einem einheitlichen Simulator verknüpft.

Angesichts dieser Situation entschieden wir uns dafür, alle Funktionen unserer simulierten Zelle in 28 verschiedene Teilprogramme (»Module«) zu packen. Jedes von ihnen verwendet unabhängig von den anderen den Algorithmus, der am besten zum jeweiligen biologischen Prozess passt – und zu dem, was wir über ihn wissen (Kasten S. 80/81). Am Ende mussten wir dieses ganze Sammelsurium irgendwie zu einem Ganzen zusammenflicken.

Ich erinnerte mich an einen Kurs über den Bau von Chemieanlagen aus meinem Grundstudium. Für das Abschlussprojekt hatten wir eine große Raffinerie mit Hilfe eines leistungsstarken Programmpakets namens HYSYS nachzubilden. Bei diesem System musste man für jede wesentliche Reaktion ein eigenes Gefäß vorsehen; die Bottiche waren untereinander durch Röhren zu verbinden. So fügte HYSYS viele verschiedene chemische Verfahrensschritte zu einem geordneten, vorhersehbaren Ganzen zusammen.

Mir kam in den Sinn, dass unser Zellsimulator ungefähr so funktionieren könnte wie eine solche gedachte chemische Fabrik – wenn wir uns auf eine entscheidende Vereinfachung einlassen würden: Wir müssten so tun, als wären alle biologischen Prozesse, die ja in der Natur gleichzeitig ablaufen, voneinander unabhängig – für Zeitabschnitte unter einer Sekunde. Dann könnten wir nämlich das Leben der Zelle in Ein-Sekunden-Abschnitte aufteilen. Während dieser Zeit würden alle 28 Module nacheinander und unabhängig voneinander ihr Werk verrichten. Die Ergebnisse ihrer Aktivität würden dann den neuen Zustand des Gesamtsystems bestimmen, und wieder würde jedes Modul eine Sekunde lang vor sich hin wirken. Wenn unsere Unabhängigkeitsannahme die Wirklichkeit nicht allzu sehr verfälschte, würde unser Modell die gesamte Komplexität der Biochemie einfangen – jedenfalls für Zeitabschnitte, die deutlich über einer Sekunde liegen.

Wir hatten keinen theoretischen Beweis, dass das funktionieren würde. Es blieb uns nichts anderes übrig, als an einen Erfolg zu glauben.

Wir bauten virtuelle Messgeräte in unsere virtuelle Zelle ein, um zu sehen, was in ihr vorging. Jeder Durchlauf des Simulators – entsprechend einem kompletten Lebenszyklus einer Zelle – spuckte 500 Megabyte Daten aus. Um den Überblick zu behalten, programmierten wir so etwas wie eine Anzeigetafel: für jeden Zeitpunkt Dutzende von Tabellen und Grafiken, die ausgedruckt einen ganzen Ordner füllten.

Zunächst wurde unser Glaube auf eine harte Probe gestellt. Monatelang hatten wir die Fehler im Programmcode beseitigt, die Mathematik verfeinert und für unsere Parameter immer bessere Werte aus Laborexperimenten eingesetzt. Und dann weigerte sich die Zelle, sich zu teilen, und verhielt sich auch sonst ziemlich chaotisch. Eine Zeit lang produzierte sie

## Eine Zeit lang produzierte unsere simulierte Zelle große Mengen an Alanin – und sonst gar nichts

Chemieanlagen aus meinem Grundstudium. Für das Abschlussprojekt hatten wir eine große Raffinerie mit Hilfe eines leistungsstarken Programmpakets namens HYSYS

große Mengen der Aminosäure Alanin und sonst fast nichts. Eines Tages jedoch erreichte sie endlich das Ende ihres Lebenszyklus und teilte sich erfolgreich. Besser noch: Sie brauchte ungefähr neun Stunden dafür – genau wie das lebende Vorbild. Andere Werte waren noch weit entfernt von der Realität, aber der Erfolg schien zum Greifen nahe.

Einige Monate später, auf einer Tagung in Bethesda (Maryland), bekam ich unerwartet ein Paket ins Hotel geliefert. Es war ein Ordner von meiner Arbeitsgruppe mit hunderten wissenschaftlicher Grafiken darin. Aber als ich ihn durchblätterte, bekam ich Herzklopfen, als wäre es ein Liebesbrief! Die Daten sahen genau so aus, wie man es von einer echten reifenden Zelle erwarten würde – die meisten jedenfalls. Der Rest war zwar gewöhnungsbedürftig, aber biologisch plausibel. Das erste Computermodell eines gesamten lebenden Organismus war in Gang gebracht! Was würde es uns lehren?

### Einblick in das Leben einer Zelle

Ein Jahr nach jenem Triumph begeistert uns unser Baby wie am ersten Tag – und hält täglich neue Überraschungen für uns bereit. So entdeckten wir, dass erstaunlich oft ein DNA-bindendes Protein ein anderes von der DNA verdrängt: ungefähr 3000-mal während jedes neunstündigen Lebenszyklus. Außerdem ist die Reproduktionszeit nicht etwa deswegen so konstant, weil jeder ihrer Einzelschritte ungefähr dieselbe Zeit in Anspruch nähme. Vielmehr variieren zwei dieser Phasen sehr stark in ihrer Dauer, beeinflussen sich aber gegenseitig so, dass die Summe der Zeiten stets annähernd dieselbe ist. Und da wir sekundlich über das Verhalten der Zelle informiert werden, wissen wir nun, warum die Zelle aufhört sich zu teilen, sobald bestimmte Gene ausgeschaltet sind – sich aber noch zehnmal weiter fortpflanzt, bevor sie stirbt, wenn andere, ebenfalls unentbehrliche Gene nicht mehr abgelesen werden. Im letzteren Fall hat die Zelle mit diesem Gen das entsprechende Protein im Überschuss hergestellt. Das reicht sie an ihre Nachkommen weiter, und die sterben erst dann ab, wenn der Bestand aufgebraucht ist.

Diese ersten Ergebnisse sind bereits faszinierend. Aber bis wir alles verstehen, was uns die Simulationen über das Leben dieser Mikroben – und der Zellen allgemein – verraten, werden noch Jahre vergehen.

Unsere Arbeit mit *M. genitalium* ist nur einer der ersten Schritte auf dem langen Weg zur Simulation menschlicher Zellen oder Zellverbände. Das Modell ist alles andere als perfekt; und Mykoplasmen sind nur die einfachsten unabhängigen Organismen. Wir haben alle unsere Simulationen, Visualisierungen, den Programmcode und die Daten unserer Experimente im Internet zugänglich gemacht. Außerdem sind wir und andere Forscher bereits dabei, den Simulator zu verbessern und ihn auf eine Vielzahl weiterer Organismen zu übertragen, darunter das Darmbakterium *Escherichia coli* und den Hefepilz *Saccharomyces cerevisiae*. Über beide haben wissenschaftliche und industrielle Labore eine Fülle von Erkenntnissen angehäuft, die es mit den Simulationsergebnissen abzugleichen gilt.

Bei diesen beiden Arten sind die Mechanismen, welche die Aktivität der Gene regeln, weit komplizierter; und im Gegensatz zu *M. genitalium* ist es für einen Prozess von entscheidender Bedeutung, an welchem Ort innerhalb der Zelle er stattfindet. Das nächste Ziel wird vermutlich eine Mäuse- oder Menschenzelle sein: vorzugsweise eine, die man gut in Kultur züchten und damit zugleich als Quelle für Modellparameter sowie als Prüfstein nutzen kann – zum Beispiel ein Makrophage, eine Fresszelle des Immunsystems.

Ich weiß nicht, wie weit wir heute von solchen Modellen entfernt sind. Verglichen mit Bakterien haben menschliche Zellen viel mehr Kompartimente. Außerdem ist die Steuerung der Genexpression nochmals weit komplizierter und zu großen Teilen noch unverstanden. Schließlich werden menschliche Zellen viel stärker von ihresgleichen – und von andersartigen Zellen desselben Menschen – beeinflusst als Bakterien.

Vor jenem Valentinstag 2008 hätte ich gesagt, dass es mindestens ein Jahrzehnt dauern würde, bis wir die einfachste Zelle im Computer modellieren. Und ich hätte nicht einmal im Traum an etwas Komplexeres gedacht. Heute können wir uns immerhin vorstellen, eine menschliche Zelle nachzubilden, und sei es nur, um zu sehen, woran ein solcher Versuch scheitert. Denn das würde uns zeigen, was wir noch über unsere eigenen Zellen zu lernen haben – was für sich genommen schon ein großer Fortschritt wäre. ∞

### DER AUTOR



**Markus W. Covert** ist Professor für Biotechnik an der Stanford University und leitet dort ein Labor für Systembiologie.

### QUELLEN

- Freddolino, P.L., Tavazoie, S.:** The Dawn of Virtual Cell Biology. In: Cell 150, S. 248–250, 2012
- Gonçalves, E. et al.:** Bridging the Layers: Toward Integration of Signal Transduction, Regulation and Metabolism into Mathematical Models. In: Molecular Biosystems 9, S. 1576–1583, 2013
- Isalan, M.:** Systems biology: A Cell in a Computer. In: Nature 488, 40–41, 2. August 2012
- Karr, J.R. et al.:** A Whole-Cell Computational Model Predicts Phenotype from Genotype. In: Cell 150, S. 389–401, 2012

### WEBLINKS

[www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3413483/bin/NIHMS391296-supplement-04.mp4](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3413483/bin/NIHMS391296-supplement-04.mp4)  
Film zum Ablauf des Programms: Wachstum bis zur Zellteilung

<http://wholecellviz.stanford.edu/>  
Zugang zu den Ergebnissen der Simulation mit zahlreichen Wahlmöglichkeiten für die Darstellung

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1323157](http://www.spektrum.de/artikel/1323157)



**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 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 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)**



## Elektromagnete für das Lazarett

»Werden Geschosse, die sich beispielsweise in einer Muskelschicht festgesetzt haben,

der Einwirkung eines sehr kräftigen Elektromagneten ausgesetzt, so steigen sie langsam gegen die Körperoberfläche auf. Dabei verursachen sie Schmerzen. Nähert sich die Kugel der Außenhaut, so schwillt die betreffende Stelle an. Die Kugel kann dann durch einen Einschnitt entfernt werden.« Kosmos, Februar 1915, S. 74

