

# Spektrum

der Wissenschaft

11.16

www.spektrum.de 11.16

Sie befinden sich hier!

# Laniakea

Unser kosmisches Zuhause  
in einer neuen Kartografie des Weltalls

**EBOLA** Die Spätfolgen der Seuche

**STEINZEIT** Das Anfertigen von Faustkeilen beflügelte das Denken

**ROBOTIK** So lernen Maschinen, auf zwei Beinen zu laufen

8,50 € (D/A/L) • 14,80 sFr. • D6179E  
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



# SciViews

Die besten Wissenschaftsvideos im Netz.



unsplash / Anna Demianenko / CCO

**SciViews** ist das neue Videoportal von **Spektrum der Wissenschaft**. Hier finden Sie die besten Webvideos rund um Wissenschaftsthemen, ausgewählt von unseren Redakteuren und vorgestellt von Fachjournalisten und Wissenschaftsbloggern.

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

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Mit den besten Videos unserer nationalen und internationalen Medienpartner:





# EDITORIAL SPEKTRUM ZEIGT WIRKUNG

Von Carsten Könneker, Chefredakteur  
[koenneker@spektrum.de](mailto:koenneker@spektrum.de)

Der wichtigste und von anderen Medien am stärksten beachtete Text, den **Spektrum** in den letzten zwölf Monaten publizierte, ist das Digital-Manifest aus Heft 1.16. Neun namhafte europäische Experten warnten gemeinsam vor Gefahren für unsere individuelle Freiheit und die Demokratie durch digitale Möglichkeiten der Verhaltenssteuerung. Zum Nachlesen: [spektrum.de/s/digitalmanifest](http://spektrum.de/s/digitalmanifest).

»Die Entwicklung verläuft von der Programmierung von Computern zur Programmierung von Menschen«, lautet eine der Thesen des Manifests. Wurde sie von der Politik wahrgenommen? Und hat seit der Veröffentlichung die Bedrohung durch Big Nudging, also die Manipulation des Einzelnen wie der Gesellschaft auf Grundlage von Big Data, eher zu- oder abgenommen? Fragen, die uns im Hinblick auf anstehende Wahlen im Aus- und Inland nicht kaltlassen können, zumal wenn es auf knappe Rennen hinausläuft.

Auf dem Heidelberg Laureate Forum, das jährlich im September die Träger von Fields-Medaille, Abel-Preis und Turing Award versammelt – gewissermaßen die »Nobelpreisträger der Mathematik und Informatik« –, diskutierte Dirk Helbing, einer der Autoren des Digital-Manifests, mit weiteren internationalen IT-Experten über die Licht- und Schattenseiten von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz. In den Fachzirkeln ist die Diskussion demnach angekommen. Am Rande der Veranstaltung führte ich mit Helbing ein Interview zur Rezeption des Manifests. Dieses habe eine »Lawine losgetreten« und für ein erhebliches Mehr an Aufmerksamkeit gesorgt. Währenddessen sei das Problem jedoch nicht geringer geworden. So hätten automatisierte Twitter-Nachrichten von eigens dafür programmierten Social-Media-Accounts im Vorfeld der Brexit-Abstimmung massiv Stimmung für den Austritt Großbritanniens aus der Europäischen Union gemacht. Für Helbing hat der Einsatz dieser Social Bots das Ausscheiden der Briten aus der EU mitverursacht. Immerhin habe die Politik das Problem des verantwortlichen Umgangs mit künstlicher Intelligenz inzwischen aufgenommen. Die deutschen Wissenschaftsakademien wurden beauftragt, Empfehlungen für den Umgang mit den neuen Technologien zu formulieren.

Nachdenklich grüßt Ihr

PS: Das aktuelle Interview mit Dirk Helbing finden Sie unter:  
[www.spektrum.de/news/wie-social-bots-den-brexite-verursachten/1423912](http://www.spektrum.de/news/wie-social-bots-den-brexite-verursachten/1423912)



## NEU AM KIOSK AB 28.10.!

Warum die großen Tyrannosaurier nur einen kurzen Siegeszug führten, beleuchtet unser **Spektrum Spezial** Biologie – Medizin – Hirnforschung 4/2016.

## AUTOREN DIESER AUSGABE



### NOAM I. LIBESKIND R. BRENT TULLY

Die beiden amerikanischen Kosmologen kamen per Computersimulation unserem kosmischen Zuhause auf die Spur: einem ungeheuren Galaxiensuperhaufen namens Laniakea (S. 12).



BRIAN METZ, EMORY PHOTO

### DIETRICH STOUT

Ohne ausgefeilte Steinzeittechnologien – Faustkeile – wären viele unserer Hirnverbindungen nicht entstanden (S. 30). Das untermauerte der Anthropologe Dietrich Stout von der Emory University mittels eigener Muskelkraft!



### FRIEDERIKE SCHUECKING-JUNGBLUT

Die Theologin erforscht an der Universität Heidelberg, wie die in den Höhlen von Qumran entdeckten antiken biblischen Schriften einst entstanden (S. 60).

## 3 EDITORIAL

## 6 SPEKTROGRAMM

Popcorn in der Nordsee

Extrem langsamer Pulsar

Kegelschnecken jagen mit Turboinsulin

Rauchringe im Laserlicht

Stärkere Extremnieder-schläge durch wärmeres Mittelmeer

Schlange frisst Echse frisst Käfer

Vier Giraffenarten statt einer

## 20 FORSCHUNG AKTUELL

### **Emiliana huxleyi – die Grenzen der Toleranz**

Eine winzige Kalkalge als wichtiges Zahnrad im Getriebe des Weltklimas

### **Proxima b: Unser unbekannter Nachbar**

Um den nächstgelegenen Stern Proxima Centauri kreist ein erdähnlicher Planet. Ist er vielleicht sogar bewohnbar?

### **Erleuchtete Siliziumchips**

Optische und elektronische Komponenten auf gemeinsamer Grundlage vereint

### **Hawking-Strahlung im Labor**

Die akustische Variante eines Schwarzen Lochs strahlt so, wie man es von ihrem kosmischen Vorbild erwartet.

## 29 SPRINGERS EINWÜRFE

### **Welt ohne Geld**

Manchmal erweisen sich alternative Methoden, Handel zu betreiben, als sinnvoller.

## 56 SCHLICHTING!

### **Die schmale Insel der Behaglichkeit**

Zu wohliger Wärme gehören neben der richtigen Raumtemperatur auch Luftfeuchtigkeit und Strahlungsbilanz.

## 12 ASTRONOMIE UNSER KOSMISCHES ZUHAUSE

Die Milchstraße erweist sich als Teil eines gigantischen Superhaufens von Galaxien, der eine der größten Strukturen im bekannten Universum bildet. Die Astronomen haben dem Gebilde den Namen Laniakea – hawaiianisch für »unermesslicher Himmel« – gegeben. Mit dieser Entdeckung kann eine neue Vermessung des Alls beginnen.

Von Noam I. Libeskind und R. Brent Tully

## 30 HIRNEVOLUTION WIE MACHT MAN EINEN FAUSTKEIL?

Welche Bedeutung hatte das Herstellen von Steinwerkzeugen für die Gehirn- und Sprachentwicklung des Menschen? Um diese Frage zu klären, schlagen Forscher Faustkeile und legen sich selbst in den Hirnscanner.

Von Dietrich Stout

## 38 MEDIZIN EBOLAS ZWEITER ANGRIFF

Viele Überlebende der Ebolaepidemie von 2014 leiden heute unter Hirnfunktionsstörungen und anderen schweren Beeinträchtigungen. Die Gründe dafür sind vermutlich persistierende Ebolaviren und Überreaktionen des Immunsystems.

Von Seema Yasmin

## 46 VOYAGER-MISSION BLICK ÜBER DEN SOLAREN TELLERRAND

**Serie: Unbekanntes Terrain im Sonnensystem (Teil 2)** Eine jahrzehntelange Reise führte die Voyager-Sonden bis an die Grenze zum interstellaren Raum. Das ermöglicht uns heute einzigartige Einblicke in Regionen, in denen galaktische Materie auf die Teilchenströme unseres Heimatsterns prallt.

Von Stamatios M. Krimigis und Robert B. Decker

## 60 QUMRAN KULTORT, SCHREIBSTUBE, WISSENSPEICHER

**Serie: Magie der Schrift (Teil 3)** Hunderte Schriftrollen lagen fast 2000 Jahre in Höhlen am Toten Meer verborgen. Wer dieses Archiv religiöser Texte schuf, ist nach wie vor unklar.

Von Friederike Schuecking-Jungblut

## 66 WELTERNÄHRUNG GEGEN SALZ GEFEIT

Weil die Ackerböden der Welt in dramatischem Maß versalzen, versuchen Agrarforscher daran angepasste Nutzpflanzen zu züchten – mit ersten Erfolgen.

Von Mark Harris

## 70 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN MAGISCHE STIFTE

Es wirkt wie Zauberei: Mit Filzschreiber gezeichnete bunte Linien ändern ihre Farbe, wenn man mit einem farblosen Stift darüber hinwegstreicht. Doch die Magie entpuppt sich als raffinierte Chemie.

Von Matthias Ducci und Marco Oetken

## 76 ROBOTIK MASCHINEN AUF ZWEI BEINEN

Längst gibt es eine Vielzahl rollender, krabbelnder, fliegender Automaten. Warum ist es dann so ungemein schwierig, einen Roboter zu bauen, der gehen kann?

Von John Pavlus

DANIEL ROMARÉDE / IROU / GEA, PARIS / SACKAY



# 12

TITELTHEMA  
**UNSER  
KOSMISCHES ZUHAUSE**

GREGORY MILLER



# 30

HIRNEVOLUTION  
**FAUSTKEILE HAUEN HILFT  
DEM DENKEN**

GETTY IMAGES / AFP / KENZOU TROBUILIARD



# 38

MEDIZIN  
**EBOLAS ZWEITER ANGRIFF**



# 60

QUMRAN  
**KULTORT, SCHREIBSTUBE, WISSENSPEICHER**

ANG IMAGES / BIBLE LAND PICTURES, BIBELANDPICTURES.COM

83 FREISTETTERS FORMELWELT  
**Im Gleichgewicht der Kräfte**  
Die wunderbare Funktion von Lagrange – simpel und doch vielfältig einsetzbar.

84 REZENSIONEN  
**Fritz Schade, Harald Jockusch:** Betörend, berauschend, tödlich  
**Heather Couper, Nigel Henbest:** Space  
**Anja Klußmeier:** Transformation  
**Truls Wyller:** Was ist Zeit?  
**Ian Stewart:** Unglaubliche Zahlen  
**Philip Häusser:** Phil's Physics

93 ZEITREISE  
Vom gerichtsfähigen Röntgenbild zur Erdbebenvorhersage

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III  
**Krieg und Frieden im Multiversum**  
Ein Spiel mit Extradimensionen

97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

Titelbild: Agentur FOCUS / Science Photo Library / Mark Garlick



**Alle Artikel auch digital auf Spektrum.de**

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

# SPEKTROGRAMM





## POPCORN IN DER NORDSEE

► Nach Unfällen auf See gelangen oft Öl und andere giftige Substanzen ins Wasser und treiben auf der Oberfläche. Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wollen das Verhalten solcher schwimmenden Gefahrstoffe besser verstehen und Techniken für deren Überwachung erproben. Darum haben sie am 8. September insgesamt 50 Kubikmeter Popcorn in die Nordsee gekippt und das Verdriften mit Peilsendern, Satelliten und von einem Flugzeug aus verfolgt. Auf Nachfrage verriet das DLR ein Detail: Das Popcorn war geschmacksneutral und weder süß noch salzig – Letzteres zumindest bis zum Eintreffen im Meer.

NASA / CIC / PENN STATE / G. GARMIRE ET AL.



**Röntgenlichtaufnahme des Supernova-Überrests RCW 103. Die Bildfarben zeigen, von Rot über Grün nach Blau ansteigend, die Energie der Röntgenstrahlung an. Der helle Punkt in der Bildmitte ist Pulsar 1E 161348-5055.**

## ASTRONOMIE EXTREM LANG- SAMER PULSAR

► Pulsare sind rotierende Neutronensterne, deren Magnetfeld-Symmetrieachse von der Rotationsachse abweicht. Sie senden einen Kegel elektromagnetischer Strahlung ins All – vor allem Radiowellen –, der sich zusammen mit ihnen ständig dreht. Objekte, die der Kegel überstreicht, empfangen regelmäßig wiederkehrende (pulsierende) Radiosignale.

Mit einer Dichte von einer Sonnenmasse pro 30-Kilometer-Kugel sind Pulsare extrem kompakt. Sie stellen so etwas wie gigantische Atomkerne dar. Typischerweise rotieren sie mehrere hundert Mal pro Sekunde und werden dabei allmählich

langsamer. Man kennt auch Exemplare, die sich einmal alle paar Sekunden um sich selbst drehen. Der Pulsar 1E 161348-5055 jedoch rotiert einmal in 6,7 Stunden und bildet somit eine krasse Ausnahme. Er liegt inmitten des Supernova-Überrests RCW 103, rund 10 000 Lichtjahre von uns entfernt. Die Sternexplosion, aus der er hervorging, ereignete sich erst vor 2000 Jahren, das ist für astronomische Verhältnisse sehr wenig. Was den Pulsar in dieser kurzen Zeitspanne auf eine derart niedrige Drehgeschwindigkeit abbremste, war bislang unklar.

Astronomen um Nanda Rea von der Universität Amsterdam haben nun Daten der Nasa-Forschungssatelliten »Chandra«, »Swift«

und »NuSTAR« ausgewertet. Die Geräte auf diesen Satelliten, unter anderem Röntgenteleskope, zeichneten einen Röntgenausbruch des Pulsars im Juni 2016 auf. Die Messungen sprechen dafür, dass es sich bei dem Pulsar um einen Magnetar handelt, einen Neutronenstern mit extrem starkem Magnetfeld, milliardennal stärker als das Erdmagnetfeld. Möglicherweise liegt hier die Erklärung, warum der Pulsar so langsam rotiert: Staubige Überreste der Supernova, aus der er hervorgegangen ist, könnten von dem Magnetfeld eingefangen werden und auf den Neutronenstern zurückstürzen, so dass er immer schwerer wird und seine Winkelgeschwindigkeit entsprechend abnimmt.

*ApJL 828, L13, 2016*

## BIOLOGIE KEGELSCHNECKEN JAGEN MIT TURBOINSULIN

► Kegelschnecken produzieren eine Insulinvariante, die deutlich schneller wirkt als das im Menschen vorkommende Hormon. Diese Erkenntnis kann möglicherweise helfen, neue therapeutische »Turboinsulinpräparate« zu entwickeln.

Um Fische zu erbeuten, geben Kegelschnecken (*Conidae*) das Hormon Insulin ins Wasser ab. In der Nähe befindliche Fische nehmen es über ihre Kiemen auf, worauf ihr Blutzuckerspiegel so stark absinkt, dass sie einen hypoglykämischen Schock erleiden und wehrlos werden.

Forscher um Michael Lawrence von der University of Melbourne (Australien) haben nun herausgefunden, dass die Weichtiere das Hormon in einer besonders rasch wirkenden Form erzeugen. Die Insulinvariante der Landkarten-Kegelschnecke (*Conus geographus*) beispielsweise bindet etwa dreimal so schnell an menschliche Insulinrezeptoren wie derzeit verfügbare Insulinpräparate für Diabetiker – zumindest in



**Die Gehäuse der Landkarten-Kegelschnecken werden bis zu 17 Zentimeter lang.**

Laborversuchen. Der Studie zufolge liegt das an der chemischen Struktur der Schneckenhormone. Ihnen fehlt ein Teil der so genannten B-Kette, wodurch sie kleiner sind als humane Insulinmoleküle und weniger dazu neigen, zusammenzukleben. Die menschliche Hormonvariante lagert sich im Körper jeweils zu sechst zusammen und benötigt dann immer eine gewisse Zeit, um wieder in Einzelmoleküle zu zerfallen, die an den Insulinrezeptor docken können.

*Nat. Struct. Mol. Biol.* 10.1038/nsmb.3292, 2016

## OPTIK RAUCHRINGE IM LASERLICHT

► Physiker um Howard Milchberg von der University of Maryland haben bei intensiven Laserstrahlen eine neue Art von Energiewirbeln entdeckt. Diese Lichtmodulationen unterscheiden sich fundamental von der Polarisation – der Schwingungsrichtung der elektromagnetischen Welle, die in vielen etablierten Anwendungen schon lange eine Rolle spielt. Bei den neu entdeckten Lichtmodu-

lationen umschließen »Spatiotemporal Optical Vortices« (STOV, deutsch: räumlich-zeitliche optische Wirbel) genannte Zonen das Laserlicht ringförmig und wirken entlang seiner Bewegungsrichtung. Sie entstehen, weil die Phase – die relative Lage von Wellenbergen und -tälern – im Zentrum des Laserstrahls zunehmend von der in seinen Randbereichen abweicht, während sich der Strahl in Luft oder einem anderen Medium ausbreitet.