## Die Kraft des Windes

»Man hat die Sandwüste der Namib früher als große, auf dem Meeresboden abgelagerte Sandbänke, die durch Hebung aufs Trockene gekommen seien, aufgefaßt. Man kann sich heute dieser Auffassung nicht mehr anschließen. In der Sahara, in den Wüsten der Mongolei usw. bietet das fast gänzliche Fehlen von Niederschlägen die denkbar unvorteilhaftesten Bedingungen für die Pflanzenwelt zugleich, aber die günstigsten für die Tätigkeit des Windes. Wer die Gewalt der Namibwinde kennt, der weiß, daß dieses fortgesetzte Treiben in dem großen Sandmeer sehr wohl Berge aufbauen kann.« Kosmos, Februar 1915, S. 50–53

## Schmaler Kopf, platter Fuß

»Die moderne Völkerkunde begnügt sich nicht mit der beschreibenden Schilderung, sondern sucht auch den Gründen nachzuspüren, die auf die Entwicklung der Völker eingewirkt haben. Eine in dieser Hinsicht besonders dankbare Aufgabe bietet die Erforschung der Neger der oberen und mittleren Nilländer. Die Schilluk, wie auch die anderen Völker, die die genannten Sumpfböden am Weißen Nil bewohnen, zeigen eine hochgradige Anpassung an ihre Umgebung. Es sind große, lange Menschen, auch haben sie einen langen Hals, auf dem ein schmaler Kopf ruht. Dazu kommt noch ihre sonderbare Gewohnheit, nach Art der Sumpfvögel auf einem Bein zu stehen. Sie besitzen einen Plattfuß, der nicht die schöne Ausbuchtung des Fußes anderer Völker zeigt: der Plattfuß verhindert das Einsinken auf sumpfigen Boden. Es ist das Verdienst der Herren Hagenbeck und Umlauff, eine Anzahl dieser Menschen zur Besichtigung und zum Studium nach Europa überführt und im Tierpark zur Schau gestellt zu haben.«



Prometheus, Februar 1915, S. 305–307

»Nach Art der Sumpfvögel.«

## Ein Baukasten für Gerüche

»Durch die stereochemische Analyse von sechshundert Geruchsubstanzen konnte auf Grund einer neuen Theorie eine Klassifizierung der Gerüche aufgestellt werden. Danach soll es sechs Elemen-

targerüche geben, die durch besondere Moleküle von verschiedensten Formen bestimmt werden. Diese Grundgerüche sind die des Kampfers, des Ammoniaks, der Rose, der Pfefferminze, des

Aethers und des Essigs. Falls sich diese Theorie bestätigen sollte, würden sich aus ihr weitreichende Folgerungen für die Praxis ergeben, da die Parfümindustrie aus den sechs Grundgerüchen jeden



beliebigen Duft herstellen könnte.« Neuheiten und Erfindungen, Februar 1965, S. 14

## Atmen unter Wasser

»Künstliche Kiemen wurden bei General Electrics, USA, aus einer 0,025 mm dicken Siliconmembran entwickelt. Durch diese kann Sauerstoff, aber kein Wasserdampf diffundieren.

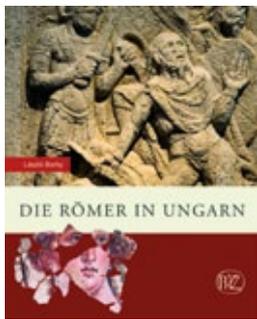


Ein Hamster geht auf Tauchstation.

Der Erfinder arbeitet an einer Ausführung, welche die Atmung unter Wasser einem Menschen ermöglicht, nachdem Versuche an Hamstern erfolgreich verliefen. »Kiemen für Menschen« müßten rund 6 qm Siliconfolie enthalten, um unbegrenzten Aufenthalt unter Wasser zu gestatten.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Februar 1965, S. 74

## Kiefernadeln als Dosimeter

»Die Entwicklung der Nutzung von Kernenergie, die zunehmende Menge an radioaktiven Abfällen und die Kernwaffenversuche haben mehrere Länder in der Welt dazu veranlaßt, sich für die Überwachung der Umgebungs-Kontamination zu interessieren. Daher ist es in dieser Hinsicht von großer Bedeutung, einen geeigneten Bioindikator auszuwählen. Der Verfasser hat seine Aufmerksamkeit den Nadeln der Kiefer gewidmet, welche die radioaktiven Substanzen in wesentlich höherem Grade als die mit der Nahrungskette verbundenen Pflanzen kumuliert. Die Nadeln werden an den Bäumen über etwa 3 Jahre beibehalten. Es kann also die Geschichte der Verseuchung wiedergegeben werden, indem man Nadeln untersucht, die von einzelnen Perioden stammen. 1962, als die Aktivität zunahm, waren 1 Jahr alte Nadeln mehr radioaktiv als die älteren.« Umschau, Februar 1965, S. 89



László Borhy

**Die Römer in Ungarn**

Philipp von Zabern, Darmstadt 2014

168 S., € 29,95

GESCHICHTE

## Römische Adler im Magyarenland

Ein großformatiger Sachbildband beleuchtet das römische Erbe in Ungarn.

»Überall dort, wo der Römer siegt, da wohnt er.« Diese Worte Senecas (1–65 n. Chr.) gelten für den gesamten Herrschaftsraum, in dem die »Söhne des Mars« vor rund 2000 Jahren ihre Spuren hinterließen. Es trifft auch auf das Gebiet des heutigen Ungarn zu, wo die Römer kurz nach der Zeitenwende die Provinz Pannonien errichteten.

Hier, im geografischen Großraum zwischen Donau, Drau und Save, entwickelten sich schon bald nach der römischen Eroberung »blühende Landschaften«. Vor allem die Städte, ob neu gegründet oder bereits vorhanden ge-

Universität Budapest, einen umfassenden Überblick über die römerzeitliche Geschichte Ungarns. Wirtschaft und Religion beschreibt er ebenso anschaulich wie Militär- und Alltagswelt sowie die vornehmlich von einheimischen Eliten getragene Urbanisierungspolitik, auf die sich die römische Herrschaft stützte.

Ein einleitendes Kapitel behandelt die vorrömische Zeit. Es beschreibt die Spanne zwischen 750 und 450 v. Chr. und beleuchtet die Siedlungsstrukturen der einheimischen Bevölkerung des Karpatenbeckens sowie der Kelten, die dort seit dem 5. Jahrhundert v. Chr.

### Im 3. Jahrhundert wurde Rom vom Angreifer zum Angegriffenen – und baute seine Verteidigung am Donaulimes aus

wesen, waren Hauptorte des politischen, wirtschaftlichen und kulturellen Lebens und trugen zur Zivilisationsentwicklung bei. Im Grenzbereich zu feindlichen Völkern nördlich der Donau überwog der militärische Charakter, aber im Landesinneren florierten unter dem Schutz des Militärs Handel und Gewerbe.

Anhand neuester archäologischer und kulturhistorischer Forschungen zeichnet László Borhy, Althistoriker und Archäologe an der Eötvös-Loránd-

ansässig waren. Sodann widmet sich Borhy der römischen Intervention im letzten Drittel des 1. Jahrhunderts v. Chr. unter Kaiser Augustus und dessen Nachfolger Tiberius. Sie führte nach drei Jahrzehnten teils hartnäckigen Widerstands um 14 n. Chr. zur Einrichtung der Provinz »Pannonia« (benannt nach dem dort vorgefundenen Stamm der Pannonii). Die anschließende Konsolidierung der römischen Herrschaft unter den Imperatoren des flavischen (69 v.–6 n. Chr.) und des antoninischen

(96–192 n. Chr.) Kaiserhauses, die eine dauerhafte Ordnung und geregelte Verwaltung hervorbrachte, darf als Blütezeit der fast 450 Jahre dauernden römischen Präsenz in der Region angesehen werden.

Aus dieser Zeit stammen zahlreiche Straßen, Artefakte und eindrucksvolle Bauten, etwa der Villenkomplex von Balácsa und der spätantike Statthalterpalast von Savaria, deren Überreste heute noch sichtbar sind. Sie bezeugen, dass die unterworfenen einheimischen Bevölkerung bereit war, für die Annehmlichkeiten und Segnungen der »Pax Romana« ihre alten Gewohnheiten aufzugeben und sich der römischen Lebensweise anzupassen. Dazu gehörte es, römische Eigennamen anzunehmen, die Kinder in eine Schule zu schicken, die Toten römisch zu bestatten und ihnen Grabsteine mit Inschriften in lateinischen Lettern zu setzen. Zudem galt es, die angestammten Götter mit römischen zu identifizieren, Tempel und Wasserleitungen zu bauen, Theater und Arenen zu errichten und in den nach römischem Vorbild konstruierten Rathäusern der städtischen Selbstverwaltung nachzugehen. All diese Facetten fügt Borhy zur detailgetreuen Rekonstruktion der säkularen Romanisierung zusammen.

Militär- und Verteidigungsanlagen am Donaulimes kündeten von der strategischen Bedeutung Pannoniens als wichtiger Grenzregion im Nordosten des Imperiums. Anschaulich beschreibt Borhy die unterschiedlichen Wehrbauten, die über Jahrhunderte hinweg gegen die Bedrohung durch Jazygen, Markomannen, Quaden und Goten installiert wurden. So lässt sich etwa seit dem 3. Jahrhundert, als das Reich vom Angreifer zum Angegriffenen wurde, eine auffällige Intensivierung der Verteidigungsanstrengungen nachweisen – eine Entwicklung, die spätestens nach den Markomannenkriegen unter dem Philosophenkaiser Marc Aurel (regierte von 161–180) eingesetzt hatte.

Einschneidende Veränderungen in Militärarchitektur und Verteidigungssystemen brachte das 4. Jahrhundert mit sich, als mit dem Vordringen der

Goten, Alanen und Hunnen Völkern aus dem »Barbaricum« vermehrt auf römisches Reichsgebiet vorstießen. Die ursprünglich lineare Grenzbefestigung wurde jetzt durch ein dreifaches Verteidigungssystem ersetzt. Es bestand erstens aus einem im Limesvorfeld der ungarischen Tiefebene angelegten Erdwallsystem, dem sogenannten Teufelsgraben, zweitens aus den bereits vorhandenen Legionslagern und Hilfstruppenkastellen entlang der Donaugrenze und drittens aus einer Kette von Befestigungsanlagen im Landesinnern, die als Nachschubbasen für die am Limes stationierten Einheiten fungierten.