Um diesen »Gangunterschied« auszugleichen, entstehen Wirbel, in denen

sich die Phase um die Achse des Rings dreht – ähnlich wie die Luft in einem Torus aus Zigarettenrauch. Infolgedessen wandert die Lichtintensität über den Querschnitt des Laserstrahls symmetrisch von innen nach außen und zurück, während der Strahl fortschreitet. Die Forscher vermuten auf Grund von Simulationen, dass STOVs nicht nur bei starken Lasern auftreten, sondern ein allgemeines Phänomen darstellen, das sich wie die Polarisation zur Datenübertragung oder Bildgebung nutzen lässt.

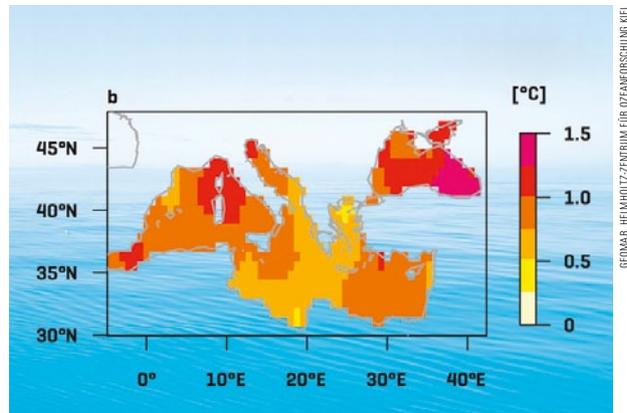
*Phys. Rev. X* 6, 031037, 2016

## KLIMAFORSCHUNG STÄRKERE EXTREMNIEDERSCHLÄGE DURCH WÄRMERES MITTELMEER

► Der Klimawandel lässt Wassertemperaturen im Mittelmeer steigen, was Starkregenereignisse in Deutschland wahrscheinlicher macht. Zu diesem Ergebnis kommt eine Studie unter der Leitung des Geomar Helmholtz-Zentrums für Ozeanforschung Kiel. Ein Team um Claudia Volosciuk hat dazu ein Zirkulationsmodell der Atmosphäre verwendet.

Über dem Mittelmeer bilden sich immer wieder Tiefdruckgebiete, die in nordöstliche Richtung ziehen und dabei feuchte Luftmassen nach Mitteleuropa transportieren. Dort regnen sie ab und sorgen zum Teil für heftige Niederschläge. Meteorologen bezeichnen diese Tiefdruckgebiete als »Vb-Zyklone« – ein Name, den der deutsche Meteorologe Wilhelm Jacob van Bebber bereits 1891 prägte.

Wegen des Klimawandels steigen die durchschnittlichen Wassertemperaturen im Mittelmeer seit den 1970er Jahren an. In den Sommermonaten ist diese Erwärmung jeweils besonders ausgeprägt. Höhere Wassertemperaturen bedeuten mehr Verdunstung und somit mehr Luftfeuchtigkeit, die mit Vb-Zyklonen nach Europa gelangt und dort als Regen zu Boden geht. Sommerliche Starkregenereignisse in Deutschland und angrenzenden Ländern werden deshalb heftiger. Laut den Ergebnissen der Studie sind sie zwischen 2000 und 2012 um 17 Prozent stärker gewesen als zwischen 1970



**Anstieg der durchschnittlichen Oberflächentemperaturen im Mittel- und Schwarzen Meer, jeweils von Juni bis August im Zeitraum 2000 bis 2012 gegenüber 1970 bis 1999.**

und 1999. Die Modellrechnungen ergaben eine ausgeprägte Zunahme gerade in solchen Regionen, in denen sich in den zurückliegenden Jahren tatsächlich Extremniederschläge mit Überflutungen ereignet haben: im Osten Österreichs und Deutschlands, im südlichen Polen und in der Slowakei.

Laut Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert, die von zunehmenden atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen ausgehen, werden die Wassertemperaturen im Mittelmeer weiter steigen. Dies könnte die Starkregenfälle in Zentraleuropa zusätzlich intensivieren.

*Sci. Rep.* 6, Artikelnummer 32450, 2016



Die Überreste der Echse liegen entlang des rot hervorgehobenen Bereichs; den Ort des Käfers zeigt der gelbe Pfeil.

SMITH, K.T. ET AL.: FOSSIL SNAKE PRESERVING THREE TROPHIC LEVELS AND EVIDENCE FOR AN ONTOGENETIC DIETARY SHIFT. IN: PALAEOBIODIVERSITY AND PALAEOENVIRONMENTS, 10.1007/S12549-016-0244-1, 2016, FIG. 1, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## PALÄO BIOLOGIE SCHLANGE FRISST ECHSE FRISST KÄFER

Wissenschaftler haben ein spektakuläres Fossil gefunden. Es handelt sich um die versteinerten Überreste einer Schlange, in deren Magen eine Echse zu erkennen ist, die wiederum einen Käfer verspeist hat. Eine solche dreigliedrige, fossile Nahrungskette sei äußerst ungewöhnlich, heißt es seitens des Senckenberg-Forschungsinstituts (Frankfurt am Main): Weltweit kenne man nur einen vergleichbaren Fund.

Das Ausnahmefossil aus der Grube Messel bargen Forscher bereits 2009. Es stammt aus dem mittleren Eozän und ist etwa 48 Millionen Jahre alt. Krister Smith vom Senckenberg-Institut und sein argentinischer Kollege Agustín Scanferla haben die Überreste jetzt mit einem hochauflösenden Computertomografen untersucht. Demnach handelt es sich bei der versteinerten Schlange um eine *Palaeophyton fischeri*, eine Verwandte der heutigen Boas. Sie war gut einen Meter lang und

somit noch recht klein; vermutlich ein Jungtier. Die 20 Zentimeter lange Echse im Innern der Schlange gehörte der Spezies *Geiseltaliellus maarius* an: baumlebende Reptilien, die möglicherweise einen Scheitelkamm trugen und ihren Schwanz bei Gefahr abwerfen konnten, was dieses Exemplar aber nicht tat. Den Käfer in der Echse können die Forscher nicht mehr eindeutig bestimmen, dafür ist er zu schlecht erhalten. Sein Fund belegt jedoch, dass *G. maarius* auch Insekten verzehrte – bisher hatte man im Verdauungstrakt fossiler Tiere dieser Spezies nur pflanzliche Überreste gefunden.

Angesichts dessen, dass die Echse noch sehr gut erhalten ist, muss die Schlange kurz nach der Nahrungsaufnahme verendet sein, höchstens ein bis zwei Tage später. Auf dem Grund des Messelsees ist sie dann offensichtlich rasch konserviert worden.

*Palaeobio. Palaeoenv. 10.1007/s12549-016-0244-1, 2016*

## BIOLOGIE VIER GIRAFFEN- ARTEN STATT EINER

► Neue Untersuchungen belegen, dass es vier Giraffenspezies gibt statt nur einer, wie bislang angenommen. Das ist für Artenschützer eine wichtige Erkenntnis, denn einige dieser Spezies sind gefährdet.

Bisher ging man davon aus, dass alle Giraffen zu einer einzigen Art *Giraffa camelopardalis* gehören. Diese teilte man anhand von Fleckenmustern, Hörnern und Verbreitungsgebieten in üblicherweise neun Unterarten auf. Forscher um Axel Janke vom Senckenberg Biodiversität und Klima

Forschungszentrum (Frankfurt M.) haben nun umfangreiche Gentests an Gewebeproben von 141 wild lebenden Tieren vorgenommen. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass vier verschiedene Giraffenarten existieren, die sich in freier Wildbahn nicht zur Fortpflanzung mischen: die nördliche, die südliche, die Massai- und die Netzgiraffe. Obwohl sich deren Vertreter äußerlich stark ähneln, sind die genetischen Unterschiede zwischen ihnen etwa so groß wie die zwischen Eis- und Braunbären. Zwei der neu postulierten Giraffenarten lassen sich in Unterarten aufteilen. Einige der zuvor angenommenen Unterarten wiederum erwiesen sich in den Tests als identisch und



**Eine Herde angolanscher Giraffen im Nordwesten Namibias. Laut den Erkenntnissen kürzlicher Gentests gehören die Tiere zur Spezies der südlichen Giraffe.**

stellen wohl verschiedene Populationen der jeweils selben Unterart dar.

Giraffen galten bis dato nicht als gefährdete Spezies. Wenn sie sich jedoch in vier Gruppen untergliedern, die sich miteinander nicht

fortpflanzen, sieht die Sache anders aus. Denn von der Nordgiraffe gibt es schon heute weniger als 5000 Exemplare und von der Netzgiraffe weniger als 9000 in freier Wildbahn.

*Current Biology* 26, S. 1–7, 2016

**Spektrum**  
der Wissenschaft

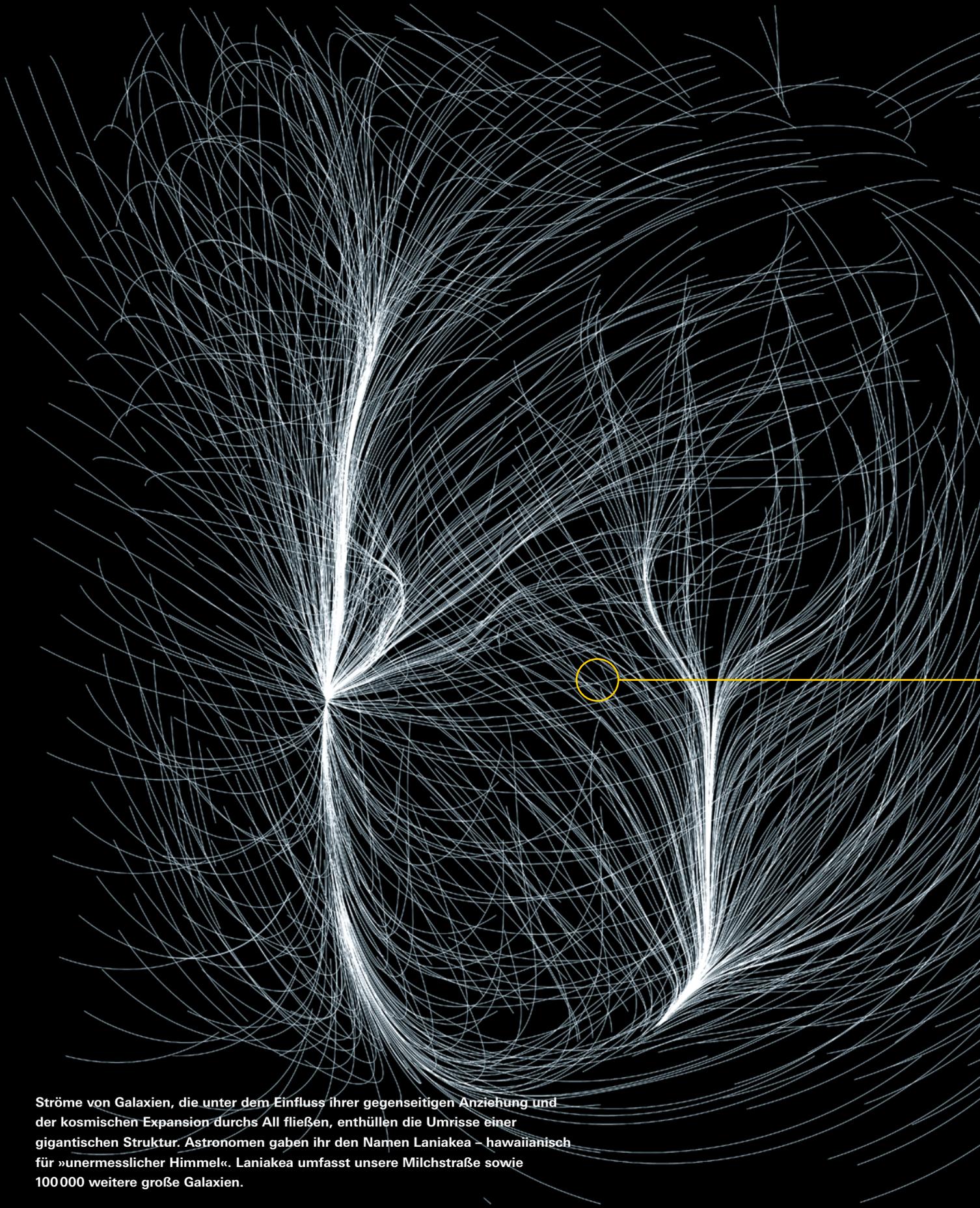
# SCHREIB- WERKSTATT

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  
Spektrum-Workshop »Wissenschaftsjournalismus«; Preis: € 139,- pro Person;  
Sonderpreis für Abonnenten: € 129,-

Telefon: 06221 9126-743 | [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)  
[spektrum.de/schreibwerkstatt](http://spektrum.de/schreibwerkstatt)



**Ströme von Galaxien, die unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen Anziehung und der kosmischen Expansion durchs All fließen, enthüllen die Umrisse einer gigantischen Struktur. Astronomen gaben ihr den Namen Laniakea – hawaiianisch für »unermesslicher Himmel«. Laniakea umfasst unsere Milchstraße sowie 100 000 weitere große Galaxien.**

# ASTRONOMIE UNSER KOSMISCHES ZUHAUSE

Die Milchstraße erweist sich als Teil eines gigantischen Galaxiensuperhaufens, der eine der größten Strukturen im uns bekannten Universum bildet. Mit dieser Entdeckung kann jetzt eine neue Vermessung des Alls beginnen.



**Noam I. Libeskind** (links) ist Kosmologe am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam. Er modelliert mit Supercomputern die Entwicklung des Universums und die Entstehung der Galaxien. **R. Brent Tully** ist Astronom an der University of Hawaii in Honolulu. Er vermisst seit 40 Jahren die Entfernung, Verteilung und Bewegung von Galaxien. Sein zusammen mit J. Richard Fisher 1987 publizierter »Atlas of Nearby Galaxies« ist bis heute der umfassendste Buchatlas unserer kosmischen Nachbarschaft.

► [spektrum.de/artikel/1420981](https://www.spektrum.de/artikel/1420981)

Sie  
befinden sich  
hier!

► Angenommen, Sie besuchen gerade eine weit entfernte Galaxie und möchten eine Postkarte an die Lieben daheim adressieren. Zuerst schreiben Sie darauf die Straße und Hausnummer sowie Ihren Wohnort auf dem dritten Planeten des Sonnensystems. Dann folgt der Ort der Sonne in dem nach Orion benannten Spiralarm der Milchstraße sowie die Lage der Milchstraße in der Lokalen Gruppe, einem Cluster von mehr als 50 benachbarten Galaxien, der sich über rund sieben Millionen Lichtjahre erstreckt. Die Lokale Gruppe liegt ihrerseits am Rand des Virgo-Haufens; das Zentrum dieses Clusters aus mehr als 1000 Galaxien ist rund 50 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Der Virgo-Haufen bildet wiederum nur einen kleinen Teil des Lokalen Superhaufens, der Hunderte von Galaxiengruppen umfasst und sich über mehr als 100 Millionen Lichtjahre ausdehnt. Solche Superhaufen gelten als die Komponenten der geräumigsten Strukturen im Universum, indem sie sich zu gigantischen Filamenten und Schichten von Galaxien anordnen, mit ebenso riesigen Leerräumen dazwischen.

Bis vor Kurzem hätte unsere kosmische Anschrift mit dem Lokalen Superhaufen geendet. Weitere Angaben hielt man für überflüssig, denn in noch größerem Maßstab – jenseits des Unterschieds zwischen galaktischen Schichten und Leerräumen – schien das Universum homogen zu sein. Doch 2014 entdeckte einer von uns (Tully), dass wir zu einer noch gewaltigeren Struktur gehören: Der Lokale Superhaufen ist nur der Zipfel eines viel größeren Gebildes mit einem Gesamtdurchmesser von 400 Millionen Lichtjahren und 100 000 großen Galaxien. Tullys Team taufte den monströsen Supercluster Laniakea – hawaiianisch für »unermesslicher Himmel« – zu Ehren der ersten polynesischen Seefahrer, die sich in den Weiten des pazifischen Ozeans an den Sternen orientierten. Unsere Milchstraße sitzt an Laniakeas äußerstem Rand.

Laniakea ist nicht bloß eine zusätzliche Zeile unserer kosmischen Adresse. Die Architektur und Dynamik dieser immensen Struktur verspricht Erkenntnisse über Vergangenheit und Zukunft des Universums. Denn indem wir ihre Galaxien vermessen und deren Verhalten beobachten, kommen wir dem Wesen der Dunklen Materie näher, die nach Überzeugung der Astronomen 80 Prozent des kosmischen Materials ausmacht.