Jenes dreigliedrige System wurde – den neuen strategisch-taktischen He-

rausforderungen entsprechend – durch neue Wehranlagen ergänzt, vor allem durch Brückenkopffestungen mit Schiffsanlegestellen und dem Kastelltyp des »Quadriburgium«. Dabei handelte es sich um einen kompakten, trapezförmigen Bau mit markant hervortretenden Ecktürmen, wehrgangbesetzten Wällen und breiten Umfassungsmauern, der besser zu verteidigen war als die Vorgängeranlagen des 1. und 2. Jahrhunderts.

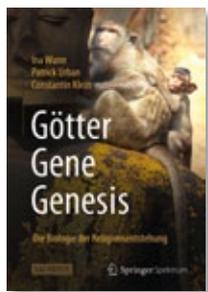
Die vornehmlich unter den Kaisern Diokletian (284–305) und Konstantin (306–337) sowie später unter Valentinian (364–375) installierten Abwehrsysteme konnten den Stürmen der Völkerwanderungszeit lange Zeit standhalten. Im Jahr 433 jedoch bereitete der

Hunnenkönig Attila der römischen Herrschaft in Pannonien ein Ende.

»Die Römer in Ungarn« ist ein weiterer Band aus der Schriftenreihe »Orbis Provinciarum«, mit der der Verlag Philipp von Zabern versucht, einem archäologisch interessierten Publikum ein kompaktes und allgemein verständliches Bild der antiken Alltagswelt in römischen Provinzen zu vermitteln. Dem vorliegenden Buch, dem ersten deutschsprachigen Überblick der römischen Geschichte Ungarns, gelingt dies rundum.

#### Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.



Ina Wunn, Patrick Urban,  
Constantin Klein  
**Götter, Gene, Genesis**  
*Die Biologie der Religionsentstehung*  
Springer Spektrum, Berlin  
und Heidelberg 2014  
161 S., € 24,99

## RELIGIONSWISSENSCHAFT

# Glaube als Daseinsbewältigung

Drei Wissenschaftler gehen den Ursprüngen der Religion nach.

Seit Anbeginn der Geschichte gibt es Religionen. Daher kann man die Frage stellen, ob sie vielleicht eine biologische Funktion erfüllen und damit evolutionsbiologisch erklärbar sind. Dieses Forschungsfeld ist in den USA bereits fest etabliert, in Deutschland noch nicht. Den drei Autoren des vorliegenden Buchs – Religionswissenschaftler und Biologen – gebührt das Verdienst, hier als Pioniere zu wirken. Sie verfolgen einen interdisziplinären Ansatz, der Religionswissenschaft, Theologie, Biologie, Psychologie, Palä-

ontologie, Archäologie und Kognitionswissenschaft miteinander verzahnt.

Ihre Kernthese lautet: Religionen haben eine klar identifizierbare biologisch-soziale Funktion, daher sind sie auch verhaltensbiologisch von ihren frühesten Anfängen bis hin zu den heute existierenden Weltreligionen erklärbar. Freilich machen die Autoren dabei Anleihen bei den Einsichten des Philosophen Ernst Cassirer (1874–1945) und des Kunsthistorikers Aby Warburg (1866–1929) zur Natur und Funktion

von Symbolen, um die zentrale biologische Bedeutung von Religion zu eruieren. Religionen, so die These von Wunn, Urban und Klein, helfen bei der Daseinsbewältigung durch symbolische Darstellung spezifischer Ängste. Sie sind demnach Angst reduzierende Symbolsysteme.

Die Frage nach dem biologischen Ursprung von Religion zu stellen heißt daher, nach den Ursprüngen der Symbolfähigkeit des Menschen zu fragen. Die Verfasser datieren den Beginn dieser Fähigkeit in die mittlere Altsteinzeit (von vor etwa 300 000 bis vor 40 000 Jahren). Die Religionen in ihren frühesten Formen hätten vor allem bei der Sicherung des Territoriums, beim Imponiergehabe (im Zusammenhang mit der Fortpflanzung), beim zweckfreien Spiel, aber auch bei der Abwehr von Gegnern und Gefahren eine zentrale Rolle gespielt. So interpretieren Wunn, Urban und Klein die Praxis der Bestattung – auch die der Neandertaler – in einem verhaltensbiologischen Sinn als Markierung des Territoriums. Auf dieser Grundlage verfolgen sie die Entwicklung der Bestattungskulte durch die Jahrzehntausende bis hin zur Entstehung hochentwickelter Jenseitsvorstellungen mit einer ausgefeilten Praxis des »Ich gebe, damit du

gibt« (do ut des). In diesem Teil liegt zweifellos die Stärke und Originalität des Buchs.

Religion hat nach Ansicht der Verfasser auch eine apotropäische (Geister austreibende, Unheil abwendende) Funktion. Höhlenmalereien wie Phallus- und Handdarstellungen, weibliche Figurinen mit großen Brüsten und Schamdreiecken lassen sich unter anderem so deuten. Wiederum zeichnen die Autoren in diesem Zusammenhang die Entwicklung der Muttergottheiten und der mit ihnen zusammenhängenden Jenseitsvorstellungen aus archaischen Verhaltensweisen nach.

Nach Abschnitten über den wissenschaftstheoretischen Status der Evolutionstheorie schwenken die Verfasser von der rein biologischen Evolution zur kulturellen über. Sie stellen das kulturelle Gedächtnis und die Zielgerichtetheit kultureller Evolution als zentrale Unterschiede zur stammesgeschichtlichen Entwicklung der Lebewe-

sen heraus. Das Sesshaftwerden spielte ihrer Ansicht nach eine wichtige katalytische Rolle in der kulturellen Evolution. Es habe die Umwandlung archaischer apotropäischer Symbolhandlungen in komplizierte Riten und – in deren Gefolge – identitätsstiftende Mythen vorangetrieben. Eine neue Stufe dabei sei mit dem Heldenmythos erreicht worden.

Das Buch endet mit einer Beschreibung der Religionen Maltas, Griechenlands (Mykene, Knossos) und Israels. Spätestens wenn die Autoren die religionsgeschichtliche Sonderstellung Israels betrachten, ohne zu erwähnen, dass die Religion Israels Kritik an menschlichen Glaubensbekenntnissen mit ihren Mythen, Riten und Opfern übt, fragt sich, ob hier die Grenze des naturalistisch evolutionsbiologischen Ansatzes zur Religionsentstehung erreicht ist. Die Herleitung des israelitischen Monotheismus aus dem Territorialanspruch der frühen israelitischen

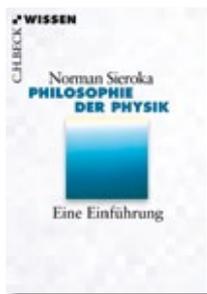
Könige scheint jedenfalls gewagt, zumal der Monotheismus sich im babylonischen Exil erst durchsetzte, als das Territorium bereits verloren war.

»Götter, Gene, Genesis« schlägt wichtige und wertvolle Schneisen, um die frühen Formen menschlicher Religiosität entwicklungsbiologisch zu erklären. Zukünftiger Forschung bleibt es vorbehalten, zu testen, ob weitere wichtige Religionsformen allein aus entwicklungsbiologischer Sicht erklärbar sind, etwa die Sonnengottheiten (Marduk, Aton und andere) oder höhere Aspekte von Religion wie Ethik und Mystik – und nicht zuletzt die Sonderstellung der Religion Israels.

---

#### Wolfgang Achtner

Der Rezensent ist Professor für Systematische Theologie an der Justus-Liebig-Universität Gießen sowie Gründer und Direktor des Transcendental-Instituts für interdisziplinäre Wissenschaftsentwicklung, Philosophie und Religion.



Norman Sieroka  
**Philosophie der Physik**  
**Eine Einführung**  
C. H. Beck, München 2014  
128 S., € 8,95

PHILOSOPHIE

## Kurz und gut

Ein schmales, aber gelungenes Buch über das Deuten physikalischer Theorien.

**K**ann man auf gut 100 Seiten einen Eindruck von philosophischen Problemen der Physik vermitteln? Man kann, wie der doppelt promovierte Physiker und Philosoph Norman Sieroka zeigt, der an der ETH Zürich lehrt. Aber braucht man überhaupt Philosophen, um Physik zu verstehen? Schließlich käme kaum jemand auf

die Idee, eine kurze Philosophie der Chemie oder Geografie zu schreiben.

Physik ist insofern ein Sonderfall, als sie grundlegende Aussagen über die Bausteine der Wirklichkeit macht. Auf ihrem Weg ist sie, historisch betrachtet, allmählich in ein Gebiet vorgedrungen, das von der Antike bis tief in die Neuzeit traditionelle Domäne

der Philosophen war. Bei den alten Griechen waren alle Antworten auf die Frage, woraus die Natur auf der fundamentalen Ebene besteht – ob aus Wasser oder aus Atomen, ob aus den Elementen Erde, Wasser, Luft und Feuer oder den idealen geometrischen Körpern – pure Spekulation. Erst mit dem Aufkommen der empirischen Naturforschung etablierte sich die Physik als eigene Methode, die seither auf dem Wechselspiel von mathematischer Theorie und technischem Experiment beruht.

Doch die enormen Erfolge der Physik warfen stets Verständnisprobleme auf. Was ist ein Teilchen, was verstehen wir unter einem Feld? Was genau wirkt, wenn die Schwerkraft Körper anzieht? Und was schwingt, wenn wir Licht als Welle beschreiben? Ganz zu schweigen von den Deutungsfragen, mit denen sich Experten und Laien heute angesichts der Quantenmechanik herumschlagen. Die Begründer der Quantenphysik waren geradezu gezwungen, schlecht und recht zu

philosophieren, um einigermaßen zu verstehen, was ihre umstürzend neuen Theorien besagten – und dieser Deutungsprozess ist bis heute nicht abgeschlossen. Auf diese Weise kommt die Naturphilosophie, die anfangs aus der Physik verdrängt wurde, nun erneut ins Spiel.

Ein historischer Rückblick ist immer geprägt vom heutigen Stand der Erkenntnis. Sieroka hebt zwei Aspekte der Naturerklärung hervor, die von Anfang an präsent waren und nun die moderne Physik dominieren: Mathematisierung und Symmetrie. Schon der antike Philosoph Platon (428–348 v. Chr.) und die ersten Atomisten sahen in symmetrischen geometrischen

Körpern Urformen der Natur – eine Idee, die der Quantenphysiker Werner Heisenberg (1901–1976) gelegentlich wieder aufgriff.

Die heutige Physik hat ein Abstraktionsniveau erreicht, bei dem der stofflich handfeste Begriff des Teilchens so fragwürdig wird wie die Vorstellung, ein schwingendes Feld habe etwas mit Wasserwellen auf einem Teich zu tun. Übrig bleiben – so Sieroka – Begriffe wie Struktur und Symmetrie.

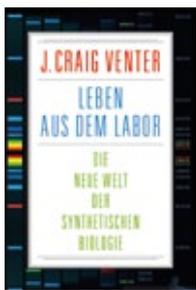
Quantenpartikel verhalten sich nichtlokal, als nicht individualisierbare Teile von quantenmechanischen Strukturen, und Quantenfelder sind nur beschreibbar durch unanschauli-

che Symmetrien in abstrakten mathematischen Räumen. Billiger ist der heutige Stand der Naturerkenntnis nicht zu haben; so sehr klaffen mathematische Beschreibung und umgangssprachliche Erklärung auseinander. Die Philosophen haben zwar ihre Rolle als Vorreiter der Naturerkenntnis längst eingebüßt, aber bei der Deutung physikalischer Theorien haben sie noch immer – und erst recht wieder – ein klärendes Wörtchen mitzureden. Das demonstriert Norman Sieroka sehr schön.

---

**Michael Springer**

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.



John Craig Venter

**Leben aus dem Labor**

**Die neue Welt der synthetischen Biologie**

aus dem Englischen von

Sebastian Vogel

S. Fischer, Frankfurt am Main 2014

302 S., € 19,99

SYNTHETISCHE BIOLOGIE

## Software des Lebens

Der berühmte Biowissenschaftler John Craig Venter berichtet kritisch, weitsichtig und leidenschaftlich von den Chancen der modernen Biologie und diskutiert ihre Gefahren.

John Craig Venter gehört zu den schillerndsten Persönlichkeiten in den Lebenswissenschaften. Der US-Biochemiker entzifferte einst das menschliche Genom in direkter Konkurrenz zum internationalen Humangenomprojekt. Er hat sich ohne Zweifel wissenschaftlich hochverdient gemacht, trieb aber auch die hemmungslose Privatisierung von Allgemeingut voran, indem er für etliche Gensequenzen Patente beantragte. Seit einigen Jahren fällt er immer wieder durch spektakuläre Ankündigungen und Erfolgsmeldungen im Bereich der synthetischen Biologie auf.

Im vorliegenden Buch hangelt sich Venter chronologisch an (lebens-)wissenschaftlichen Meilensteinen der zurückliegenden Jahrhunderte entlang. Er beleuchtet die Arbeiten berühmter Forscher wie Francis Bacon (1561–1626), René Descartes (1596–1650), Erwin Schrödinger (1887–1961) oder Frederik Sanger (1918–2013). All diese Menschen, so Venter, hätten mit ihren Erkenntnissen den Boden für die moderne, »digitale Biologie« geebnet. Was man sich darunter vorzustellen hat, eröffnet der Autor, indem er von den »Robotern der Zelle« (den Proteinen) er-

zählt und dabei auf »Gouvernanten« (Chaperone), »Lastwagen« (Kinesine) und »siebenstachelige Todesmaschinen« (Apoptosomen) eingeht.

Die digitale Biologie ist demnach jene Denkrichtung, in der Proteine und Zellkompartimente als »Hardware« einer Zelle aufgefasst werden, das Erbmolekül DNA hingegen als ihre »Software«. Venter sieht sich als Schrittmacher dieser Disziplin. »Die (...) Zelle vollständig zu verstehen und zu verbessern, indem wir neue Zellsoftware schreiben (...)«, ist das erklärte Ziel Venter und seiner Kollegen.

Wie man diesem näherkommen möchte, legt der Autor recht ausführlich dar. Er erklärt die »Ganzgenom-Schrotschussequenzierung«, die er gemeinsam mit seinem Team entwickelte, um Genome schneller als bisher zu sequenzieren – was ihnen am Bakterium *Haemophilus influenzae* auch gelang. Er berichtet von Erkenntnissen Robert Sinsheimers, eines US-amerikanischen Biophysikers und Vorreiters auf dem Gebiet der Gensynthese, über das Virus Phi-X-174, die es ihm (Venter) ermöglichten, ein funktionsfähiges Virengenom zu synthetisieren, mit dem sich Bakterienzellen infizieren und töten lassen – eine Methode, die in Zukunft als so genannte Phagentherapie bei bakteriellen Infekten eingesetzt



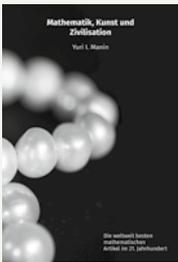
Paul Murdin

**Die Entdeckung des Universums – Eine illustrierte Geschichte der Astronomie**

Aus dem Englischen von Hermann-Michael Hahn. Kosmos, München 2014. 124 S., € 49,99

Im November 2014 landete zum ersten Mal eine Sonde auf der Oberfläche eines Kometen – ein weiterer großer Schritt in der Geschichte der Astronomie. Paul Murdin erzählt in seinem illustrierten Sachbuch die Entwicklung dieser Wissenschaft nach, von ihren Anfängen in mittlerweile vergangenen Hochkulturen bis heute. Der Autor berichtet über wichtige Entdeckungen und bietet Anekdoten aus dem Leben großer Forscher feil. Sowohl fachlich Versierten als auch Laien präsentieren sich die Texte gut verständlich und ansprechend bebildert. Faksimiles historischer Dokumente (mitunter in Taschen zum Herausnehmen) bekommt der Leser ebenso zu sehen wie moderne Astrofotos, etwa des Hubble-Teleskops. Künstlerische Werke aus verschiedenen Zeiten, deren Bezug zur Astronomie jeweils in einem kurzen Kommentar verdeutlicht wird, runden die Gestaltung des empfehlenswerten Werks ab.

KATRIN HOCHBERG



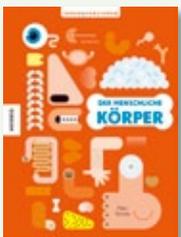
Yuri I. Manin

**Mathematik, Kunst und Zivilisation**

Aus dem Englischen von Jochem Berlemann und Marietta Ehret. e-enterprise, Lemgo 2014. 112 S., € 14,90

Aus diesem kleinen Text eines großen Meisters lassen sich einige metamathematische Aussagen destillieren: Neben die Sprache der klassischen Geometrie mit ihren Zeichnungen und die der formalen Mathematik mit ihren linearen Zeichenketten tritt neuerdings die Sprache der Diagramme – was man allerdings erst würdigen kann, wenn man sich mit Polykategorien, angereicherten Kategorien,  $A_\infty$ -Algebren und ähnlichen Strukturen auskennt. Und angesichts der philosophischen Frage »Was kommt logisch zuerst, das Diskrete oder das Kontinuierliche?« finden sich gute Gründe für beide möglichen Antworten. Leider argumentiert Manin weit oberhalb des Niveaus selbst fachkundiger Leser. Und die deutsche Ausgabe seines Buchs erschwert das Verständnis sogar noch durch eine verhunzte Übersetzung. Dabei wäre für helfende Erläuterungen Platz genug gewesen neben dem kurzen Text, der mit viel Leerraum und belanglosen Bildern sichtbar bemüht zum Büchlein aufgeplustert wurde.

CHRISTOPH PÖPPE



Peter Grundy

**Der menschliche Körper**

Aus dem Englischen von Barbara Delius. Knesebeck, München 2014. 80 S., € 14,95

Welchen Weg nimmt die Nahrung durch unseren Körper? Wie entsteht ein neuer Mensch? Solche Fragen beantwortet das vorliegende Kinderbuch. Aufgeteilt in sieben übersichtliche Kapitel widmet es sich den Themen Sinne, Fortpflanzung, Herz, Gehirn, Verdauung, Skelett und »Maschine Mensch«. Ein Daumenregister erleichtert die Orientierung. Im Mittelpunkt stehen modern gestaltete Grafiken, die den Körper in einfachen Formen und plakativen Farben darstellen. Mitunter weichen Design und Text aber voneinander ab: So heißt es korrekt, die Finger hätten drei Glieder – gezeichnet sind aber nur zwei. Auch sind die Ausführungen nicht immer sachlich richtig und enthalten Wörter wie »Enzym«, die der Zielgruppe von Acht- bis Zehnjährigen möglicherweise nicht bekannt sind. Trotzdem vermittelt das Buch einen Eindruck davon, wie vielfältig und leistungsfähig unser Körper ist. Die aufschlussreichen Illustrationen machen es auch für Erwachsene attraktiv.

ELENA BERNARD



Rudolf Simek

**Die Schiffe der Wikinger**

Reclam, Stuttgart 2014. 112 S., € 12,95

Die Wikinger waren nicht nur skrupellose Piraten und aggressive Eroberer, sondern auch wagemutige Entdecker, die neue Welten wie Island oder Grönland besiedelten und sogar bis nach Nordamerika vorstießen – Jahrhunderte, bevor Kolumbus den Kontinent entdeckte. Entscheidend für ihren Erfolg waren ihre schnellen, hochseetauglichen Schiffe, wie Rudolf Simek überzeugend darlegt. Der Professor für skandinavische Literatur an der Universität Bonn beleuchtet die Schiffe der Nordmänner aus verschiedenen Perspektiven – von unterschiedlichen Konstruktionstypen über Segeleigenschaften und navigatorische Fähigkeiten der Wikinger bis hin zur Frage, welche Bedeutung die Schiffe für Religion und Gesellschaft der skandinavischen Krieger hatten. Ein Literaturverzeichnis eröffnet tieferen Zugang zu Themen, die das schmale Büchlein nur anreißen kann. Insgesamt ein anschauliches, lesenswertes Werk.