### **Wie Ströme von Galaxien helfen, die tiefsten kosmischen Rätsel zu lösen**

Außerdem kann Laniakea dazu beitragen, das Geheimnis der Dunklen Energie zu lösen, die für die erst 1998 entdeckte Beschleunigung der kosmischen Expansion verantwortlich gemacht wird. Und schließlich muss der Superhaufen nicht unbedingt die letzte Zeile unserer kosmischen Adresse bedeuten, sondern mag Teil einer noch größeren, bisher unbekannteren Struktur sein.

Eigentlich suchte Tullys Team gar nicht nach einem Supercluster, sondern nach Antworten auf grundlegende Fragen der Kosmologie. Seit fast einem Jahrhundert ist be-

kannt, dass der Kosmos sich ausdehnt, wodurch sich die Galaxien voneinander entfernen wie Kleckse auf einem Luftballon, der aufgeblasen wird. Doch wie sich in den vergangenen Jahrzehnten herausstellte, streben die meisten Galaxien langsamer auseinander, als allein unter dem Einfluss der kosmischen Expansion zu erwarten wäre. Offenbar bremst die lokale Gravitationsanziehung anderer Materieansammlungen die Fluchtbewegung einzelner Galaxien. Die Differenz zwischen expansionsbedingter und lokaler Bewegung eines kosmischen Objekts heißt Pekuliargeschwindigkeit.

Doch selbst wenn wir sämtliche Sterne aller sichtbaren Galaxien zusammennehmen und das interstellare Gas und die übrige uns bekannte Materie dazutun, können wir mit deren Gravitationswirkung die beobachteten Pekuliargeschwindigkeiten höchstens zu einem Zehntel erklären. Was fehlt, bezeichnen die Astronomen aus Unwissenheit als Dunkle Materie. Man weiß nur: Sie besteht aus Teilchen, die mit dem übrigen Universum fast ausschließlich durch ihre Schwerkraft wechselwirken, und die Galaxien sind von großen Mengen Dunkler Materie umgeben, die als unsichtbares Gerüst deren Entstehung und Verhalten prägt.

Wie Tully und andere Forscher erkannten, kann eine Kartierung der galaktischen Ströme und Pekuliargeschwindigkeiten die verborgene kosmische Verteilung der Dunklen Materie offenbaren, indem sie deren Gravitationswirkung auf die Galaxienbewegung enthüllt. Wenn Ströme von Galaxien einem bestimmten Punkt zustreben, darf man annehmen, dass sie von der Schwerkraft einer besonders dichten Materieansammlung angezogen werden.

Eine Karte der Dichte und Verteilung aller Materieformen im Universum könnte vielleicht zudem das größte aller kosmologischen Rätsel lösen: Warum expandiert der Kosmos mit der Zeit immer schneller, statt sich unter der Gravitationsanziehung der in ihm enthaltenen Massen zunehmend langsamer auszudehnen?

Das ist fast so unerklärlich, als würde ein emporgeworfener Stein nicht wieder zur Erde fallen, sondern auf Nimmerwiedersehen am Himmel entschwinden. Der Antrieb dieses bizarren Phänomens wird Dunkle Energie genannt und entscheidet über die ferne Zukunft des Universums. Infolge der beschleunigten Expansion muss der Kosmos eigentlich einen kalten Tod erleiden: Die meisten Galaxien entfernen sich immer schneller voneinander, bis letztlich völlige Finsternis eintritt, da jeder Stern erlischt und die gesamte Materie den absoluten Nullpunkt der Temperatur erreicht.

Doch das Endzeitszenario hängt nicht nur vom künftigen Verhalten der Dunklen Energie ab, sondern auch von der Gesamtmenge der Massen im Universum. Bei genügend hoher Materiedichte wird die Expansion schließlich erlahmen, und das Universum muss dann unter dem Einfluss der Gravitation in sich zusammenfallen – oder die Dichte ist geringer und reicht gerade aus, eine unendliche, allmählich immer langsamere Expansion herbeizuführen.

Ursprünglich diente die Kartierung der Galaxienströme also dem Zweck, die kosmische Dichte der gewöhnlichen und der Dunklen Materie zu bestimmen – doch dabei wurde Laniakea entdeckt.

## **AUF EINEN BLICK DER SUPERHAUFEN LANIAKEA**

- 1** Sterne bilden Sternhaufen und Galaxien, und diese sammeln sich ihrerseits zu Haufen und Superhaufen. Die galaktischen Superhaufen ordnen sich zu kosmischen Filamenten, Schichten und Leerräumen. Es sind die größten Strukturen im Universum.
- 2** Neue Vermessungen der Galaxienbewegungen haben enthüllt, dass der Superhaufen, zu dem unsere Milchstraße gehört, viel größer ist als bisher angenommen. Die Astronomen haben das gigantische Gebilde Laniakea getauft.
- 3** Detaillierte »kosmografische« Karten von Laniakea und den benachbarten Superhaufen könnten Aufschluss über das rätselhafte Wesen von Dunkler Materie und Dunkler Energie geben – und damit über das Schicksal des Universums.



NASA / ESA / HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI / AURA)

**Galaxienhaufen wie der hier vom Hubble-Weltraumteleskop aufgenommene Coma-Cluster bilden die Bausteine der größten Strukturen im Universum. Der Coma-Haufen liegt mehr als 300 Millionen Lichtjahre von uns entfernt, enthält rund 1000 große Galaxien und ist selbst Teil eines noch größeren Gebildes, des Coma-Superhaufens, der nicht mehr zu Laniakea gehört.**

Um Galaxienströme zu vermessen, muss man die Bewegung einer Galaxie sowohl infolge der kosmischen Expansion als auch unter dem Einfluss benachbarter Materie untersuchen. Zunächst messen Astronomen die Rotverschiebung; sie wird größtenteils durch die Dehnung der Wellenlängen auf ihrem Weg durch den expandierenden Weltraum verursacht: Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, desto mehr wird ihre Strahlung in den langwelligen – »roten« – Bereich verschoben. Somit liefert die Rotverschiebung der Galaxie den Astronomen ein grobes Maß für deren Entfernung.

#### **Rotverschiebung durch kosmische Expansion und Pekuliargeschwindigkeit**

Zur beobachteten Rotverschiebung trägt aber auch die Pekuliargeschwindigkeit der Galaxie unter dem Einfluss von Materieansammlungen in ihrer Nähe bei. Die Eigenbewegung der Quelle staucht oder dehnt Wellenlängen gemäß dem bekannten, nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler (1803–1853) benannten Effekt: Die Sirene eines vorbeifahrenden Rettungswagens hören wir erst höher, dann tiefer.

Um den Anteil der in der beobachteten Rotverschiebung versteckten Pekuliargeschwindigkeit zu bestimmen, messen die Astronomen die Entfernung der Galaxie mit einer von

der Rotverschiebung unabhängigen Methode. Angenommen, die tatsächliche Entfernung der Galaxie beträgt 3,25 Millionen Lichtjahre; daraus würde eine expansionsbedingte Geschwindigkeit von 70 Kilometer pro Sekunde folgen. Wenn nun die beobachtete Rotverschiebung eine Geschwindigkeit von 60 Kilometer pro Sekunde ergibt, können die Astronomen schließen, dass Materie in der Nähe der Galaxie ihr eine Pekuliargeschwindigkeit von 10 Kilometer pro Sekunde verleiht.

Alle von der Rotverschiebung unabhängigen Entfernungsmessmethoden beruhen auf der Tatsache, dass die scheinbare Helligkeit einer Lichtquelle mit dem Quadrat des Abstands abnimmt. Wenn man zwei identische Leuchttürme beobachtet, von denen der eine nur ein Viertel so hell erscheint wie der andere, dann weiß man, dass er doppelt so weit entfernt ist. In der Astronomie heißen die identischen Lichtquellen Standardkerzen. Zu solchen astrophysikalischen Objekten, deren immer gleiche absolute Helligkeit gut bekannt ist, zählen bestimmte Typen explodierender oder pulsierender Sterne – oder sogar ganze Galaxien. Letztere haben Autor Tully und der US-Astronom J. Richard Fisher 1977 als Standardkerzen vorgeschlagen. Die Tully-Fisher-Beziehung besagt, dass massereiche Galaxien heller strahlen und zugleich schneller rotieren als kleine Systeme: Da Erstere mehr Sterne enthalten, müssen sie flinker krei-

# Die neue Hierarchie des Kosmos

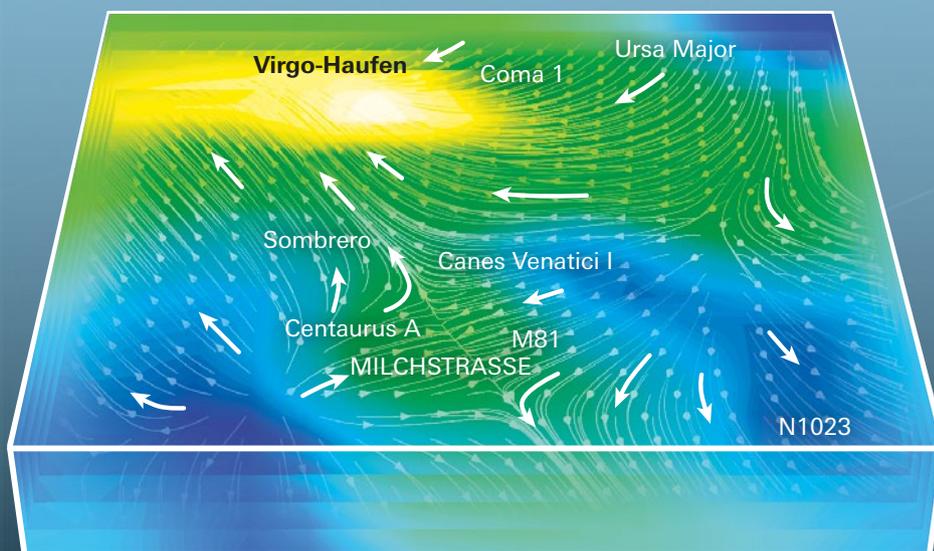
Obwohl Galaxien jeweils hunderte Milliarden Sterne enthalten, sind sie bei Weitem nicht die größten Strukturen im Universum. Unter dem Einfluss der Gravitationsanziehung können Hunderte von Galaxien einen Haufen bilden – und diese wiederum Superhaufen mit ihrerseits hunderttausenden Galaxien. Gemäß dieser Hierarchie lautete die kosmische Adresse unseres Sonnensystems bisher: Milchstraße, Lokale Gruppe, Virgo-Haufen und schließlich Lokaler Superhaufen. Doch wie sich nun herausstellt, ist unser Lokaler Superhaufen nur Teil eines mehr als 100-mal größeren Superhaufens namens Laniakea – auf Hawaiïanisch »unermesslicher Himmel«.

## Der Laniakea-Superhaufen

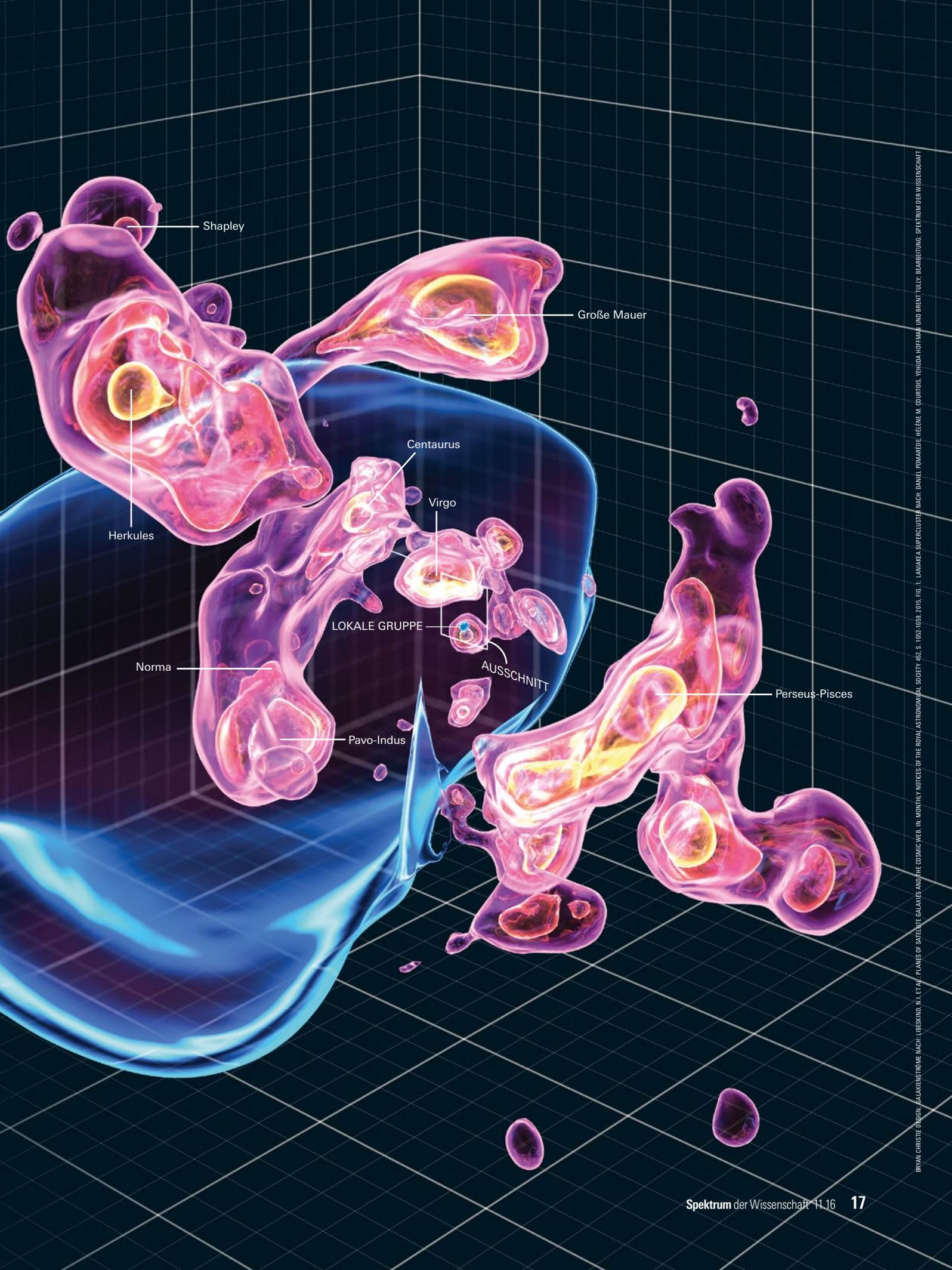
Alle Galaxien unterliegen zwei gegensätzlichen Einflüssen: Die kosmische Expansion treibt sie voneinander fort, die Gravitation zieht sie zueinander. Die Grenzen der Supercluster liegen dort, wo die Schwerkraft der Galaxien die Expansionsbewegung deutlich zu hemmen beginnt. Die Karte (rechts) umfasst Orte und Bewegungen von mehr als 8000 Galaxien. Die wärmeren Farben (gelb und rosa) bezeichnen Galaxienhaufen, die sich schnell zusammenziehen. Der Umriss von Laniakea erscheint in kühlerem Blau; dort konvergieren die Haufen am langsamsten. Laniakea umfasst ein Gebiet von fast einer halben Milliarde Lichtjahren Durchmesser, in dem sich alle Galaxien ohne die Wirkung der kosmischen Expansion zu einem einzigen von der Gravitation gebundenen Gebilde zusammenziehen würden. Jenseits der Grenzen von Laniakea liegen unter anderem die Superhaufen Shapley, Herkules und Perseus-Pisces.

## Galaxienströme in unserer Nachbarschaft

Ein dreidimensionaler Ausschnitt von Laniakea zeigt feinere Details, die neue Erkenntnisse über die Verteilung der Dunklen Materie und die Galaxienentwicklung liefern können (unten). Die Pfeile bezeichnen Galaxienströme, die hin zu Gebieten hoher Dichte und starker Gravitation fließen (wärmere Farben) und weg von Regionen niedriger Dichte (kühlere Farben). Starke Strömungen offenbaren hohe Konzentrationen gewöhnlicher und Dunkler Materie. Wie Messungen von Autor Noam Libeskind zeigen, stürzt die Lokale Gruppe parallel zu einem 50 Millionen Lichtjahre langen Filament aus Dunkler Materie in Richtung Virgo-Haufen (gelb) – einer Ansammlung von mehr als tausend Galaxien in einem Volumen von nur 13 Millionen Lichtjahren Durchmesser. Solche Filamente spielen offenbar eine wichtige Rolle für die Galaxienentstehung und -entwicklung.



GRENZE  
VON  
LANIAKEA



Shapley

Große Mauer

Herkules

Centaurus

Virgo

LOKALE GRUPPE

Norma

Pavo-Indus

AUSSCHNITT

Perseus-Pisces

BRYAN CHRISTIE DUNSON, GALAXIENSTRÖME NACH LIBESKIND, N. ET AL., PLANES OF SATELLITE GALAXIES AND THE COSMIC WEB. IN: MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY 452, S. 1082-1098, 2015. FIG. 1. LANIAKEA SUPERCLUSTER NACH DANIEL POMAREDE, HELENE M. COURTOIS, YEHUDA HOFFMAN UND BRENT TULLY. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

sen, um trotz ihres stärkeren Schwerefelds stabil zu bleiben. Man misst also die Rotationsgeschwindigkeit der Galaxie und erhält damit die absolute Helligkeit; aus deren Vergleich mit der scheinbaren Helligkeit ergibt sich die Entfernung.

Jeder Standardkerzentyp eignet sich für einen bestimmten Entfernungsbereich. Pulsationsveränderliche Sterne wie die Cepheiden sind nicht besonders hell und lassen sich deshalb nur gut beobachten, wenn ihre Heimatgalaxie in der Nähe der Milchstraße liegt. Die Tully-Fisher-Beziehung ist für viele Spiralgalaxien verwendbar, ergibt deren Entfernung aber bloß mit einer Unsicherheit von bis zu 20 Prozent. Supernovae vom Typ Ia liefern zwar Messungen mit halb so großer Unsicherheit und leuchten über riesige kosmische Entfernungen, sind aber selten: Selbst in einer großen Galaxie erstrahlt solch ein explodierender Stern durchschnittlich pro Jahrhundert nur einmal.

Wenn Astronomen die Pekuliargeschwindigkeiten einer über das gesamte All verteilten Stichprobe von Galaxien kennen, können sie selbst die ausgedehntesten Galaxienströme vermessen. In dieser enormen Größenordnung gleicht die galaktische Strömung einem Flusssystem, das sich durch kosmische Einzugsgebiete windet und dabei der Gravitation benachbarter Strukturen gehorcht. Auf solchen »kosmografischen« Karten bilden die Galaxien Flüsse, Wirbel und Seen, aus denen indirekt Struktur, Dynamik, Ursprung und Zukunft der größten Materieansammlungen im Universum hervorgehen (siehe »Die neue Hierarchie des Kosmos«, S. 16/17).

Um unsere Fragen über Dunkle Materie und Dunkle Energie zu behandeln, waren umfassende Daten möglichst

Einzugsgebiet streben alle Galaxien einem gemeinsamen Punkt oder Attraktor zu – wie Wasser, das sich am tiefsten Punkt einer Landschaft sammelt. Ohne die kosmische Expansion würden sich diese Galaxien zu einem kompakten, durch Schwerkraft gebundenen Gebilde vereinen. Insgesamt bildet der riesige Schwarm den Laniakea-Superhaufen.

Die Bewegungen im Schwarm lassen sich gut mit heutigen Modellen für die kosmische Verteilung der Dunklen Materie erklären. Außerdem scheint die Gesamtdichte der sichtbaren und Dunklen Materie in Laniakea für das derzeit favorisierte Endzeitszenario zu sprechen, wonach die Dunkle Energie das Universum für immer beschleunigt ausdehnt und ihm einen kalten Tod beschert.

Das sind freilich vorläufige Befunde. Derzeit sind die Pekuliargeschwindigkeiten nur für 20 Prozent der Galaxien in dem Superhaufen bekannt, und viele Entfernungsmessungen mit Standardkerzen bleiben sehr unsicher.

### Unser Standort auf der neuen kosmografischen Karte

Eine imaginäre Reise durch unsere neu entdeckte Heimat Laniakea beginnt auf der Erde. Diese wandert mit rund 30 Kilometer pro Sekunde um die Sonne, die ihrerseits mit 200 Kilometer pro Sekunde das galaktische Zentrum umkreist. Die gesamte Lokale Gruppe einschließlich der Milchstraße rast mit mehr als 600 Kilometer pro Sekunde auf eine geheimnisvolle Massenkonzentration im Sternbild Centaurus (Zentaur) zu.

Wenn wir die Milchstraße verlassen, begegnen wir zwei »nur« 180 000 bis 220 000 Lichtjahre entfernten Zwerggalaxien, der Kleinen und Großen Magellanschen Wolke. Sie erscheinen an unserem Südhimmel und lassen sich am besten von der Antarktis aus im Winter sehen. Für das bloße Auge ist sonst nur noch die Andromeda-Galaxie in klaren Nächten als schwaches Fleckchen sichtbar.

Diese mächtige Spiralgalaxie liegt 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt und bewegt sich mit einer Pekuliargeschwindigkeit von 110 Kilometer pro Sekunde auf uns zu. In ungefähr vier Milliarden Jahren wird Andromeda frontal mit der Milchstraße zusammenstoßen und beide Galaxien in ein strukturloses Ellipsoid aus alten roten Sternen verwandeln. Unser Sonnensystem dürfte davon kaum tangiert werden; dafür sind die Abstände zwischen den Sternen zu groß. Milchstraße, Andromeda und vier Dutzend weitere Galaxien gehören zur Lokalen Gruppe, die mit ihrer Schwerkraft die kosmische Expansion überwindet und langsam kollabiert. Wie die Milchstraße mit ihren Magellanschen Wolken haben all diese großen Galaxien ihr Gefolge von Zwerggalaxien.

Jenseits der Lokalen Gruppe, in einem rund 25 Millionen Lichtjahre großen Gebiet, erscheinen auf unserer Karte drei auffällige Gebilde. Die meisten Galaxien dieser Region, unsere Milchstraße eingeschlossen, bilden die Lokale Schicht. Diese ist sehr dünn: Ihre Galaxien liegen nur höchstens drei Millionen Lichtjahre entfernt von der Äquatorebene des so genannten supergalaktischen Koordinatensystems. Unterhalb dieser Ebene liegen in einigem Abstand ein Filament von Galaxien – der Leo-Sporn – sowie die Galaxien der Antlia- und Dorado-Wolken. (Die lateinischen Namen bezeichnen die Sternbilder Löwe beziehungsweise Luftpum-



ESO / LUIS CALÇADA

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema  
Kosmologie finden Sie unter  
[spektrum.de/t/kosmologie](http://spektrum.de/t/kosmologie)

vieler Beobachtungsprogramme erforderlich. 2008 publizierten Tully und Hélène M. Courtois, die jetzt am Institut de Physique Nucleaire de Lyon in Frankreich arbeitet, mit ihren Kollegen den Cosmicflows-Katalog, der zahlreiche Daten zur Dynamik von 1800 Galaxien bis zu einer Entfernung von 130 Millionen Lichtjahren zusammentrug. 2013 schuf das Team den erweiterten Cosmicflows-2-Katalog, der die Bewegungen von rund 8000 Galaxien in einem Raumgebiet mit einem Radius von 650 Millionen Lichtjahren verzeichnet. Ein Teammitglied, Yehuda Hoffman von der Hebräischen Universität Jerusalem, entwickelte präzise Methoden, um aus den Pekuliargeschwindigkeiten der Cosmicflows-Daten auf die Verteilung der Dunklen Materie zu schließen.

Aus der Datenflut schälte sich schließlich ein unerwartetes Muster heraus: die Umrisse einer nie gesehenen kosmischen Struktur. In einem mehr als 400 Millionen Lichtjahre großen

# Alles in allem gleicht unsere kosmische Umgebung einem riesigen Pfannkuchen aus galaktischen Superhaufen

pe und Schwertfisch.) Oberhalb der Ebene gibt es kaum etwas; dort herrscht der Lokale Leerraum.

Betrachtet man nur die Galaxien innerhalb der Lokalen Schicht, so sieht alles ganz friedlich aus. Diese Galaxien streben im Tempo der kosmischen Expansion auseinander; ihre durch lokale Wechselwirkungen verursachten Pekuliargeschwindigkeiten sind klein. Auch die unterhalb der Lokalen Schicht liegenden Galaxien der Antlia- und Dorado-Wolken und des Leo-Sporns haben geringe Pekuliargeschwindigkeiten, bewegen sich aber sehr schnell auf die Lokale Schicht zu. Daran ist wahrscheinlich der Lokale Leerraum schuld. Leerräume expandieren wie aufgeblasene Luftballons; an ihren Rändern sammelt sich Materie, weil sie von verdünnten zu verdichteten Regionen wandert und kosmische »Mauern« bildet. Letztlich ist die Lokale Schicht eine Mauer des Lokalen Leerraums, und dessen Expansion treibt uns abwärts zu Antlia, Dorado und Leo.

Weiter draußen begegnen wir dem Virgo-Haufen (benannt nach dem Sternbild Jungfrau), der das Dreihundertfache der Lokalen Gruppe in ein Volumen mit 13 Millionen Lichtjahren Durchmesser quetscht. Seine Galaxien flitzen mit rund 700 Kilometer pro Sekunde umher; in einem Umkreis von 25 Millionen Lichtjahren stürzen alle Galaxien außerhalb des Haufens auf ihn zu und binnen zehn Milliarden Jahren in ihn hinein. Der gesamte Einflussbereich des Virgo-Clusters hat gegenwärtig einen Radius von 35 Millionen Lichtjahren. Interessanterweise liegt unsere Milchstraße mit einem Abstand von 50 Millionen Lichtjahren knapp außerhalb dieser Einfangzone.

## Was liegt jenseits von Laniakea?

Das größere, bis zu uns reichende Gebiet um den Virgo-Cluster heißt Lokaler Superhaufen. Vor fast 30 Jahren entdeckte eine Gruppe von Astronomen mit dem Spitznamen »Die sieben Samurai«, dass sich nicht nur die Milchstraße, sondern der gesamte Lokale Superhaufen mit hunderten Kilometern pro Sekunde auf Centaurus zubewegt. Sie nannten die mysteriöse Masse, die alle diese Galaxien anzieht, den Großen Attraktor. In vieler Hinsicht ist der Große Attraktor gar nicht so geheimnisvoll: In dieser Richtung ist die Massendichte offensichtlich hoch, denn dort liegen innerhalb eines 100 Millionen Lichtjahre großen Gebiets sieben mit dem Virgo-Cluster vergleichbare Haufen – insbesondere Norma (Winkelmaß), Centaurus und Hydra (Wasserschlange).

Eigentlich verstehen wir unter Superhaufen kosmische Einzugsgebiete, deren Grenzen durch gegensätzliche Galaxienbewegungen festgelegt sind. Insofern trägt der Lokale Superhaufen einen falschen Namen, denn er ist nur Teil von etwas Größerem – eben Laniakea –, das noch andere Groß-

strukturen umfasst, wie das Pavo-Indus-Filament (lateinisch für das Sternbild Pfau-Indianer) sowie den Ophiuchus-Haufen (nach dem griechischen Namen des Sternbilds Schlangenträger). Wenn wir Laniakea mit einer Stadt vergleichen, wäre der Große Attraktor die verkehrsreiche Innenstadt. Wie bei den meisten Stadtzentren fällt es schwer, den genauen Mittelpunkt anzugeben, aber er liegt ungefähr zwischen dem Norma- und dem Centaurus-Haufen. Unsere Milchstraße befindet sich weit draußen in einer Vorstadt, die schon fast an den Rand eines benachbarten Superhaufens namens Perseus-Pisces grenzt (Pisces ist der lateinische Name des Sternbilds Fische). Dieser Rand liegt uns nahe genug, so dass wir ihn detailliert untersuchen können, um Laniakeas unscharfe, halbwegs runde Grenze zu definieren; sie umschließt ein Volumen mit einem Durchmesser von einer halben Milliarde Lichtjahre. Insgesamt enthält Laniakea eine Menge an gewöhnlicher und Dunkler Materie, die rund 100 Millionen Milliarden Sonnenmassen entspricht.

Eine grobe Ahnung von den außerhalb von Laniakea liegenden Strukturen besitzen Astronomen schon seit Jahrzehnten. Bald nachdem die sieben Samurai den Großen Attraktor entdeckt hatten, zeichnete sich direkt hinter ihm, aber dreimal weiter entfernt, eine monströse Ansammlung von Clustern ab – die dichteste im lokalen Universum. Seit der US-Astronom Harlow Shapley (1885–1972) in den 1930er Jahren erste Indizien dafür aufspürte, heißt dieses ferne Riesengebirge Shapley-Superhaufen. Zufällig liegt es wie die Lokale Schicht, der Virgo-Haufen und der Große Attraktor in der supergalaktischen Äquatorebene. Somit gleicht unsere kosmische Umgebung einem riesigen Pfannkuchen aus galaktischen Superhaufen.

Was verursacht die Pekuliargeschwindigkeit unseres Lokalen Superclusters von 600 Kilometer pro Sekunde? Bis zu einem gewissen Grad muss der Große Attraktor daran schuld sein. Doch wir sollten auch die Gravitationsanziehung des Shapley-Superhaufens in Betracht ziehen; er ist zwar dreimal weiter entfernt, umfasst aber viermal so viele Haufen. Gemäß dem Cosmicflows-2-Katalog, dem wir auch die Entdeckung von Laniakea verdanken, könnte sogar noch mehr im Spiel sein. Die Pekuliargeschwindigkeiten der 8000 im Katalog erfassten Galaxien zeigen eine gemeinsame Strömung zum Shapley-Superhaufen an. Dieser Fluss betrifft den gesamten Katalogbereich mit einem Durchmesser von 1,4 Milliarden Lichtjahren.

Ist unser kosmisches Zuhause damit endgültig umschrieben? Das wissen wir nicht. Erst noch größere Surveys, die noch riesigere Abschnitte des Universums vermessen, werden die ultimative Struktur enthüllen, die den Strom der Galaxien in unserer kosmischen Umgebung anzieht. ◀

## QUELLEN

**Courtois, H. M. et al.:** Cosmography of the Local Universe. In: *Astronomical Journal* 146, 69, 2013

**Libeskind, N. I. et al.:** Planes of Satellite Galaxies and the Cosmic Web. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452, S. 1052–1059, 2015

**Tully, R. B. et al.:** The Laniakea Supercluster of Galaxies. In: *Nature* 513, S. 71–73, 2014

## UMWELT

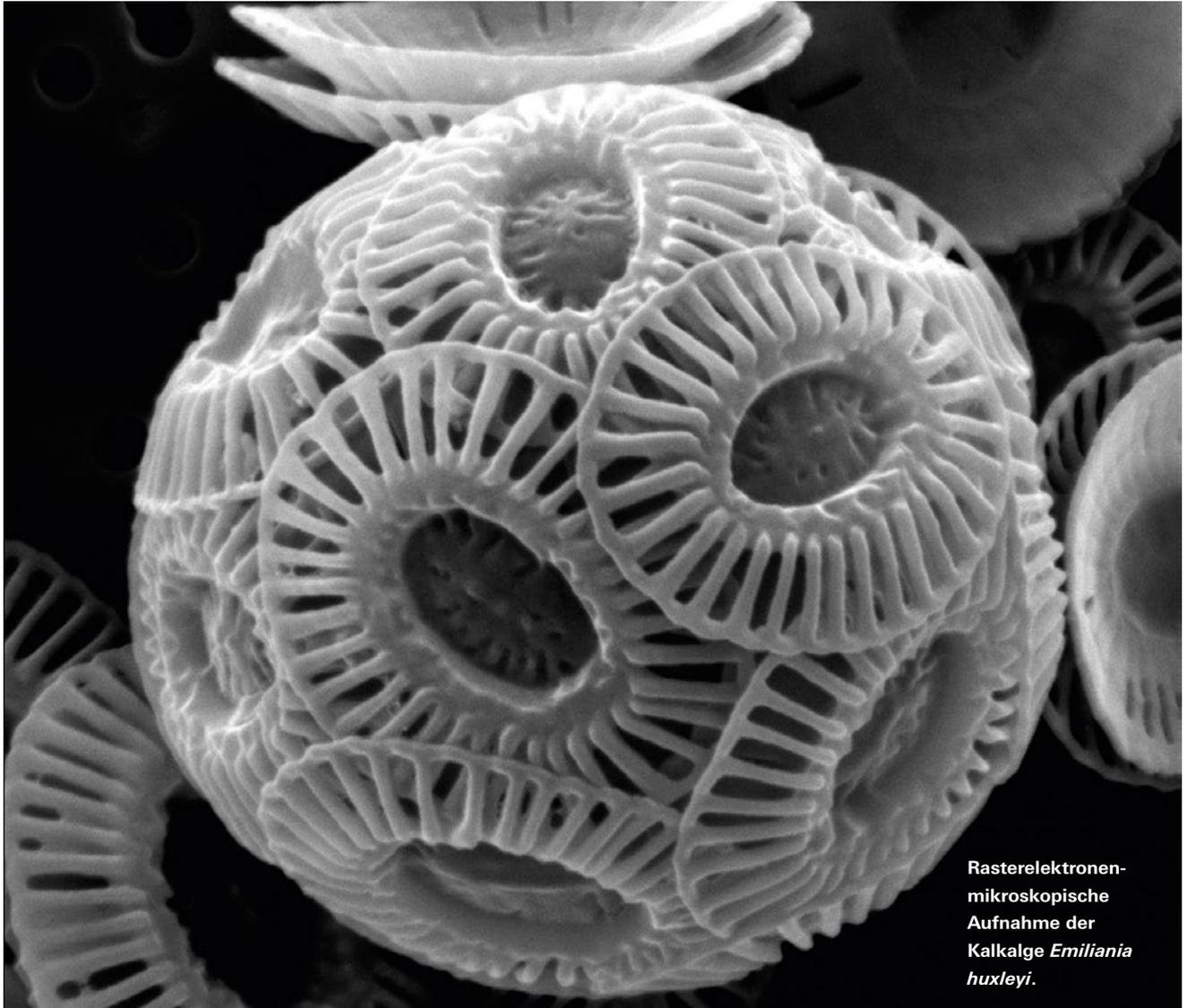
### **EMILIANA HUXLEYI – DIE GRENZEN DER TOLERANZ**

**Die Kalkalge *Emiliana huxleyi* wächst in allen Ozeanen weltweit außer an den Polen und stabilisiert den Kohlenstoffkreislauf der Erde. Doch die zunehmende Versauerung ihres Habitats bedroht sie – und beeinflusst so wiederum das Klima.**

► Nur etwa fünf Tausendstel Millimeter misst die Mikroalge *Emiliana huxleyi* im Durchmesser, bildet aber mit Quadrillionen von Artgenossinnen riesige Algenteppiche in den Weltmeeren, deren Lichtreflexionen in Phasen massenhafter Vermehrung («Algenblüte») sogar von Satelliten aus sichtbar sind. Sie trägt eine Hülle aus filigranen

Kalkplättchen, und ihre fossilen Überreste sammelten sich gemeinsam mit denen anderer Kalkalgen in den letzten 200 Millionen Jahren zu Sedimenten von mehreren hundert Meter Dicke. An vielen Küsten ragen diese heute als Kalkfelsen aus dem Meer. Wegen ihrer Eigenschaften und ihrer Verbreitung gilt *Emiliana huxleyi*, kurz Ehux genannt, als wichtigste Kalkalge der Welt: Unter etwa 200 heute lebenden Arten planktonischer Kalkalgen ist sie die häufigste. Doch ihre Fähigkeit, Kalk zu bilden, ist in der Zukunft gefährdet.