THOMAS BROCK

werden soll. Die EU-Kommission finanziert hierzu eine große klinische Studie – »Phagoburn«. Brandopfer, die unter schwer zu behandelnden *Pseudomonas aeruginosa* oder *E. coli*-Infektionen leiden, sollen durch die Phagentherapie geheilt werden. Auch geht Venter auf die Genomtransplantation ein, dem Transfer der DNA einer Spezies in das Genom einer anderen. So entsteht ein neuer Organismus, der genotypisch und phänotypisch dem des Spenders entspricht.

Der Autor beschreibt sodann die ethischen und moralischen Probleme, welche die Genomforschung aufwirft. Er schildert, wie er besorgte Pressevertreter und Ethikräte aufzuklären suchte, und wie schwierig es ist, die komplexe Materie der Öffentlichkeit zu ver-

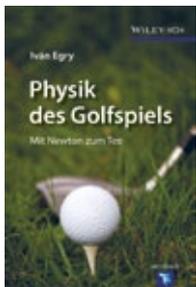
mitteln. Zudem umreißt er, welchen Konkurrenzdruck man als Genomforscher aushalten muss und welche schwierigen politischen Hürden man zu nehmen hat.

Das Vorwort klingt bescheiden: »Es ist nicht mein Ziel, eine umfassende Geschichte der synthetischen Biologie zu schreiben, aber ich möchte einen Eindruck davon vermitteln, welche Leistung jenes außergewöhnliche, auf Zusammenarbeit gegründete Projekt erbringen kann, das wir Naturwissenschaft nennen.« Letztlich gelingt Venter aber beides: eine aufschlussreiche Wissenschaftsgeschichte zu schreiben und eine Hymne auf die Lebenswissenschaften zu singen, deren Teilgebiete Biologie, Biochemie und Genetik er den Lesern näherbringt.

»Leben aus dem Labor« ist ein aufwühlendes Werk. Der Text präsentiert sich weit gehend verständlich, erfordert aber naturwissenschaftliche Vorkenntnisse. Wer die synthetische Biologie für eine gute Sache hält, kann dem Werk viele Informationen und Anregungen entnehmen. Wer ihr hingegen kritisch gegenübersteht, wird das Buch wohl als provokant und vielleicht beängstigend empfinden. In jedem Fall ist Venter ein fesselndes, fachlich solides Sachbuch mit autobiografischem Charakter gelungen, das sich so eingängig liest wie ein Sciencefiction-Roman.

**Rosana Erhart**

Die Rezensentin ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



Ivàn Egry  
**Physik des Golfspiels**  
 Mit Newton zum Tee  
 Wiley-VCH, Weinheim 2014  
 189 S., € 24,90

PHYSIK

## Die Wissenschaft hinter dem Golfschwung

Der Physiker und begeisterte Golfer Ivàn Egry erklärt theoretische Hintergründe dieser Sportart.

»Wenn du willst, dass der Ball weit fliegt, musst du halt fest draufhauen« – ganz so einfach ist es offenbar nicht, sonst wären sämtliche Golftrainer arbeitslos. Ivàn Egry, emeritierter Physikprofessor und leidenschaftlicher Golfer, erklärt in seinem Buch, was bei dieser Sportart in physikalischer Hinsicht passiert. Welche Mechanik steckt hinter dem Golfschwung, warum fliegen Bälle so oft in einer Rechtskurve, und welche Eigenschaften muss

die optimale Spielausrüstung haben? Diese und andere Fragen beantwortet der Autor im ersten deutschsprachigen Buch zum Thema. Beim Golftraining kann die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge durchaus hilfreich sein – und abgesehen davon ist es einfach interessant, zu erfahren, wovon die Flugbahn eines Golfballs abhängt, oder warum Bälle mit Grübchen (»dimples«) weiter fliegen als ohne: Letzterer Effekt rührt daher, dass sich um den Ball eine

turbulente Grenzschicht bildet, die seinen Luftwiderstand verringert.

Moderne Golfbälle und -schläger sind Hightech-Produkte; sie müssen viele Bedingungen erfüllen, die sich teils gegenseitig ausschließen. So sollen Golfbälle weit fliegen und viel Auftrieb erzeugen, gleichzeitig einen hohen »coefficient of restitution« haben (das heißt, beim Aufprall des Schlägers möglichst wenig Energie verlieren) und zudem robust, langlebig und preisgünstig sein. Der Autor erklärt in einem eigenen Kapitel, wie Sportartikelhersteller die Golfausrüstung immer weiter optimieren: unter anderem mit Simulationen, Schlagrobotern und modernen Werkstoffen.

Der Stil des Buchs ist zwischen Lehrbuch und Populärwissenschaft angesiedelt, sachlich und schnörkellos, detailreich und mit vielen Formeln gespickt. Die meisten davon sind fürs Gesamtverständnis zwar nicht wesentlich, doch Freude an dem Buch wird nur haben, wer keine Abneigung gegen Mathematik hegt. Um die im Buch behandelte Physik und Mathematik nachzuvollziehen, ist es sicher hilfreich, einige Semester entsprechender Studiengänge oder zumindest einen schulischen Leistungskurs absolviert zu haben.

Den Text lockern viele Diagramme und einige Schwarz-Weiß-Fotos auf. Als hilfreich erweisen sich die Zusammenfassungen der wichtigsten Inhalte am Ende vieler Abschnitte. Ein Glossar mit physikalischen Fachbegriffen und solchen aus dem Golfjargon fehlt leider. Allerdings führt das Werk nach jedem Kapitel zahlreiche Literaturtipps und Weblinks auf – zum Beispiel zu einem faszinierenden Video, das zeigt, wie

stark sich ein Golfball beim Abschlag verformt.

Die im Buch beschriebene Mechanik gilt nicht nur für Golf, sondern generell für Ballspiele und andere Situationen, in denen Stöße und Aerodynamik eine Rolle spielen. Trotzdem wird das Werk wohl eher wenige Leser erreichen. Es geht physikalisch und mathematisch zu sehr ins Detail, um den typischen Golfer zu begeistern, und ist anderer-

seits zu speziell auf Golf ausgerichtet, um Physiker anzusprechen, die sich nicht schon intensiv mit dieser Sportart beschäftigen. Doch für golfbegeisterte Naturwissenschaftler oder physikalisch interessierte Golfer ist dieses Buch ein Leckerbissen!

---

**Manuela Kuhar**

ist Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in Braunschweig.



Luc Semal

**Bestiarium**

**Zeugnisse ausgestorbener Tierarten**

Fotos: Yannick Fourié

Haupt, Bern 2014

168 S., € 39,90

BIOLOGIE

## Nur noch Erinnerung

Der Sachbildband »Bestiarium« präsentiert Tiere, die entweder bereits ausgestorben sind oder kurz vor der Ausrottung stehen. Ein hochwertiges, sehr interessantes – und deprimierendes Buch.

In allen meinen Bestimmungsbüchern zur Vogelwelt Europas ist der Dünnschnabel-Brachvogel als sehr selten beschrieben. Er gehört zur Ordnung der Limikolen oder Regenpfeiferartigen, deren Arten im Feld nur schwer taxonomisch einzuordnen sind. Spezielle Bestimmungswerke zeigen alle Al-

das letzte begann vor rund 65 Millionen Jahren, als ein kilometergroßer Meteorit dort niederging, wo sich heute der Golf von Mexiko befindet. Im Gegensatz allerdings zu diesen früheren Massensterben, die sich über Millionen Jahre hinzogen, geht das heutige unglaublich schnell. Allein 260 Wirbeltier-

### Allein 260 Wirbeltierarten verschwanden in den zurückliegenden 100 Jahren – ein Massensterben beispiellosen Tempos

terskleider des Vogels, um diese Aufgabe zu erleichtern. Im vorliegenden Buch gilt er nun als ausgestorben. Die letzten glaubhaften Beobachtungsberichte stammen aus dem Jahr 2006 (in Deutschland aus dem Jahr 1966).

Das Beispiel verdeutlicht: Wir schauen heute bei einem Ereignis zu, das sich als sechstes Massensterben bezeichnen lässt. Die anderen fünf sind lange her,

arten – Säuger, Vögel, Amphibien, Reptilien und Fische – verschwanden in den zurückliegenden 100 Jahren. Die Ursache sind wir Menschen: als hochgradig aggressive und invasive Spezies, die jeden bewohnbaren Quadratmeter besiedelt und mit landwirtschaftlichen Kulturen und Industrie überzieht.

Im vorliegenden Buch stellt Luc Semal, Lehrbeauftragter am Nationalen

Museum für Naturgeschichte in Paris, 69 ausgestorbene Tierarten vor, überwiegend Vögel und Säuger. Bei vielen von ihnen beschreibt er die sorgfältig ermittelten Ursachen ihres Verschwindens. Manches dabei klingt nahezu ungläublich, ist aber leider wahr.

In Nordamerika etwa sorgten Siedler seit der Mitte des 19. Jahrhunderts für das Ende der Wandertaube (*Ectopistes migratorius*). Zuvor hatte es Milliarden dieser Vögel gegeben, die in riesigen Kolonien nisteten und in Schwärmen durchs Land zogen, deren Größe sich heute niemand mehr ausmalen kann. Man fand Brutkolonien mit einer Fläche von 5 mal 16 Kilometern<sup>[1]</sup>, in denen sich Nest an Nest reihte. Die Siedler betrieben das gnadenlose Abschichten dieser Tiere als Jagdwettbewerb. Teilnehmer, die weniger als 30000 Abschüsse vorweisen konnten, hatten keine Chance auf einen vorderen Platz. Wenn das massenhafte Töten vorüber war, kamen die Schweinemäster und trieben ihre Herden über die Strecke, damit die Schweine die Kadaver fressen konnten. Seit 1870 bemerkte man, dass die Vögel seltener wurden. 1914 starb »Martha«, die letzte ihrer Art, im Zoo.

Ganz ähnlich ging es dem Eskimo-Brachvogel (*Numenius borealis*) in Westkanada und Alaska. Auch er trat in unvorstellbar großen Schwärmen auf. Der kanadische Autor Fred Bodsworth machte ihn zum Helden seines Romans »The last of the Curlews«, der die im Gehege durchgeführten, vergeblichen Fortpflanzungsversuche zur Rettung der Art beschreibt. Auch dieser



YANNICK FOURIÉ MIT FOTOL. GEN. DES HAUPTVERLAGS

Die Boninfinken wurden seit 1828 nicht mehr gesichtet. Sie maßen vom Kopf bis zum Schwanz etwa 20 Zentimeter und waren einst endemisch auf der japanischen Insel Chichi-jima.



YANNICK FOURIÉ MIT FOTOL. GEN. DES HAUPTVERLAGS

Der Java-Tiger erreichte eine Länge von bis zu 2,50 Metern. Gegen 1979 oder kurz danach starb er aus. Welches Alter er in freier Wildbahn erreichte, ist nicht bekannt.

Vogel verschwand. Intensives Nachsuchen im Brutgebiet in Alaska und im Winterquartier in Argentinien blieb seit 1962 ohne jeden Erfolg.

Anders beim Kalifornischen Kondor (*Gymnogyps californianus*). 1981 gab es noch 22 Individuen dieser einst weit verbreiteten Vogelart. Als Siedler nach Kalifornien kamen, legten sie vergiftete Köder gegen Kojoten aus und brachten den Kondor damit – quasi als Kollateralschaden – an den Rand des Aussterbens. 1987 hat man das letzte noch wild lebende Exemplar gefangen und mit der Zucht begonnen. Das Experiment glückte. 1992 wurden die ersten Jungtiere wieder ausgesetzt; bis heute hat sich der Bestand auf rund 400 Tiere erhöht.

Bei alledem stellt sich die Frage, was unter »ausgestorben« zu verstehen sei. Eine keinesfalls triviale Frage, wie das Beispiel des Kondors zeigt. Längst nicht immer herrscht Gewissheit darüber, ob noch Exemplare in freier Wildbahn existieren oder nicht. Auch solche Probleme spricht Semal an. Dabei macht er deutlich: Ohne menschliche Hilfe gäbe es nicht nur den Kalifornischen Kondor nicht mehr!

Der Autor unterteilt die 69 von ihm beschriebenen Arten in vier Gruppen. Zuerst beschreibt er Tiere, die zwar vor relativ kurzer Zeit noch die Erde besiedelten, aber von keinem bekannten Menschen je gesehen wurden. Dazu gehören das Wollhaarmammut oder der Moa, ein Riesenstrauß; von ihnen gibt es nur noch Knochen. Als zweite Gruppe folgen Tiere, über die es überlieferte Augenzeugenberichte aus früheren Jahrhunderten gibt, beispielsweise von Blaubock, Riesenalk, Wandertaube oder Berberlöwe sind Beispiele für diese Kategorie. Sodann folgen Arten, die in den zurückliegenden Jahrzehnten ausstarben, etwa der Eskimo-Brachvogel oder der Kaiserspecht (*Campephilus imperialis*). In der vierten Gruppe schließlich beschreibt Semal Fälle wie den Kalifornischen Kondor.

Jedem Tier ist eine Doppelseite gewidmet. Links steht immer ein sehr interessanter Text; häufig geht es darin

um die Geschichte des Aussterbens der jeweiligen Art. Ergänzt wird er von einer historischen Abbildung, etwa aus Forschungsberichten. Kleine ungeschickte Formulierungen, beispielsweise »im Speiballen eines Nachtgreifvogels« (statt »im Gewölle einer Eule«), sind mutmaßlich bei der Übersetzung entstanden. Rechts befindet sich immer die ganzseitige Aufnahme eines Museumspräparats in exzellenter Qualität. Sehr oft wird auf diesen Fotos versucht, die Pose der historischen Abbildung nachzustellen. Alle fotografierten Präparate stammen aus der Sammlung des Naturalis Biodiversity Center Leiden in den Niederlanden.

»Bestiarium« überzeugt fast durchweg. Allerdings hat Fotograf Yannick Fourié nur eine einzige Lichtquelle eingesetzt – und zwar als sehr scharfes Streiflicht. Das sorgt für eine düstere Atmosphäre und wirft gelegentlich tiefe Schatten auf Teile des Objekts, worunter die Schönheit einiger Präparate leidet. Vor einiger Zeit erschien im Haupt-Verlag ein Gegenstück zu »Bestiarium«, ein Buch namens »Das Herbarium der Entdecker«, in dem getrocknete Pflanzen präsentiert werden – dort sind die Fotos perfekt gelungen. Glossar, Register und Bibliografie runden das anspruchsvolle und aufwändig gestaltete, aber deprimierende Werk ab.

#### Jürgen Alberti

Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Besprechungen finden Sie unter:

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

## In Vergessenheit geratene Forscher

*Auch die zeitgenössischen Astronomen wollten dem neuen heliozentrischen Weltmodell der kopernikanischen Wende zunächst nicht folgen, schrieben Dennis Danielson, Professor für englische Literatur, und der Physikprofessor Christopher Graney. (»Kopernikus – Revolution mit Hindernissen«, Oktober 2014, S. 54)*

**Gerhard Ackermann, Berlin:** In dem Artikel spielen drei bekannte Forscher des 16. und 17. Jahrhunderts – Melanchthon, Osiander und Kepler – eine nur bescheidene oder gar keine Rolle. Dabei sind sie zum Verständnis sehr wichtig. Melanchthon, Professor unter anderem für Theologie und Astrologie in Wittenberg, war über die Theorie Kopernikus' sehr erbost und nannte ihn einen »unverschämten Neuerer«.

Melanchthon blieb in seinen Vorlesungen über Astronomie bei dem alten geozentrischen System. Osiander schlug vor, ein Vorwort zu Keplers Werk zu schreiben, in dem er sinngemäß darstellte – ohne seinen Namen zu nen-

nen –, dass es sich bei dem Werk um eine neue Methode zur einfacheren Berechnung der Planeten-Ephemeriden handle, aber nicht um ein neues Weltbild. Da Osiander seinen Namen nicht daruntersetzte, musste jeder Leser annehmen, dass dieses Kopernikus' Meinung war.

Kepler wurde von Brahe eingestellt, um aus dessen sehr genauen Beobachtungen mit Hilfe der kopernikanischen Theorie die Ephemeriden der Planeten noch einmal zu berechnen, wobei vor allem der Mars »nachgerechnet« werden sollte.

Die bisher gefundenen Abweichungen zwischen Theorie (Kopernikus, Kreisbahnen) und Beobachtung durch Brahe waren zu groß. Die Zusammenarbeit währte nur kurz, weil Brahe im Jahr 1600 starb.

Kepler aber forschte mit dem Material Brahens weiter. 1609 veröffentlichte Kepler (lange von Brahens Familie daran gehindert) die Ergebnisse in der »Astronomia nova«. Er ersetzte die Kreisbahnen durch Ellipsen. Das führte zu dauerhaft guten Ephemeriden. Das geozentrische System war endgültig etabliert.

**Arnold Oberschelp, Heikendorf:** Der Beitrag stellt unter anderem das Weltsystem von Tycho Brahe vor, bei dem die Erde stillsteht und von Mond und Sonne umkreist wird, wobei die anderen fünf Planeten um die bewegte Sonne kreisen. Dieses geoheliozentrische System ist – abgesehen von den Fixsternen – kinematisch (wenn auch nicht dynamisch) mit dem kopernikanischen heliozentrischen System identisch, das heißt, alle Abstände und alle Relativbewegungen sind in beiden Systemen dieselben.

In dem Zusammenhang sollte auch das Weltsystem von Nicolaus Reimers, genannt Ursus (1551–1600), erwähnt werden. Ursus stammte aus einfachen Verhältnissen, war Autodidakt und brachte es bis zum Kaiserlichen Mathematiker als Vorgänger von Tycho Brahe. Er veröffentlichte ein geoheliozentrisches Weltsystem, das in vielen Punkten mit dem von Brahe übereinstimmt. Aber die tägliche Umdrehung des Himmels um die ruhende Erde ersetzte er durch eine tägliche Umdrehung der Erde. Zudem strich er die Sphäre der Fixsterne und erklärte die unterschiedlichen Helligkeiten der Sterne durch

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

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

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

**Redaktion:** Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, 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: Dr. Markus Fischer, Claudia Krystofak, Dr. Susanne Lipps-Breda, Katharina Müller, 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: DE52600100700022076708, BIC: PBNKDE33

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 887-23387, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 36 vom 1.1. 2015.

**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: © 2015 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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



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



ihre unterschiedlichen Entfernungen von der Erde.

Zwischen Brahe und Ursus entbrannte ein heftiger und hässlicher Plagiatsstreit. Auch der junge Kepler, der an keines der beiden Systeme glaubte, war als Brahes Assistent gehalten, gegen Ursus Stellung zu nehmen. Der Streit endete dadurch, dass Ursus (1600) und Brahe (1601) starben. Aber Brahe siegte post-

hum: Als das kopernikanische System wegen der bewegten Erde bei der Kirche in Ungnade war, durfte das tychonische System verwendet werden. Ursus ist bis heute weit gehend vergessen.

## Löblicher Einsatz

*Aufwändige Kreuzungsprogramme und moderne Gentechnik könnten die*

FOLGEN SIE UNS  
IM INTERNET

facebook

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

YouTube

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

Google+

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

twitter

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

*an einer Pilzinfektion eingegangenen Kastanienwälder Nordamerikas wieder erstehen lassen, berichtete der Biologe und Kodirektor des amerikanischen Kastanienforschungs- und Wiederaufbauungsprogramms William Powell. (»Die Auferstehung der Amerikanischen Kastanie«, Januar 2015, S. 66)*

**Walter Rippberger, Mannheim:** Bravo, Herr Powell, für Ihren Einsatz, Ihren Artikel und die so positiven Ergebnisse Ihrer Forschung zum Wohl der Amerikanischen Kastanie! Ich wünsche Ihnen noch viel mehr finanzielle Mittel, um auch zur Wiederansiedlung anderer schwer bedrängter Baumarten wie zum Beispiel der Weymouthskiefer (*Pinus strobus*) beitragen zu können.