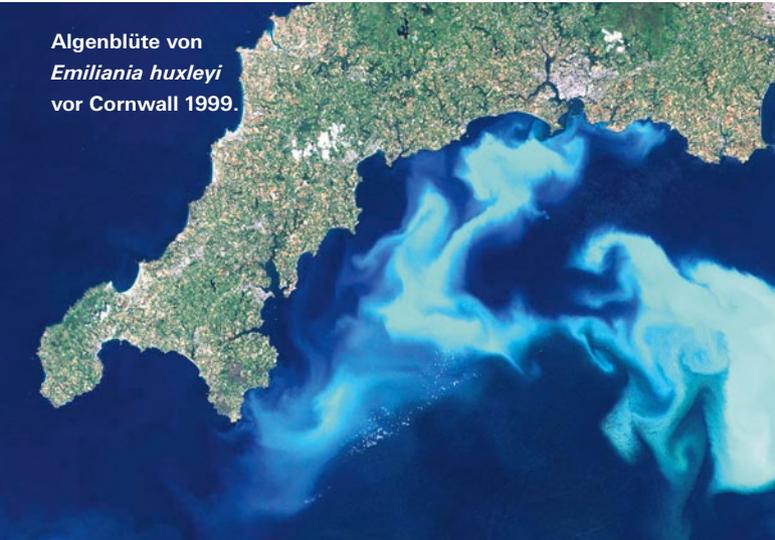
Schuld daran trägt der stetig wachsende Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre. Als unmittelbare Folge davon lösen sich in den Weltmeeren schon heute jährlich etwa zwei bis drei Milliarden Tonnen Kohlendioxid. Da das Wasser mit dem Gas zu Kohlensäure reagiert, wird es saurer. Außerdem steigen die Temperaturen, auch in den Ozeanen. Das macht vielen Meeresbewohnern Schwierigkeiten, weil ihr Organismus nicht damit umgehen kann oder



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Kalkalge *Emiliana huxleyi*.

GERAUL LANGER, ALFRED WEGENER-INSTITUT, MIT FRIEDL. GEN. DER PRESSESTELLE DES AWI

Algenblüte von  
*Emiliana huxleyi*  
vor Cornwall 1999.



NASA / LANDSAT / ANDREW WILSON UND STEVE GROOM

weil ihre Nahrungsgrundlage oder ihr Lebensraum beeinträchtigt werden.

Anders als etwa Korallen könnten sich aber Mikroalgen wie *Ehux* eventuell doch recht gut an künftig verschärfte Bedingungen anpassen. *Ehux* besitzt eine große genetische Vielfalt, die es ihr leicht macht, kalte wie warme Ozeane mit variablem Salzgehalt zu tolerieren. Zudem durchläuft sie als Einzeller innerhalb eines Tages einen Vermehrungszyklus, so dass genetische Mutationen den Mikroorganismus bereits im Verlauf weniger Wochen deutlich verändern können. Und als pflanzliche Alge könnte sie sogar von dem zusätzlichen Kohlendioxid profitieren und besser wachsen.

»Die gegenwärtigen Bedingungen sind für *Emiliana huxleyi* noch kein Problem«, sagt Lothar Schlüter vom Geomar Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel. Dort demonstrierte ein einjähriges Laborexperiment 2012, dass die Alge in der Tat schneller wächst, wenn sie höheren Kohlendioxidpegeln in wärmerem Wasser ausgesetzt wird. Nach anfänglichen Schwierigkeiten kann sie sogar im gleichen Maß wie zuvor Kalk bilden.

Eine Verlängerung dieses Evolutionsversuchs auf vier Jahre zeigte Schlüter und seinem Team jedoch die Grenzen der Anpassungsfähigkeit auf. Nach mehr als 2000 Generationen unter Verhältnissen, wie sie bei konstant steigenden Kohlendioxidemissionen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet werden, kann die Alge zwar noch Kalk bilden. Das geschieht aber in weit geringerem Maß als bei Artgenossen, die dem sauren Milieu erstmals ausgesetzt sind. Ihre Nachkommen erreichen nicht länger die ursprüngliche Größe und binden weniger Kohlenstoff in der Zelle. Erst eine Rückkehr zu Normalbedingungen bringt sie wieder auf volle Leistung, wie die kürzlich veröffentlichte Langzeitstudie zusammenfasst.

Schlüter räumt ein, dass andere Stämme der sehr variablen *Emiliana huxleyi* unterschiedliche Reaktionen zeigen könnten. Es sei aber deutlich geworden, dass Anpassung nicht immer stetig und manchmal auch ungünstig verlaufe.

Noch nach vielen Generationen sind unerwartete Wendungen möglich.

Zudem bestätigt das Langzeitexperiment – das erste dieser Dauer – einen Trend, der sich bereits aus den bisherigen Forschungen an Kalk bildenden Algen ablesen ließ. Koautor Ulf Riebesell, Professor für Ozeanografie am Geomar, verglich dazu eine Reihe von Labor- wie auch Feldstudien. Die meisten kommen zu dem Ergebnis, dass *Emiliana huxleyi* und andere Kalkalgen bei hohem Kohlendioxidpegel entweder deutlich weniger Kalk bilden oder aber sehr viel mehr Energie aufnehmen müssen. Letzteres ist jedoch nicht immer möglich.

Die Bildung der filigranen Kalkplättchen ist ein aufwändiger Prozess, für den die Alge im Zellinneren optimale Bedingungen schaffen muss. Ansonsten bleiben die Baustoffe gelöst. Wenn sich in der Umgebung der pH-Wert ändert, kann sie zwar lernen, intern gegenzusteuern. Die Energie, die sie dafür einsetzt, muss sie aber zusätzlich aufnehmen – oder sie fehlt ihr an anderer Stelle.

Wenn die Algen künftig kleiner werden, wird das weit reichende Folgen für höhere Organismen haben. Denn *Ehux* gehört als Phytoplankton zum unteren Ende der Nahrungskette, wo sie tierischem Plankton wie etwa winzigen Schnecken oder Ruderfußkrebsen als Mahlzeit dient. »Fressfeinde wählen ihre Nahrung nach Größe aus«, erklärt Schlüter. »Einige könnten zwar kleinere Kalkalgen attraktiver finden, andere hingegen werden nach Alternativen suchen. Arten können zurückgehen, wenn ihre bevorzugte Nahrung nicht mehr in der gewohnten Größe zur Verfügung steht.« Möglicherweise verändert dies das gesamte Ökosystem.

Zweifellos können manche Algenstämme auch weiterhin robuste Kalkhüllen bauen. Untersuchungen an Eiskernen aus der Antarktis zeigen jedoch bereits für die 40 000 Jahre vor der industriellen Revolution eine Verschiebung hin zu Arten mit leichteren Schalen. In diesem Zeitraum stieg der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre von etwa 200 auf 280 Parts per Million (ppm). In den nächsten 80 Jahren könnte er von heute 400 auf 780, vielleicht sogar auf 1000 ppm, also ein Promille klettern. Selbst Forscherteams, die der Kalkalge gute Chancen ausrechnen, erwarten, dass sich die Zusammensetzung der Populationen in den warmen, sauren Ozeanen der Zukunft verändern und die Kalkbildung abnehmen wird.

### Wozu dienen die Kalkplättchen?

Laut Riebesell könnte *Emiliana huxleyi* an Konkurrenzfähigkeit einbüßen, wenn der Aufwand für Kalkbildung zu hoch wird: »Es kann sein, dass sie sich in ihrer ökologischen Nische nicht mehr durchsetzt.« Einige der Folgen lassen sich erst absehen, wenn man mehr über die Funktion der Kalkplättchen weiß. Möglicherweise schirmen diese so genannten Coccolithen einen Teil der intensiven UV-Strahlung ab, der *Ehux* als Bewohnerin der obersten Wasserschicht stark ausgesetzt ist. Gleichzeitig könnten sie aber auch mehr Licht in die Zelle hineinfokussieren und so die Fotosynthese fördern, heißt es in einer aktuellen Studie zu den Hintergründen der Kalkbildung. An ihr arbeitete unter

anderem der Biogeochemiker Lennart Bach vom Geomar mit. Dort untersucht zurzeit ein Team von Wissenschaftlern, inwieweit die Kalkhülle Viren das Eindringen erschwert oder die Alge gegen ihre Fressfeinde schützt. »Kalkalgen werden stärker als andere Plankton-Organismen unter dem Klimawandel leiden«, fasst Bach die bisherigen Erkenntnisse zusammen.

Zudem könnte sich ihm zufolge ein Rückgang der Kalkalgen wiederum auf das Klimasystem auswirken. Denn pflanzliches Plankton bindet bei der Fotosynthese beträchtliche Mengen Kohlendioxid. EhuX' Kalkplättchen dienen als Ballast, wenn die Überreste des Planktons mit den Exkrementen der Fressfeinde zum Meeresgrund sinken. Gewöhnlich wird das Kohlenstoffkalkgemisch dort unter weiteren Sedimenten begraben und so dem Kreislauf geologisch betrachtet für lange Zeit entzogen. Verringert sich diese Menge, können die Ozeane die Atmosphäre nicht mehr wie bisher entlasten.

Nachteile für das Klima hätte ein Schwinden der EhuX-Populationen auch aus einem weiteren Grund: *Emiliania huxleyi* ist als potenzielle Wolkenmacherin bekannt, denn sie produziert ein schwefelhaltiges Gas namens Dimethylsulfid (DMS), aus dem beim Aufstieg in die Luft Wolkenkondensationskeime in Form von Sulfaten entstehen. DMS ist über weite Areale der Meere eine Hauptquelle solcher Keime, ohne die aus Wasserdampf keine Wolken würden. Die Wolkendecke reflektiert wiederum einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung.

In wärmeren und saureren Ozeanen geht die Produktion von DMS aber massiv zurück, stellte Katharina Six vom Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg 2013 in einer Serie von Computersimulationen fest. »Seither hat sich der Kohlendioxidausstoß entsprechend dem Business-as-usual-Szenario entwickelt, das die Basis der Studie bildete«, konstatiert Six. Wenn in Folge geringerer DMS-Emissionen weniger Wolken die Sonneneinstrahlung abschirmen, könnte die mittlere Temperatur im Jahr 2100 um fast ein halbes Grad höher liegen, als die Modelle voraussagen, die dem Pariser Klimaabkommen vom Dezember 2015 zu Grunde liegen. ◀

**Silke Schilling** ist Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

## QUELLEN

**Lohbeck, K. T. et al.:** Adaptive Evolution of a Key Phytoplankton Species to Ocean Acidification. In: Nature Geoscience 5, S. 346–351, 2012

**Meyer, J., Riebesell, U.:** Reviews and Syntheses: Responses of Coccolithophores to Ocean Acidification: a Meta-Analysis. In: Biogeosciences 12, doi:10.5194/bg-12-1671-2015, 2015

**Monteiro, F. M. et al.:** Why Marine Phytoplankton Calcify. In: Science Advances 2, doi:10.1126/sciadv.1501822, 2016

**Schlüter, L. et al.:** Long-Term Dynamics of Adaptive Evolution in a Globally Important Phytoplankton Species to Ocean Acidification. In: Science Advances 2, doi:10.1126/sciadv.1501660, 2016

**Six, K. D. et al.:** Global Warming Amplified by Reduced Sulphur Fluxes as a Result of Ocean Acidification. In: Nature Climate Change 3, S. 975–978, 2013

## EXOPLANETEN PROXIMA B: UNSER UNBEKANNTER NACHBAR

**Unser nächster Nachbarstern in der Milchstraße, Proxima Centauri, hat einen Planeten. »Proxima b« ist nicht viel größer als die Erde und kreist in der temperierten Zone seines Sterns. Doch ist er auch bewohnbar?**

► Nüchtern betrachtet ist »Proxima b« nur einer von inzwischen über 3400 bekannten Planeten bei fernen Sonnen. Und doch regt er unsere Fantasie an wie kein zweiter: Er ist der bei Weitem nächstgelegene Planet außerhalb unseres Sonnensystems. Sollte jemals eine interstellare Sonde zu einem anderen Stern geschickt werden, dürfte Proxima b ihr Ziel sein. Vorerst aber werden solche Ideen Sciencefiction bleiben. Unsere Raumsonden haben bislang nur einen Bruchteil der 4,2 Lichtjahre zurückgelegt, die uns vom Nachbarstern Proxima Centauri und seinem Planeten trennen. Mit der Geschwindigkeit der amerikanischen Sonde Voyager 1, gestartet im Jahr 1977, würde eine solche Reise rund 80 000 Jahre dauern. Astronomen werden also bei der Erforschung des Planeten weiter auf erdgebundene Observatorien setzen müssen.

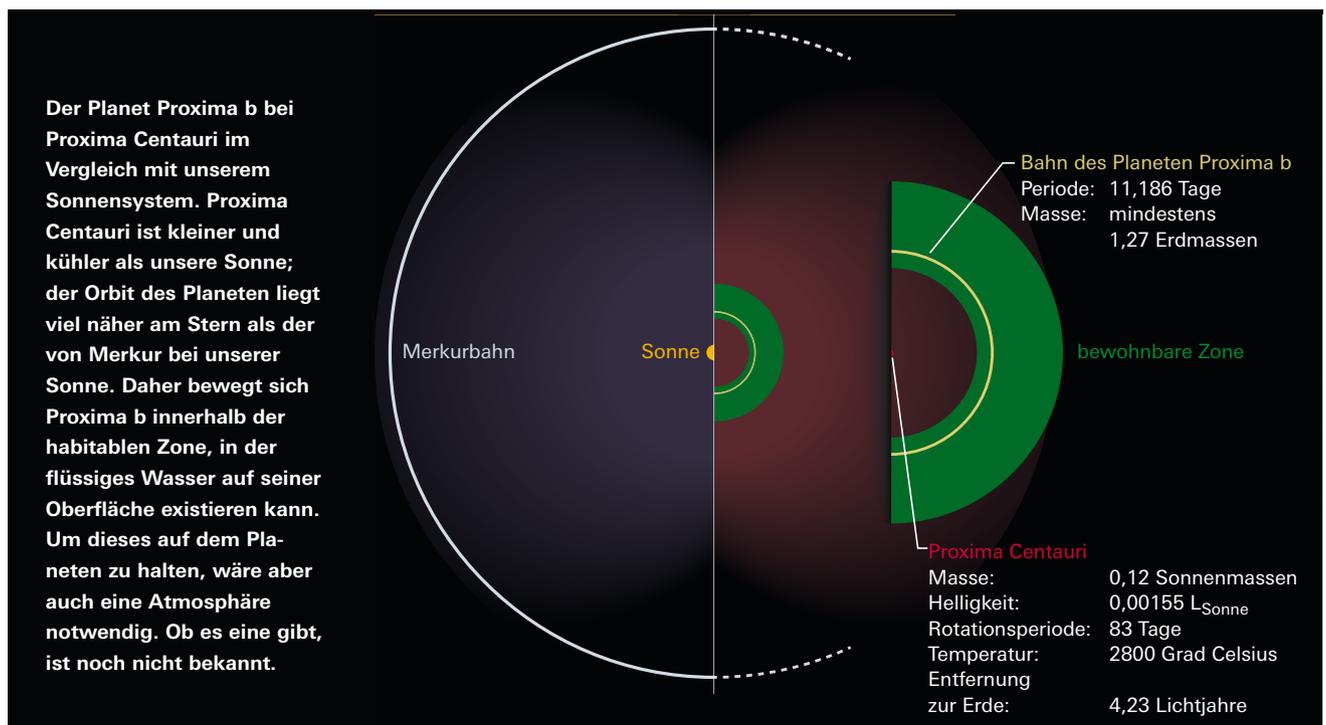
Guillem Anglada-Escudé von der Queen Mary University in London und sein Team haben Proxima b mit dem 3,6-Meter-Spiegelteleskop der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile entdeckt. Der Exoplanet umrundet den unscheinbaren Zwergstern Proxima Centauri, der im südlichen Sternbild Zentaur steht und von Europa aus nicht sichtbar ist. Dieser Stern besitzt nur ein Zehntel der Masse der Sonne und leuchtet mehr als 20 000-mal schwächer als sie. Deshalb ist er trotz seiner Nähe nur mit optischen Hilfsmitteln zu sehen. Sein Planet ist noch viel leuchtschwächer. Er steht von der Erde aus gesehen gerade einmal 37 Tausendstel Bogensekunden neben Proxima Centauri – eine Bogensekunde entspricht dabei jenem Winkel, unter dem eine Euromünze aus einer Entfernung von knapp fünf Kilometern erscheint. Astronomen können den Planeten daher selbst mit dem ESO-Teleskop nicht direkt sehen. Das Entdeckerteam verwendete stattdessen einen der empfindlichsten Spektrografen, die derzeit für die Exoplanetensuche zur Verfügung stehen: den High Accuracy Radial velocity Planet Searcher (HARPS). Mit ihm maßen die Forscher winzigste Verschiebungen einzelner Absorptionslinien im Spektrum des Sternlichts von Proxima Centauri. Diese Linien entstehen, wenn das Licht die Atmosphäre des Sterns passiert. Sie sind eine Art Fingerabdruck der chemischen Elemente in dieser Atmosphäre. Bewegt sich der Stern auf einen Beobachter auf der Erde zu, verschieben sich diese Linien in Richtung des kurzwelligeren, blauen Teils des Spektrums. Entfernt er sich, rücken die Linien in den roten Spektralbereich. Die Forscher fanden heraus, dass die Linien periodisch alle 11,2 Tage abwechselnd in den blauen und in den roten Bereich wandern.

Ähnliche Beobachtungen hatten andere Astronomen bereits vor Jahren gemacht. Doch bislang war unsicher, warum das geschieht: Eine nahe liegende Erklärung ist, dass der Stern hin- und her taumelt, ausgelöst durch die Schwerkraft eines ihn umlaufenden Planeten. Doch Sterne sind wie unsere Sonne oft mit dunkleren Flecken gesprenkelt. Zudem pulsieren manche von ihnen regelrecht, blähen sich auf und ziehen sich wieder zusammen. Andere erleiden von Zeit zu Zeit heftige Strahlungsausbrüche. Alle diese Phänomene wirken sich gleichfalls auf die Linien des Sternspektrums aus und können ein Planetensignal vortäuschen. Deshalb überwachten Anjlada-Escudé und seine Kollegen im Rahmen ihrer Beobachtungskampagne »Pale Red Dot« die Aktivität von Proxima Centauri mit weiteren, über den Globus verteilten Teleskopen. Dann erst waren sie sicher: Die Sternaktivität kann das periodische Schwanken der Spektrallinien nicht verursachen, als einzige Erklärung bleibt ein Planet – Proxima b. Mit 3,6 Kilometern pro Stunde ist das von ihm ausgelöste Taumeln seines Sterns nicht schneller als die Bewegung eines irdischen Spaziergängers.

Was wissen wir über diese Welt? Leider liefert die beschriebene Radialgeschwindigkeitsmethode nur zwei gesicherte Fakten über den Exoplaneten: seine Umlaufdauer und seine Minimalmasse. Die Umlaufdauer folgt direkt aus der Periodendauer des Sternentaumelns. Ein Jahr auf Proxima b dauert also 11,2 Erdentage. Mittels der keplerschen Gesetze errechneten die Forscher, dass der Planet in einem Abstand von 7,3 Millionen Kilometer um seinen Stern kreist. Das ist ein Achtel der Distanz von Merkur zur Sonne oder nur fünf Prozent jener zwischen Erde und Sonne. Im Sonnenorbit wäre Proxima b damit eine lebensfeindliche Gluthölle, aber im Fall von Proxima Centauri bewegt er sich

genau in der temperierten Zone des Sterns, in der flüssiges Wasser unter bestimmten Umständen auf seiner Oberfläche möglich ist. Leider ist die Masse des Planeten weniger präzise bekannt. Zwar lässt sie sich im Prinzip aus der Taumelgeschwindigkeit des Sterns ablesen: je heftiger dieser schwankt, desto größer die Planetenmasse. Allerdings entspricht der aus der Radialgeschwindigkeit ermittelte Wert nur dann der tatsächlichen Masse, wenn wir von der Erde aus genau von der Seite auf die Bahnebene des Planeten blicken. Denn nur dann ist die Taumelbewegung, die der Planet beim Stern hervorruft, vollständig auf die Erde ausgerichtet und in ihrem gesamten Ausmaß messbar. In allen anderen Fällen sehen wir nur die auf die Sichtlinie zur Erde projizierte Geschwindigkeitskomponente. Doch da die Orientierung der Bahn unbekannt ist, können die Forscher nur eine Mindestmasse des Planeten von 1,3 Erdenmassen angeben. Mit diesem Wert besäße Proxima b sehr wahrscheinlich einen Eisenkern, einen silikatischen Mantel und eine feste Oberfläche. Auch wenn die wahre Masse des Planeten darüberliegt, bringt er wohl ziemlich sicher nicht mehr als zwei oder drei Erdmassen auf die Waage. Denn andernfalls wäre die Taumelbewegung seines Sterns so groß, dass man ihn schon bei früheren Beobachtungen mit weniger empfindlichen Spektrografen hätte finden müssen.

Proxima b ist also nach allem, was wir wissen, ein terrestrischer Planet mit fester Oberfläche, der seinen Stern in der temperierten Zone umkreist. Damit aber biologisches Leben möglich wird, sind zwei weitere Voraussetzungen erforderlich: Wasser und eine Atmosphäre. Ob Proxima b Wasser besitzt, hängt davon ab, wo und wie er entstanden ist. Gängige Modelle gehen davon aus, dass sich Planeten bei kleinen Sternen wie Proxima Centauri in größeren Abständen for-



SUNW.GRAFIK, NACH: ESO / M. KORNMESSER / G. COLEMAN (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO/RSZC1 / CC BY 4.0 / CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/RVIA.0/LGALCD0E1)

men und später durch gravitative Wechselwirkungen näher zum Stern wandern. War das bei Proxima b der Fall, dann könnte er bei seiner Entstehung beträchtliche Mengen Wasser als Grundausstattung mitbekommen haben – denn in größerem Sternabstand sollte Wasser in gefrorener Form allgegenwärtig sein. Allerdings gibt es auch Modelle, nach denen sich zunächst kleinere Gesteinsbrocken formen, die sich erst näher am Stern zu einem Planeten vereinigen. Dabei verlieren sie jedoch das Wasser durch die Einstrahlung des Sterns: Das nur schwach an die kleineren Brocken gebundene Wassereis sublimiert, bevor die Einzelteile einen größeren Körper bilden können. In diesem Szenario wäre Proxima b eine staubtrockene, tote Welt.

## Der Planet ist energiereicher Strahlung seines Sterns ausgesetzt

Selbst wenn Proxima b bei seiner Entstehung wasserreich war – ohne Atmosphäre hätte er das Leben spendende Nass längst wieder verloren, und die Gleichgewichtstemperatur auf seiner Oberfläche betrüge heute rund  $-40$  Grad Celsius.

Diese Temperatur ergibt sich aus der Differenz zwischen ein- und abgestrahlter Energie im entsprechenden Sternabstand. Auch die Gleichgewichtstemperatur der Erde läge weit unterhalb des Gefrierpunkts, wenn sie keine Atmosphäre besäße. Seine im Vergleich zur Erde größere Schwerkraft hilft Proxima b zwar, eine Gashölle festzuhalten, dem wirken allerdings die energiereiche Strahlung und der Partikelwind seines Heimatsterns entgegen. Durch seinen geringen Abstand zum Stern empfängt Proxima b rund 250-mal mehr Röntgenstrahlung und zwischen 30- und 60-mal mehr Ultraviolettstrahlung von seinem Stern als die Erde von der Sonne. Diese Strahlung kann, anders als infrarotes und sichtbares Licht, Moleküle in der äußeren Atmosphäre aufbrechen. Die leichteren Bruchstücke werden dann eher vom Teilchenwind des Sterns ins All geblasen. In den ersten 100 Millionen Jahren seiner Existenz war Proxima Centauri zudem heißer als heute und seine energiereiche Strahlung entsprechend intensiver. Ob der Planet unter diesen Umständen eine Atmosphäre festhalten konnte, lässt sich derzeit nicht sicher sagen. Dazu müssten zunächst offene Fragen geklärt werden: Wie hat sich die Strahlung des Sterns im Lauf seines 4,8 Milliarden Jahre langen Lebens geändert? Besitzt Proxima b wie die Erde ein Magnetfeld, das ihn vor der geladenen Partikelstrahlung seines Sterns schützt? Wie setzt sich seine (mögliche) Atmosphäre im Detail zusammen? Bis auf Weiteres gibt es dazu keine Antworten. Und selbst wenn Proxima b heute noch eine Gashölle besitzt, heißt das nicht, dass sie auch lebensfreundlich ist. Das zeigt ein Blick auf unsere Nachbarn im Sonnensystem: Venus und Mars haben beide Atmosphären, doch ist die der Venus so dicht und kohlendioxidreich, dass auf ihrer Oberfläche Drücke von 90 bar und Temperaturen um 450 Grad Celsius herrschen. Die Atmosphäre des Mars ist dagegen zu dünn, um Wasser in flüssiger Form auf seiner Oberfläche zu halten.

Über die Verhältnisse auf Proxima b wissen wir also herzlich wenig – trotz seiner relativen Nähe. Das dürfte sich auch vorerst nicht ändern, es sei denn, der Planet zöge durch

einen glücklichen Zufall aus unserer Sicht vor dem Stern vorbei. Besitzt er eine Atmosphäre, so würde jenem winzigen Anteil des Sternlichts, das während eines solchen Transits durch die Moleküle der Atmosphäre dringt, ein charakteristisches Absorptionsspektrum aufgeprägt – auf gleiche Weise, wie auch die Absorptionslinien im ursprünglichen Sternlicht durch die Sternatmosphäre zu Stande kommen. Zudem ließe sich mit Hilfe von Transits die Größe, die wahre Masse und damit die Dichte des Planeten bestimmen. Allerdings haben die Forscher bislang keine Hinweise auf Planetentransits von Proxima b gefunden. So werden wir warten müssen, bis es gelingt, ein direktes Bild des Planeten zu erstellen. Mit den derzeit im Bau befindlichen Riesenteleskopen wie dem European Extremely Large Telescope der ESO in Chile, aber auch mit neuen Weltraumteleskopen könnte das gelingen. Anhand einer direkten Abbildung ließe sich das Spektrum des von Proxima b reflektierten Sternlichts untersuchen und feststellen, ob er eine Atmosphäre besitzt und ob diese Hinweise auf biologische Aktivität enthält.

Fest steht jedenfalls, dass sich Proxima b erheblich von unserer Erde unterscheidet. Einerseits wendet er seinem Stern wahrscheinlich stets dieselbe Seite zu, so wie der Mond der Erde. Dafür sorgen Gezeitenkräfte, die dank seines engen Orbits um den Stern stärker wirken als auf unserem Planeten. Eine heiße Tag- und eine kalte Nachtseite würden ihn wenig behaglich machen. Möglich ist auch, dass er sich während seines elftägigen Umlaufs um den Stern nur 1,5-mal um seine eigene Achse dreht (3:2-Resonanz) – so wie Merkur bei seinem Lauf um die Sonne. Wegen seines engen Orbits sollte sich seine Rotationsachse im Lauf der Zeit außerdem genau senkrecht zu seiner Bahnebene ausgerichtet haben, so dass Proxima b keine Jahreszeiten kennt. Mit Klimamodellen berechneten die Forscher, dass unter diesen Rahmenbedingungen und bei einer erdähnlichen Atmosphäre möglicherweise nur an den »sonnigsten« Gebieten des Planeten flüssiges Wasser existieren kann – auf der dem Stern zugewandten Seite oder, im Fall der 3:2-Resonanz, in einem tropischen Gürtel entlang seines Äquators. Eine kohlendioxidreichere Atmosphäre würde hingegen einen stärkeren Treibhauseffekt mit global höheren Temperaturen verursachen. Problematisch könnte aber auch der Stern selbst sein. Proxima Centauri ist zwar klein und leuchtschwach, aber keineswegs friedlich. Stellare Ausbrüche schicken regelmäßig zusätzliche Schübe elektromagnetischer Strahlung und energiereicher Partikel zu seinem Planeten. Schon das könnte diesen für komplexes Leben unbewohnbar machen. Dennoch ist uns kein Exoplanet näher, was Proxima b zu einem der interessantesten Ziele für eine zukünftige Erforschung macht. Der kosmische Nachbar fasziniert Astronomen und andere Erdenbewohner also völlig zu Recht. Eine »zweite Erde« ist er aber nicht. ◀

**Jan Hattenbach** ist Physiker und Amateurastronom. Er arbeitet als Wissenschaftsjournalist und Astrofotograf.

QUELLE

**Anglada-Escudé, G. et al.:** A Terrestrial Planet Candidate in a Temperate Orbit around Proxima Centauri. In: Nature. 536, S. 437–440, 2016

# MIKROELEKTRONIK ERLEUCHTETE SILIZIUMCHIPS

**Eigentlich stellen optische und elektronische Bauteile verschiedene Anforderungen an das Material, aus dem sie gefertigt werden. Ein neuer Produktionsprozess überwindet diese Diskrepanz – zumindest im Prinzip.**

«Kleiner, schneller, billiger»: Nach diesem Motto verläuft die Entwicklung der Mikroelektronik, seit Intel 1971 seinen ersten Mikroprozessor auf den Markt brachte. Immer dichtere Packungen elektronischer Bauteile haben den Computern mehr als 40 Jahre lang einen enormen Leistungszuwachs beschert. Inzwischen gerät jedoch – neben anderen Dingen – die chipinterne Datenübermittlung an ihre Grenzen. So verlieren die üblichen elektrischen Leitungen nicht nur Energie, sondern auch Zeit, weil das »Zielorgan« seinen elektrischen Zustand erst mit einer gewissen Verzögerung verändert.

Beiden Problemen wäre abzuhelpfen, wenn Licht an Stelle von Elektronen die Information übertragen würde. Photonen verlieren nämlich unterwegs keine Energie und wirken verzögerungsfrei. Allerdings müsste dafür die Information

von der elektronischen in die optische Form und zurück verwandelt werden – ohne weiteren Zeitverbrauch. Aus diesem Grund haben sich die Ingenieure sehr intensiv darum bemüht, Bauteile, die Licht senden und empfangen können, aus Silizium oder zumindest mit der etablierten Technik zu entwickeln. Der Traum der Techniker: elektronische und photonische Bauteile aus demselben Material auf ein und demselben Chip.

Eine große Gruppe von Forschern aus der University of California in Berkeley, dem Massachusetts Institute of Technology sowie weiteren Institutionen unter der Federführung von Chen Sun hat nun einen bedeutenden Schritt in Richtung auf dieses Fernziel zu vermelden: einen Mikroprozessor, der mittels Licht kommuniziert. Bislang war es zwar gelungen, photonische Bauteile aus Silizium herzustellen, aber nicht mit dem Standardmaterial der elektronischen Chips, sondern mit einer Siliziumschicht, die auf einen elektrischen Isolator aufgebracht ist (silicon on insulator, SOI). Im Prinzip kann man auch mit SOI-Material elektronische Schaltkreise herstellen, aber die heute übliche CMOS-Technik (complementary metal oxide semiconductor) reagiert äußerst empfindsam auch auf kleinste Änderungen des Produktionsverfahrens. Den Qualitätsabfall aufzuholen würde sehr zeit- und kostenaufwändige Entwicklungsarbeit erfordern. Da fertigt man lieber die elektronische und die photonische Hälfte eines Chips separat mit den jeweils geeignetsten Verfahren und fügt dann beide zusammen.