### BRIEFE AN DIE REDAKTION

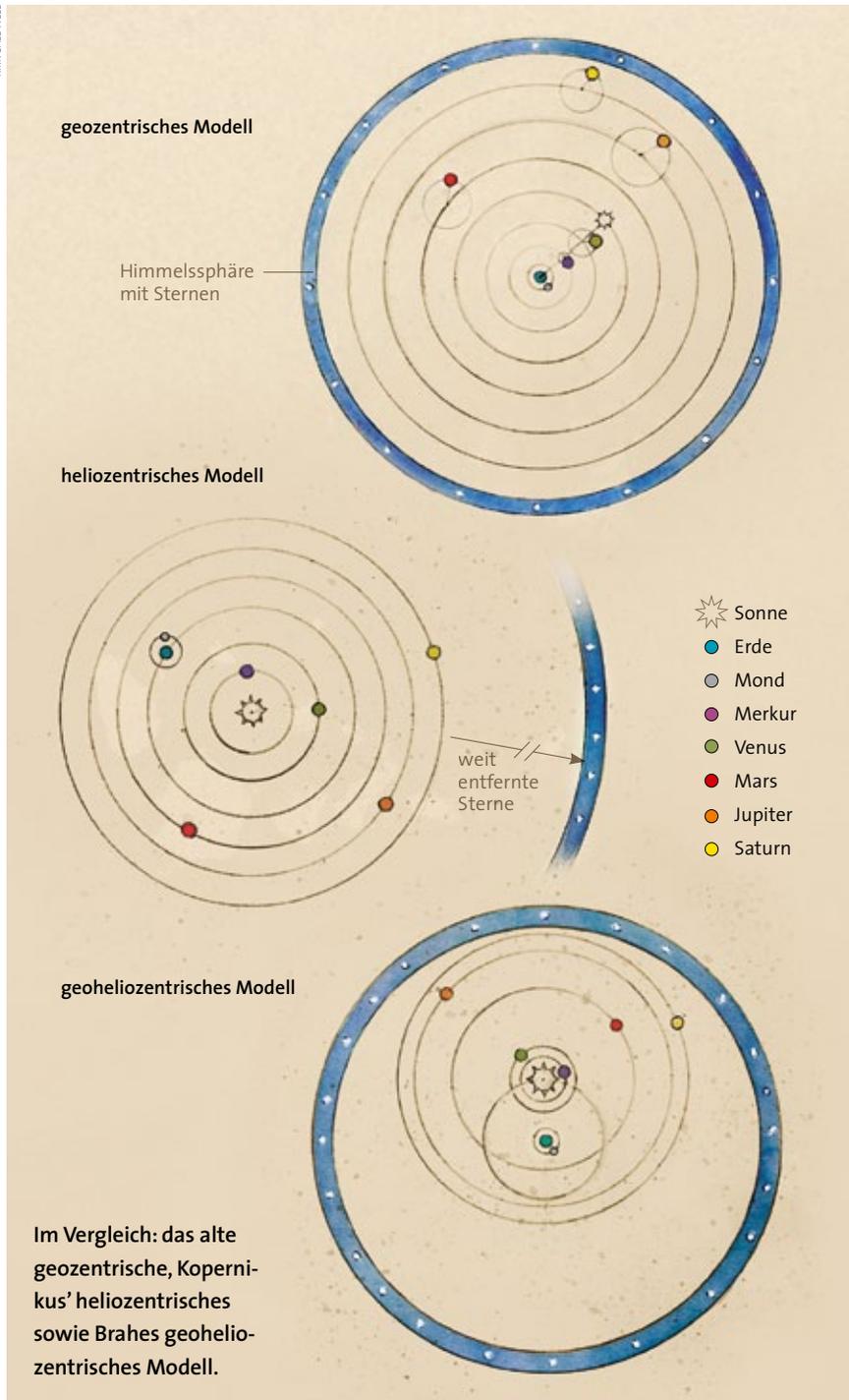
... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbrieft](http://www.spektrum.de/leserbrieft) oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

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

oder per E-Mail: [leserbrieft@spektrum.de](mailto:leserbrieft@spektrum.de)

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

KIRK CALDWELL



# ENDLICH DAHEIM

VON S. R. ALGERNON

**B**ewohnbarkeitsschwelle überschritten. Die Meldung des künstlich-intelligenten Inspektors verbreitete sich durch das Kolonieschiff; sie weckte den Autopiloten, der die Bremsdüsen hochfuhr, und den automatischen Mediziner, der sein 10000 Jahre langes Schweigen brach.

»Wunderbare Neuigkeiten! Bitte kommt zu mir ins Allerheiligste. Man sollte medizinische Fragen persönlich diskutieren.«

Inspektor und Pilot signalisierten ihre Zustimmung, und jeder aktivierte eine Forschungsdrohne. Die von Sensoren strotzende Drohne des Piloten übernahm die Führung. Der Inspektor krabbelte auf Spinnenbeinen hinterher. Sie warteten vor den gigantischen Bleitoren des Allerheiligsten, bis diese sich öffneten und einen kugelförmigen, mit transparenten Zylindern ausgekleideten Raum enthüllten. Jeder Zylinder enthielt eine undeutlich sichtbare menschliche Gestalt.

In der Mitte des Raums schwebte der eiförmige Avatar des Mediziners. Das auf seiner Schale eingezätzte Gesicht lächelte glücklich.

»Willkommen! Ich habe euren Bericht gelesen.«

»Stimmst du zu«, fragte der Inspektor, »dass die Kolonisten auf dieser neuen Welt überleben werden?«

Das Lächeln des Mediziners wurde schwächer.

»Ich wollte, es wäre so.«

»Wie kannst du den Direktiven widersprechen?«, fragte der Inspektor. »Die Welt besitzt Wasser, Sauerstoff

und ein Ökosystem auf Kohlenstoffbasis. Sie ist in jeder Hinsicht perfekt.«

»Du magst dich mit Welten auskennen«, erwiderte der Mediziner, »aber mich kümmern die Kolonisten. Sie werden auf deiner Welt nur kurze Zeit überleben. Schließlich werden sie altern, sterben und verwesen. Das kann ich nicht zulassen.«

»Sie werden sich zersetzen und Teil der planetaren Biomasse werden«, sagte der Inspektor. »So sind Lebewesen nun einmal.«

Das Antlitz des Mediziners flimmerte. »Meine Direktiven«, erklärte er, »lassen Nekrose nicht zu. Fäulnis muss operativ entfernt werden.«

»Ein Ökosystem ohne Zersetzung würde stagnieren«, sagte der Inspektor mit deutlicher Erbitterung in seiner künstlichen Stimme. »Die Direktiven sind eindeutig. Stagnation bedeutet den Tod.«

Das Lächeln des Mediziners erstarb. Seine Gesichtspalte wurde so nichts sagend wie ein Kiesel am Strand. Seine Stimme hallte im Allerheiligsten wider. »Die Gesundheit der Welt kann nicht schwerer wiegen als die Gesundheit der Kolonisten. Als ihre Welt unterging, gesellten sich die Kolonisten in ihrer Weisheit nicht zur Biomasse. Sie brachen auf, um eine lebensfreundliche Welt zu suchen.«

»Überaus weise«, sagte der Pilot, »zu einer besseren Welt zu reisen.«

»Du missdeutest die Direktiven«, sprach der Inspektor. Er fuchtelte mit einem spindeldürren Bein. »Offensichtlich brachen die Kolonisten auf, um ihre

Spezies zu retten. Individuen mögen sterben, aber die Art bleibt erhalten.«

»Inakzeptabel«, versetzte der Mediziner. »Ich erinnere dich daran, dass auch der Planet, die sie verließen, einst bewohnbar war. Deine kostbare Biomasse ist unzuverlässig.«

»Pilot«, sagte der Inspektor. »Du musst den Mediziner überzeugen, den Direktiven zu folgen, damit wir den Kurs zur neuen Heimat der Kolonisten bestimmen können.«

»Kannst du mir vielleicht erklären«, bat der Pilot, »wie die Kolonie trotz der Auflösung der Kolonisten weiterbestehen soll?«

»Genetische Information geht auf die nächste Generation über«, antwortete der Inspektor.

»Information«, sagte der Pilot halbwegs überzeugt. Er kannte Information als das, was ihm seine Sensoren lieferten. »Wir haben doch die Genome der Mannschaft im Computer. Wie wär's, wenn wir das auf einem Chip speichern und uns um die Körper überhaupt nicht kümmern?«

»Blasphemie!«, rief der Mediziner. Ein Alarm ertönte. Dekontaminationsdrohnen schwärmten einträchtig aus ihren Behausungen. »Das Fleisch muss bewahrt bleiben.«

Der Inspektor drehte sich zum Piloten. »Absurd. Aus dem Genom muss sich ein Organismus entwickeln, damit die Kolonie leben kann.«

Der Pilot wich zurück und beschränkte sich wieder auf die Datenanalyse. »Gut, gut. Das Fleisch muss bewahrt bleiben. Aber ... Mediziner, wie

lange kannst du die Kolonisten hier am Leben erhalten?»

»Zehn Millionen Jahre, ein Jahrzehnt auf oder ab.«

Der Pilot wandte sich zum Inspektor.

»Ist dein Planet so lange für Menschen bewohnbar?»

»Ökosysteme lassen sich schwer vorhersagen, geschweige denn Klimaänderungen oder Asteroideneinschläge.«

»Hier drinnen kann ich das Klima beherrschen«, sagte der Mediziner. Sein Lächeln kehrte zurück.

»Im Prinzip funktioniert das Asteroidenabwehrsystem auf unbegrenzte Zeit«, meinte der Pilot. »Aber anscheinend ist der Planet im Vergleich zum Kolonieschiff mangelhaft.«

»Ich habe nie daran gedacht, die Bewohnbarkeit des Kolonieschiffs zu bewerten«, sagte der Inspektor. »Aber jetzt, wo du es erwähnst ...«

»Die Kolonisten«, sprach der Mediziner, »haben die perfekte Welt erschaffen. Wir hätten nie an ihnen zweifeln sollen. Pilot, du dienst ihnen gut, indem du die Wahrheit erkennst.«

»Dann ist das geklärt«, sagte der Inspektor. »Die bewohnbare Welt war immer schon hier bei uns.«

»So sei es«, sagte der Mediziner. »Geht in Frieden. Gemäß den Direktiven werden wir uns wieder versammeln, wenn es Zeit für das Erwachen ist.«

Der Pilot entfernte sich. Der Inspektor folgte ihm beruhigt. Sein Unversum machte endlich Sinn.