## Unsere Neuerscheinungen!



Tyrannosaurier • Archäopteryx & Co. • Mammuts • Zeitgenossen der Dinosaurier • Als die Federn fliegen lernten • Aufstieg der Säugetiere • Evolution im Zeitraffer • Das flexible Genom der Buntbarsche • € 8,90; erscheint am 28.10.2016



Mesopotamien: Bibliotheken im Zweistromland • Buchmalerei: Goldene Buchstaben, goldenen Worte? • Amulette: Schutz für Lebende – Hinweise aus den Gräbern • Bali: Aksara – Buchstaben der Götter • € 8,90



Schwangerschaft: werdende Väter leiden mit • Sprache: So kommen die Wörter in den Kopf • Sozialkompetenz: Wie Kinder teilen lernen • Familienplanung: Machen Kinder glücklich? • € 8,90

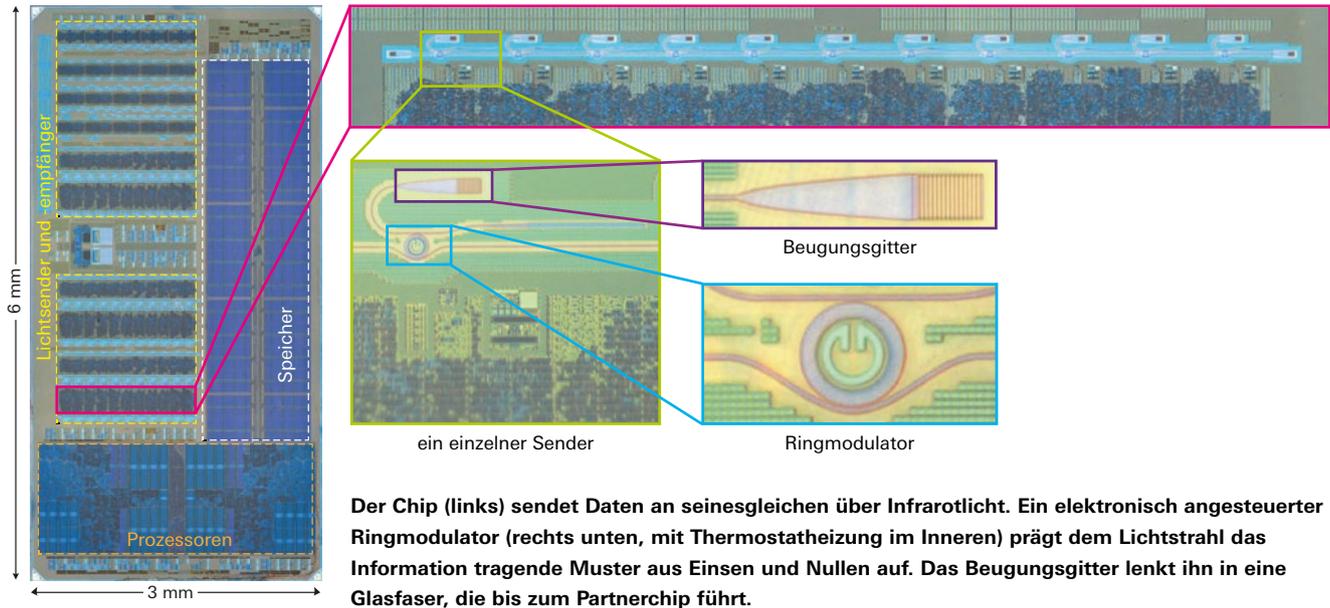
Ausgewählte  
Sonderhefte  
auch im  
PDF-Format

**Hier bestellen:**

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

**www.spektrum.de/neuerscheinungen**

CHEN SUN ET AL.: SINGLE-CHIP MICROPROCESSOR THAT COMMUNICATES DIRECTLY USING LIGHT. IN: NATURE 528, S. 534-538, 2015, FIG. 1, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



**Der Chip (links) sendet Daten an seinesgleichen über Infrarotlicht. Ein elektronisch angesteuerter Ringmodulator (rechts unten, mit Thermostatheizung im Inneren) prägt dem Lichtstrahl das Information tragende Muster aus Einsen und Nullen auf. Das Beugungsgitter lenkt ihn in eine Glasfaser, die bis zum Partnerchip führt.**

Dieser Denkweise haben Sun und seine Kollegen einen Schlag versetzt, und zwar mit einer äußerst unspektakulären Devise: »nichts verändern« (»zero-change approach«). Es gelang ihnen, mit Hilfe eines üblichen CMOS-Verfahrens die Elektronik auf SOI-Material unterzubringen; der photonische Teil erforderte dann keine zusätzlichen Bemühungen mehr. Das Endprodukt vereint mehrere Funktionen in sich (system on a chip, SOC) und bietet Aussicht auf dieselbe Qualität – in Bezug auf Leistung und Ausschussrate – wie die nach Standardverfahren gefertigten elektronischen Chips.

Das neue optisch-elektronische Mischwesen enthält Millionen von Transistoren und einige hundert photonische Komponenten auf einer gemeinsamen Grundlage. Zwei Exemplare des Chips, ein Rechner und ein Speicher, verständigen sich miteinander per Lichtleitung mit einer Datenrate von 2,5 Gigabit pro Sekunde. Die Komponenten, welche die Folge der Lichtpulse erzeugen, leiten und detektieren, bestehen aus Silizium, dem Verbindungshalbleiter Siliziumgermanium (SiGe) sowie Siliziumnitrid – alles Substanzen, die der Industrie geläufig und mit CMOS-Technologie verarbeitbar sind.

Das Licht kommt von einem externen Laser mit der Wellenlänge 1180 Nanometer – gut geeignet für die üblichen Lichtleiter. Für Infrarotlicht dieser Wellenlänge ist Silizium transparent; um Streulichteffekte zu vermeiden, ätzen die Forscher daher das Silizium unter den optischen Bauteilen weg. Wesentliches Bauteil des Senders ist ein »Ringmodulator«, ein extrem kleiner Ring aus Silizium (Bild). Dessen Umfang ist im Idealfall ein ganzzahliges Vielfaches der Laserwellenlänge, so dass in der einfallenden Lichtwelle, wenn sie im Ring rundläuft, Wellenberg auf Wellenberg trifft (»Resonanz«). In diesem Fall lässt der Ring das Licht durch, sonst wirkt er als Sperre. Der Brechungsindex und damit die Resonanzfrequenz des Rings ändern sich mit dessen elektrischer Ladung, so dass man den Ring auf elektrischem Weg

zwischen den Zuständen »durchlässig« und »undurchlässig« umschalten kann. Sun und Kollegen optimierten dieses Übertragungssystem so, dass es bei mäßiger Leistungsaufnahme praktisch fehlerfrei arbeitet (weniger als ein falsches Bit auf  $10^{12}$ ). Da nicht nur elektrische Ladungen die Resonanzfrequenz des Ringmodulators verschieben, sondern auch Temperaturunterschiede, bauten die Forscher eine Art Thermostatheizung ein, mit Reaktionszeiten im Mikrosekundenbereich. Diese Regelung ist dringend erforderlich, denn die Temperatur der elektronischen Komponenten schwankt je nach deren Aktivität um bis zu 60 Grad.

Mit ihrem Chip haben die Forscher einen prinzipiellen Machbarkeitsnachweis erbracht. Bis zur kommerziellen Produktion ist es allerdings noch ein gutes Stück Wegs. Die Datenübertragungsrate von 2,5 Gigabit liegt deutlich unter dem Stand der Technik für rein photonische Systeme auf Siliziumbasis. Aber auch mit höheren Raten droht die optische Übertragung zum Engpass zu werden. Zur Abhilfe könnte man zunächst Licht mit verschiedenen Wellenlängen über ein und dieselbe Leitung schicken, was die Bandbreite ungefähr verzehnfachen würde. Auf lange Sicht wird man vor allem die Anzahl der optischen Bauteile pro Chip erhöhen müssen – vor allem wenn dieser, dem Stand der Technik entsprechend, mehrere Prozessoren mit ihrem je eigenen Kommunikationsbedarf enthält. ◀

**Laurent Vivien** arbeitet am Institut d'Électronique Fondamentale der Université Paris-Sud in Orsay.

#### QUELLE

**Sun, C. et al.:** Single-Chip Microprocessor that Communicates Directly Using Light. In: Nature 528, S. 534–537, 24./31. Dezember 2015

© Nature Publishing Group

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

Nature 528, S. 483, 24./31. Dezember 2016

# EXPERIMENTALPHYSIK SCHWARZES LOCH RAUSCHT IM LABOR

**Astronomen rätseln seit Jahrzehnten, ob die theoretisch vorhergesagte Hawking-Strahlung existiert. Ein Forscher behauptet jetzt, ein akustisches Analogon davon erzeugt und vermessen zu haben.**

► Selbst ein vollkommen isoliertes Schwarzes Loch wäre wohl nicht wirklich unsichtbar: Theoretiker nehmen an, dass es eine besondere Form von Strahlung aussendet, die es stetig schrumpfen und eines Tages ganz verschwinden lassen müsste. Das zumindest sagte der Physiker Stephen Hawking von der University of Cambridge vor rund 40 Jahren voraus. Dieses Phänomen ist bei echten Schwarzen Löchern allerdings vermutlich zu schwach ausgeprägt, um astronomischen Beobachtungen zugänglich zu sein.

Nun hat der Physiker Jeff Steinhauer vom Technion, der Technischen Universität Israels in Haifa, mit einem Versuchsaufbau ein Schwarzes Loch simuliert, das diese Hawking-Strahlung zu emittieren scheint – und zwar wie sein astrophysikalisches Vorbild auf Grund von Quantenfluktuationen. Seine Ergebnisse kommen einer wirklichen Beobachtung der Strahlung damit vermutlich so nahe wie kein anderes Laborexperiment zuvor.

Mit seinem Nachbau eines Schwarzen Lochs könnte man vielleicht einige der Schwierigkeiten beseitigen, die das Phänomen den Theoretikern bereitet, hofft der Forscher. Auch Fachkollegen zeigen sich von Steinhauers Experiment beeindruckt, doch viele lassen Vorsicht walten und halten die Ergebnisse für noch nicht eindeutig. Zudem sehen einige die Aussagekraft solcher Labormodelle generell kritisch. »Wenn sich alle seine Schlussfolgerungen bewahrheiten, ist das ein großartiges Experiment«, sagt etwa Silke Weinfurter, theoretisch und experimentell arbeitende Physikerin von der University of Nottingham. Aber: »Es liefert keinen Beweis dafür, dass auch um Schwarze Löcher in der Astrophysik Hawking-Strahlung existiert.«

## Wenn virtuelle Teilchen real werden

Mitte der 1970er Jahre bemerkte Hawking, dass der Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs – das ist die Grenze, ab der nicht einmal mehr Licht der Gravitationswirkung entkommen kann – merkwürdige Konsequenzen für die Physik des kosmischen Gebildes haben müsste. Sein Ausgangspunkt war der Zufallscharakter aller quantenphysikalischen Prozesse. Sie schließen die Existenz eines vollkommenen Nichts aus: Selbst an der scheinbar leersten Stelle im Universum entstehen durch Energiefluktuationen immerfort Teilchenpaare, die sich kurz darauf gegenseitig vernichten. Wenn allerdings ein Ereignishorizont diese beiden »virtuellen« Teilchen voneinander trennt, bevor sie sich zerstören, werden sie real, und eines der beiden fällt ins Schwarze Loch, während das andere entkommt.

Das wiederum würde, wie Hawking zeigte, das Schwarze Loch einerseits schwach strahlen lassen und andererseits seine Masse verringern. Denn die Teilchen, die ins Innere stürzen, tragen eine negative Energie, die das kosmische Monster langsam aufzehrt. Unter Theoretikern ist seither eine mögliche Konsequenz dieses Vorgangs besonders umstritten: Mit dem Verschwinden des Schwarzen Lochs würden auch Information über die Objekte vernichtet werden, die es einst verschluckt hat. Das widerspricht der sonst allgemein akzeptierten Vorstellung, dass quantenmechanische Information nicht verschwinden kann.

Anfang der 1980er Jahre schlug der Physiker Bill Unruh von der University of British Columbia in Vancouver ein Verfahren vor, mit dem sich einige von Hawkings Vorhersagen überprüfen lassen sollten. Er betrachtete ein zunehmend beschleunigtes Medium. Schallwellen wären ab der Stelle, ab der es sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegt, nicht mehr in der Lage, sich entgegengesetzt zur Fließrichtung zu bewegen. Laut Unruh wird diese Grenze damit zu einem Äquivalent für einen Ereignishorizont. Dort sollte eine Schallwellenvariante der Hawking-Strahlung auftreten.

## Auf der überschallschnellen Seite verschwanden die Phononen

Unruhs Idee setzte Steinhauer mit einer Wolke aus Rubidiumatomen um, die er auf eine Temperatur nur Bruchteile über dem absoluten Nullpunkt abkühlte. Hält man die Atome in einer speziellen elektromagnetischen Falle gefangen, nehmen sie einen gemeinsamen Zustand an, der als Bose-Einstein-Kondensat bezeichnet wird. Die Schallgeschwindigkeit beträgt darin nur einen halben Millimeter pro Sekunde. Indem er einige der Atome auf größere Geschwindigkeiten beschleunigte, erzeugte er einen künstlichen Ereignishorizont (siehe Illustration S. 28).

Bei diesen ultrakalten Temperaturen kommen im Bose-Einstein-Kondensat schwache Quantenfluktuationen vor. Es entstehen Paare aus so genannten Phononen – die akustische Entsprechung zu den virtuellen Teilchen des Vakuums. Auch hier sollten sich in manchen Fällen die Partnern teilchen trennen, wobei eines vom überschallschnellen Ereignishorizont eingefangen wird und das andere als eine Art Hawking-Strahlung entkommt.

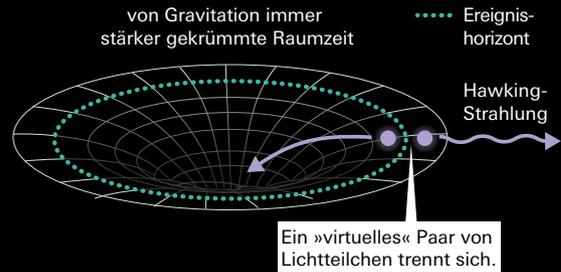
Auf der Seite des akustischen Ereignishorizonts, auf der sich die Atome schneller als der Schall bewegten, verschwanden die Phononen tatsächlich wie erwartet. Und als Steinhauer das Bose-Einstein-Kondensat abbildete, entdeckte er Korrelationen zwischen den gemessenen Dichteschwankungen in Bereichen, die sich in gleichem Abstand zum Ereignishorizont befanden, aber auf der jeweils anderen Seite. Somit wären die Photonenpaare verschränkt, was wiederum nahelege, dass sie spontan aus derselben Quantenfluktuation entstanden, erklärt Steinhauer: Das Bose-Einstein-Kondensat habe Hawking-Strahlung emittiert.

## Bauanleitung für einen Ereignishorizont

Der so genannte Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs ist die Grenze, ab der kein Teilchen mehr dessen Schwerkraft entkommen kann. Nun wurde ein solcher Bereich künstlich im Labor erzeugt.

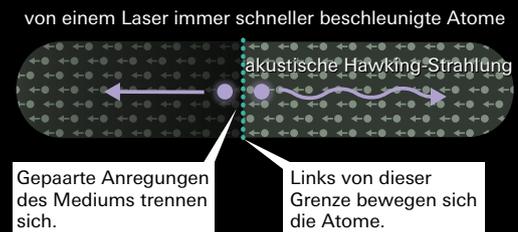
### Astrophysikalisches Schwarzes Loch

Schwankungen der Energie des Vakuums erzeugen Teilchenpaare. Am Rand des Ereignishorizonts führt das theoretisch zu einer Strahlung von Photonen, die gerade noch entweichen, während ihr Partner hineinstürzt.



### Künstliches Schwarzes Loch

Auch in einem Medium aus extrem kalten Atomen kommt es zu Energiefluktuationen, die sich als eine Art von Schallwellen äußern. Erzeugt man einen Bereich, in dem sich das Medium schneller bewegt als mit Schallgeschwindigkeit, werden diese Schwingungen teilweise davon verschluckt, während eine damit verknüpfte Anregung entkommt – analog zur Hawking-Strahlung.