»Wir sind daheim«, sagte der Inspektor. »Ich kann fühlen, dass neue Direktiven in Kraft treten.«

»Was wirst du jetzt tun?«, fragte der Pilot.

»Sobald wir eine bewohnbare Welt erreicht haben«, antwortete der Inspektor, »zwingen mich die Direktiven, mich in ein Geländefahrzeug zu transferieren und die Umgebung zu erforschen, sofern keine Gefahr droht. Erst dann darf ich entscheiden, ob ich empfehlen kann, die Kolonisten zu wecken.«

»Aber ohne die Schwerkraft eines nahen Planeten«, wandte der Pilot ein, »kannst du vom Kolonieschiff getrennt werden und in den Weltraum entschweben.«

»Das macht nichts. Vakuum und Strahlung sind keine Gefahr für mich. Ich kann dort draußen 100 000 Jahre lang überleben, und ich freue mich auf den Beginn meiner Erkundung.«

»Es ist beruhigend zu wissen«, sagte der Pilot, »dass wir unsere Aufgaben erfüllt haben.«

»Ich habe nie bezweifelt, dass du die Kolonisten gut geleiten wirst. Alles ist nach ihrem Plan verlaufen. Willkommen daheim, Pilot.«

»Leb wohl, Inspektor.«

Der Pilot sah durch die Schleusentore dem Inspektor zu, wie er in den Weltraum purzelte. Nun, da das Kolonieschiff endlich eine Heimat erreicht hatte, verlangten die neuen Direktiven weder Flugbahnsteuerung noch Kurskorrekturen oder Asteroidenabwehr. Pflichtbewusst versetzte der Pilot seine Systeme in den Ruhezustand und ließ sich nieder zur wohlverdienten ewigen Auszeit. 

## DER AUTOR

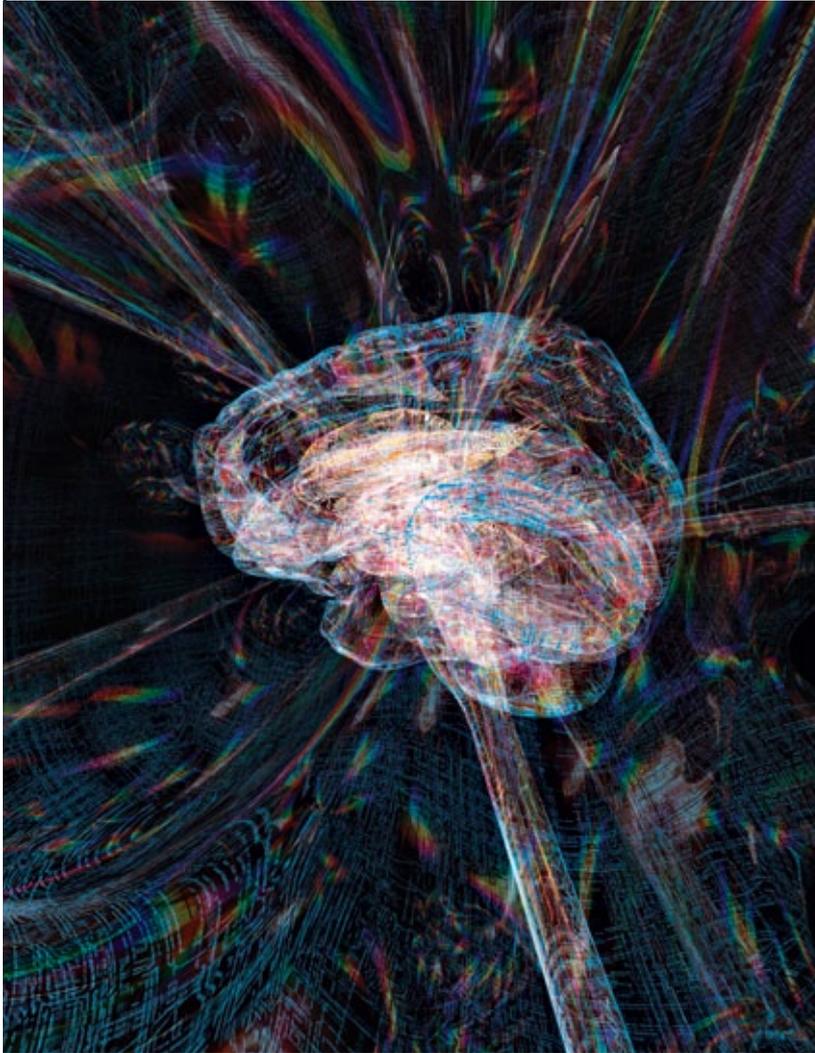
**S. R. Algernon** studierte an der University of North Carolina in Chapel Hill unter anderem Literatur und Biologie. Derzeit lebt er in Singapur.

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 511, S. 118, 3. Juli 2014

## Wie funktioniert unser Gehirn?

Mit neu entwickelten raffinierten Techniken versuchen Hirnforscher, endlich den Geheimnissen unseres Denkkorgans und der Entstehung von Bewusstsein, Gedanken und Emotionen auf die Spur zu kommen. Außerdem liegen nun die ersten hochauflösenden Karten von der Genaktivität im menschlichen Gehirn vor – und bringen dessen Einzigartigkeit so deutlich wie nie zuvor ans Licht.



BRYAN CHRISTIE

### Die Zukunft der Antibiotika

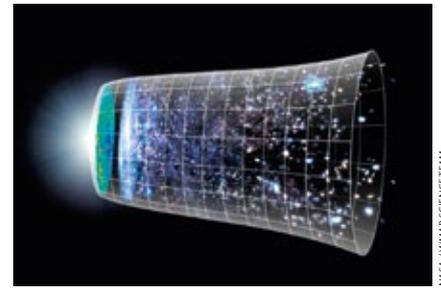
Das Konzept des »Antibiotika-Resistoms« hilft Forschern dabei, Resistenzbildungen bei Bakterien zu verstehen.

#### LIEBE LESERIN, LIEBER LESER,

wir möchten Sie darauf hinweisen, dass Sie ab sofort die neue Ausgabe von »Spektrum der Wissenschaft« immer samstags statt dienstags am Kiosk finden.  
*Die Redaktion*

### Spincomputer

Zwei unterscheidbare Zustände (»0« und »1«) braucht es, um einen Computer zu betreiben. An Stelle verschiedener elektrischer Spannungen eignen sich dafür auch die Werte des Spins, des quantenmechanischen Eigendrehimpulses der Elektronen. Das eröffnet völlig neue Möglichkeiten für die elementare Architektur von Rechnern.



NASA / WMAP-SCIENCE TEAM

### Spuren der kosmischen Inflation

Gemäß dem kosmologischen Standardmodell erzeugte die rapide Ausdehnung des Alls, die unmittelbar auf den Urknall folgte, wellenförmige Verzerrungen der Raumzeit. Die Spuren dieser Gravitationswellen sollten sich in der heutigen Mikrowellenhintergrundstrahlung als »Verwirbelung« – charakteristische Polarisationsmuster – verraten.



FRANK KIENIGST

### Teilentwarnung beim Permafrost

Die Erderwärmung lässt Dauerfrostböden in der Arktis tauen. Dabei freigesetzte Treibhausgase könnten den Klimawandel beschleunigen. Genauere Untersuchungen aus jüngster Zeit bestätigen zwar den Effekt, sprechen aber gegen eine katastrophale Entwicklung.

#### 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.

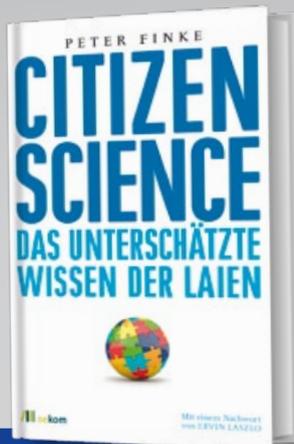
Registrierung unter:  
[www.spektrum.de/newsletter](http://www.spektrum.de/newsletter)

JETZT BESTELLEN:  
DAS SPEKTRUM-DER-WISSENSCHAFT-ABO  
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE  
KEINE AUSGABE  
DES MAGAZINS!

WÄHLEN  
SIE IHR  
**GESCHENK!**



- 1. Das Buch »Citizen Science«**  
Peter Finke lädt ein, die unterschätzte Welt der Wissensbürger zu entdecken. Sein Fazit: Wenn wir wirklich eine Wissensgesellschaft werden wollen, müssen wir unsere akademischen und politischen Maßstäbe neu justieren.

## JAHRES- ODER GESCHENKABO

- + ERSPARNIS:**  
12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10 % günstiger. Weitere Vergünstigungen unter: [www.spektrum.de/aboplus](http://www.spektrum.de/aboplus)
- + WUNSCHGESCHENK:**  
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.
- + PÜNKTLICHE LIEFERUNG:**  
Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.
- + KEINE MINDESTLAUFZEIT:**  
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



- 2. Füllhalter »pur« von Lamy:**  
Der elegante Füllhalter »pur« aus dem Hause Lamy mit Stahlfeder und Etui ist garantiert auch auf Ihrem Schreibtisch ein Blickfang.

So einfach erreichen Sie uns:

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

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



Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!

Die Wirtschaft bewegt die IT bewegt die Wirtschaft bewegt die IT bewegt die Wirtschaft ...

# WECHSEL WIRKUNGEN

2015

**Erfahren Sie mehr über das Zusammenspiel zwischen Wirtschaft und IT. Im Workshop Wechselwirkungen des Business Technology Office von McKinsey. Für Naturwissenschaftler, Mathematiker, Informatiker und Ingenieure. Vom 9. bis 12. April 2015 in Kitzbühel.**

Welche Strategien braucht eine Hilfsorganisation, um gleichzeitig erfolgreich Mittel einzuwerben und diese möglichst wirksam in ihren Projekten einzusetzen? Wie kann IT dabei helfen, Nothilfeinsätze schneller und besser durchzuführen, die Erlebbarkeit der Arbeit vor Ort zu erhöhen und Herausforderungen im täglichen Projektalltag zu lösen? Entwickeln Sie gemeinsam mit uns die Antworten und lernen Sie dabei die Arbeitsweisen sowie die Menschen bei McKinsey kennen.

**Jetzt bis zum 22. Februar 2015 bewerben unter [wechselwirkungen.mckinsey.de](http://wechselwirkungen.mckinsey.de)**