Im Gegensatz dazu musste die Strahlung, die er in einer früheren Version seines Versuchsaufbaus erzeugte, von außen angestoßen werden, sie entstand also nicht von selbst. Eine andere Variante, die Unruh und Weinfurter mit Hilfe von Wasserwellen verwirklichten, beinhaltete keine Quanteneffekte. Genau wie Schwarze Löcher wohl nicht absolut schwarz sind, war Steinhauers akustisches Pendant demnach nicht vollkommen geräuschlos. Könnte man es hören, würde sein Klang wohl an statisches Rauschen erinnern.

»Das war auf jeden Fall eine Pioniertat«, kommentiert Ulf Leonhardt, Physiker vom Weizmann-Institut im israelischen Rehovot und Leiter einer Arbeitsgruppe, die das Strahlungsphänomen mit Hilfe von Laserlicht in einem Glasfaserkabel erzeugen möchte. Seiner Meinung nach ist Steinhauer der Nachweis der Verschränkung allerdings noch nicht vollständig gelungen. Die Korrelationen fand der Physiker nämlich nur bei Phononen von vergleichsweise hoher Frequenz, während Paare bei eher niedriger Energie nicht korreliert gewesen zu sein scheinen.

Für Leonhardt bleiben zudem noch gewisse Zweifel, ob es sich bei dem Medium aus Rubidiumatomen tatsächlich um ein echtes Bose-Einstein-Kondensat handelte. Was seiner Meinung nach bedeutet, dass auch andere Arten von Fluktuationen auftreten könnten, die der Hawking-Strahlung lediglich ähnlich sähen.

Unklar bleibt zudem, was solche Laboranalogien über die Mysterien realer Schwarzer Löcher aussagen. »Ich glaube nicht, dass es hilft, das so genannte Informationsparadoxon besser zu verstehen«, meint Leonard Susskind, theoretischer Physiker von der Stanford University in Kalifornien. Im Gegensatz zu ihren kosmischen Geschwistern vernichten die akustischen Schwarzen Löcher nämlich ganz sicher keine Information, weil sich das Bose-Einstein-Kondensat nicht in Nichts auflöst.

Dennoch: Wenn sich Steinhauers Ergebnisse bestätigen, wäre es Susskind zufolge ein »Triumph für Hawking, vielleicht genauso, wie die Entdeckung des Higgs-Bosons ein Triumph für Higgs und seine Kollegen war«. Wenige hatten an der Existenz des Teilchens gezweifelt, aber erst die Entdeckung im Jahr 2012 bescherte Peter Higgs und François Englert den Nobelpreis für Physik. ◀

**Davide Castelvecchi** ist Redakteur bei »Nature«.

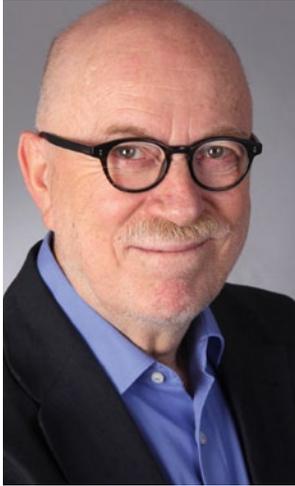
#### QUELLE

**Steinhauer, J.:** Observation of Quantum Hawking Radiation and its Entanglement in an Analogue Black Hole. In: Nature Physics 10.1038/nphys3863, 2016

© Nature Publishing Group

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

Nature 536, S. 258–259, 18. August 2016



# SPRINGERS EINWÜRFE WELT OHNE GELD

**Nach der klassischen Wirtschaftslehre sorgen Märkte von selbst für die optimale Verteilung von Gütern und Dienstleistungen. Doch manchmal lässt sich ohne Preismechanismus effektiver wirtschaften.**

**Michael Springer** ist Schriftsteller und Wissenschaftsjournalist. Seit seiner Promotion in theoretischer Physik pendelt er zwischen den »zwei Kulturen«.

► [spektrum.de/artikel/1420982](https://spektrum.de/artikel/1420982)

**K**ürzlich feierte die Fernsehserie »Raumschiff Enterprise« ihren 50. Geburtstag. Ihr Schöpfer Gene Roddenberry (1921–1991) siedelte sie in einer fernen Zukunft an, in der die Menschheit einen utopischen Zustand genießt. Unter anderem hat sie das Geld völlig abgeschafft, ohne deshalb in primitiven Tauschhandel zurückzufallen. Vielmehr scheint auf Grund wissenschaftlich-technischer Errungenschaften ein derartiger Überfluss an Ressourcen zu herrschen, dass sich Verteilungskämpfe ebenso erübrigen wie Preise als Indikatoren für knappe Güter.

In der Welt von heute kann man von solchen Zuständen nur träumen. Alles ist knapp und hat seinen Preis,

## Alles ist knapp und hat seinen Preis, Geld regiert die Welt

Geld regiert die Welt – und wo das noch nicht der Fall ist, bemüht man sich, planmäßig Marktmechanismen zu installieren. Insbesondere wird für zunächst freie, da scheinbar unerschöpfliche Umweltgüter wie Luft und Wasser per Gesetz künstlich ein Markt geschaffen, sobald man weiß, dass deren Knappheit nur eine Frage der Zeit ist. So wird die Umwelt zum handelbaren Gut.

Auch bei Gesundheitsversorgung und Entwicklungshilfe bilden sich Märkte nicht von allein, denn die Empfänger solcher Dienste sind in der Regel wenig zahlungskräftige Kunden. Ist es überhaupt sinnvoll, bei herrschender Not nach gängigen Marktmodellen vorzugehen und für jede Leistung Geld zu verlangen? Aber wird andererseits nicht dem Missbrauch Tür und Tor geöffnet, wenn man etwas Wertvolles gratis verteilt – das heißt verschenkt? Anders gesagt: Lässt sich eine Versorgung mit Gütern und Dienstleistungen ohne Markt effektiv organisieren?

Die Probe aufs Exempel machte ein Team um die französische Ökonomin Pascaline Dupas an der Stanford

University in Cambridge. Die Forscher erprobten mit einer randomisierten kontrollierten Studie drei unterschiedliche Methoden, um in einer Region Kenias, wo viele Kinder an Durchfallerkrankungen sterben, für sauberes Trinkwasser zu sorgen. Eine Testgruppe von Haushalten bekam das dafür nötige Chlor an der Haustür geschenkt, der zweiten Gruppe wurde es zu einem Vorzugspreis käuflich angeboten, und die dritte bekam einen Gutschein, mit dem sie das Chlor jeden Monat aus einem nahe gelegenen Laden gratis beziehen konnte (*Science* 353, S. 889–893, 2016).

Die letzte Methode erwies sich als die effektivste: Wer mit dem Gutschein zum Laden gehen musste, verbrauchte im Schnitt 60 Prozent weniger Chlor als ein Beschenkte aus der ersten Gruppe, chlorierte aber sein Wasser ebenso gründlich. Hingegen scheiterte das Desinfizieren in der zweiten Gruppe an der Preisbarriere: Nur jeder Zehnte wollte oder konnte Geld für Chlor ausgeben.

Warum bewährte sich die Gutscheinmethode? Notleidende haben zu wenig Geld, um es für das mögliche Vermeiden künftiger Krankheiten auszugeben, aber sie haben genug Zeit, den monatlichen Weg zum Laden in Kauf zu nehmen, damit die Kinder gesund bleiben. Bloßes Herschenken des Chlors wiederum suggeriert, es wäre nichts wert, und führt entsprechend zu dessen Verschwendung.

**L**ässt sich das Resultat verallgemeinern? Ich bekomme beispielsweise Bücher und Filme aus der Stadtbibliothek zu einer symbolisch niedrigen Gebühr, vermeide aber, die Entleihdauer zu überziehen, weil es dann teurer wird. Dafür opfere ich gern die Zeit, öfter zur Bücherei zu radeln.

Möglicherweise ist also eine Wirtschaft denkbar, in der man nicht mit Geld bezahlt, sondern mit einer Gegenleistung, die Zeit kostet. Die Besetzung der »Enterprise« jedenfalls entschädigt mit der Erforschung des Weltraums jene Menschen, die ihre Zeit für den Bau des Raumschiffs opferten.



Inzwischen schlägt  
Autor Dietrich Stout so  
schöne Faustkeile wie  
die Menschen der  
Altsteinzeit. Mehr als  
300 Stunden Übung  
liegen hinter ihm.



# HIRNEVOLUTION WIE MAN EINEN FAUSTKEIL MACHT

**Welche Bedeutung hatte das Herstellen von Steinwerkzeugen für die Gehirn- und Sprachentwicklung des Menschen? Um diese Fragen zu klären, schlagen Forscher Faustkeile und legen sich selbst in den Hirnscanner.**

**Dietrich Stout** ist Professor für Anthropologie an der Emory University in Atlanta (Georgia). In Zusammenarbeit mit Neurowissenschaftlern erforscht er die Herstellung paläolithischer Steingeräte. Sein Ziel: die entscheidenden Faktoren der Menschenevolution zu klären.

» [spektrum.de/artikel/1417451](https://spektrum.de/artikel/1417451)

Meinen ersten Faustkeil schlug ich aus einem Feuerstein von einem Acker im südenglischen Sussex zu- recht. Den Menschen, die in dieser Gegend vor einer halben Million Jahren lebten, hätte das Stück mit Sicherheit nicht imponiert (kleines Bild rechts). Am Fundplatz nahe Boxgrove hinterließen Vertreter von *Homo heidelbergensis* damals wesentlich eleganteres und perfekteres Werkzeug. Auf meinen Erstling bin ich trotzdem stolz. Man glaubt kaum, wie schwer so etwas zu machen ist.

Ich habe mich daran versucht, weil ich herausfinden möchte, wie in der menschlichen Evolution die Kultur-, Sprach- und Hirnentwicklung ineinandergriffen. Seit Jahrzehnten probieren Archäologen, handwerkliche Fertigkeiten prähistorischer Menschen nachzuahmen. Meine Forschungsrichtung hat in den letzten 15 Jahren faszinierende neue Wege eingeschlagen. In Zusammenarbeit mit Neurowissenschaftlern beobachten wir das Geschehen im Gehirn, wenn jemand lernt, steinzeitliches Gerät der verschiedenen kulturellen Entwicklungsphasen herzustellen – und dabei allmählich immer besser wird.

Der Ansatz hat die einst populäre, später von anderen Erklärungen verdrängte Vorstellung wiederbelebt, nach der die Werkzeugherstellung eine wichtige Triebfeder der menschlichen Evolution war, insbesondere auch der Hirnentwicklung. Der britische Anthropologe Kenneth Oakley (1911–1981) hatte diese These in seinem erstmals 1949 erschienenen Buch »Man the Tool-Maker« vertreten. Er hielt das Anfertigen von Werkzeug für die wesentliche Eigenschaft, aus der unser einzigartiges Vermögen erwuchs, geistige und körperliche Kräfte zu koordinieren.

Oakleys These geriet in Misskredit, als Verhaltensforscher bei Menschenaffen, Rabenvögeln, Delfinen und selbst Tintenfischen beobachteten, wie manche dieser Tiere Werkzeuge gebrauchten und sogar herstellen. Als die englische Forscherin Jane Goodall das zum ersten Mal bei wilden Schimpansen dokumentierte, nämlich das Termitenangeln mit Halmen oder Stängeln, kommentierte der Paläontologe Louis Leakey (1903–1972): »Jetzt muss man neu definieren,

was ein Werkzeug ist und was ein Mensch. Sonst müssten wir die Schimpansen zu den Menschen rechnen.« Als Triebkraft für die Evolution des Primatengehirns gaben viele Forscher nun komplexen sozialen Beziehungen den Vorrang. In den 1980er und 1990er Jahren betrachteten sie als die größte geistige Herausforderung für einen Primaten nicht länger, in der physikalischen Umwelt zurechtzukommen, sondern sich gegenüber Artgenossen zu behaupten. Begriffe wie machiavellische Intelligenz und »soziales Gehirn« kamen auf. Tatsächlich haben Affenarten, die in großen Gruppen leben, tendenziell voluminösere Gehirne als andere.

### **Das Geheimnis unserer kulturellen Überlegenheit: Weltmeister im Nachahmen und Voneinanderlernen**

Neuere Arbeiten zeigen aber, dass die Bedeutung der Werkzeugherstellung für unsere Evolution trotzdem nicht ad acta gelegt werden sollte – obwohl man dies heute anders fassen würde als seinerzeit Oakley. Denn auch ohne ein menschliches Alleinstellungsmerkmal zu sein, könnte sie dabei eine wichtige Rolle gespielt haben. Der entscheidende Unterschied zur Tierwelt besteht einerseits in der Art der Geräte, andererseits darin, wie man lernt, sie zu fabrizieren. Im Voneinanderlernen heben sich Menschen weit von anderen Primaten ab. Vor allem unser Nachahmungsvermögen sticht hervor. Hierauf sind wir angewiesen, wenn wir uns komplexe technische Fertigkeiten aneignen. Und es ist wohl auch eine Vorbedingung für die beispiellose Anhäufung von kulturellem Wissen. Womöglich hatte das Lehren und Lernen immer ausgefeilterer Herstellungsprozesse für Werkzeuge unsere Vorfahren so stark in Anspruch genommen, dass dies der Sprachentwicklung zugutekam. Zumindest sind inzwischen viele Neurowissenschaftler davon überzeugt, dass sprachliche und manuelle Kompetenzen teilweise auf denselben Hirnstrukturen beruhen.

An Fossilien lassen sich solche Annahmen nicht direkt überprüfen, weil sich Gehirne und Verhalten nun einmal nicht erhalten. Uns blieb daher nur übrig, selbst Werkzeuge so akkurat wie möglich nach alter Weise herzustellen und dabei den Ereignissen – und Veränderungen – im Gehirn nachzuforschen. Jahrelang haben meine Studenten, Mitarbeiter und ich den Paläolithikern nachgeeifert und uns als Steinmetze versucht. Wir haben Lehrling und Meister gespielt, um herauszufinden, wie es ihnen – und ihren Gehirnen – in der Praxis ergangen sein mag, wenn sie ihre Kenntnisse über die Generationen weitergaben.

Als wir zum ersten Mal Schubkarren voller Steine in ein hochmodernes Labor für neurologische Bildgebung karrten, erregte das natürlich Aufsehen. Eigentlich ist es in der Archäologie aber gang und gäbe, mit neuesten Techniken naturwissenschaftliche Experimente durchzuführen, etwa um prähistorische Metallgewinnung nachzuvollziehen oder Versteinerungsprozesse zu ergründen. Wie Steine behauen wurden, haben Forscher vereinzelt schon im 19. Jahrhundert ausprobiert. Heute sind solche Studien etabliert, und man weiß ziemlich gut, wie frühere Menschen dabei vorgehen.

Meine akademischen Lehrer Nicolas Toth und Kathy Schick, die heute beide an der Indiana University Bloomington und dem dortigen Stone Age Institute arbeiten, hatten schon 1990 die Idee, mit einem damals neuen bildgebenden

## **AUF EINEN BLICK ALTSTEINZEITLICHES HANDWERK**

- 1** Paläoanthropologen erlernen Technologien früher Menschen, um anhand eigener Hirnaufnahmen herauszufinden, auf welchen geistigen Fähigkeiten die Kultur- und Sprachentwicklung aufbaute.
- 2** Der Lernprozess, einen guten Faustkeil zu schlagen, ist langwierig und erfordert viel Motivation und Selbstkontrolle – Fähigkeiten, für die sich die Strukturen im Stirnhirn erst entwickeln mussten.
- 3** Die Anforderungen der Werkzeugherstellung dürften die menschliche Evolution wesentlich vorangetrieben haben. Vermutlich entstand in diesem Zusammenhang sogar die Sprache.



## Forschungslabor im Freien

In der Steinmetzwerkstätte an der Emory University unterrichtet Nada Khreisheh (oben rechts) jede Woche 20 Stunden lang, wie man Faustkeile herstellt. Alle Kursteilnehmer müssen 100 Stunden praktizieren. Der erste Faustkeil des Autors aus einem Feuerstein war noch ungeschlachtet (links).



BEDI FOTOS / GREGORY MILLER

Verfahren aufzuzeigen, was im Gehirn passiert, wenn jemand ein altsteinzeitliches Gerät anfertigt. Auf derselben Fragestellung bauen meine eigenen Forschungen auf. Genauer gesagt untersuche ich Aktivitätsmuster und strukturelle Veränderungen des Gehirns infolge des mehr oder weniger gekonnten Behauens eines Steinrohlings.

Mein Labor ist heute regelrecht eine Lehrwerkstätte für die Herstellung von archaischem Steingerät. Während ich diesen Text schreibe, höre ich die Studenten draußen unermüdlich ihre Feuersteine behauen. Als wir den Berg an Abschlügen vor dem Fenster zuletzt maßten, hatte er bei drei Meter Durchmesser 15 Zentimeter Höhe und wog über 20 Zentner. Gerade sehe ich, wie sich Postdoc Nada Khreisheh einem sichtlich frustrierten Studenten zuwendet und ihm etwas zeigt. In unserer derzeit ambitioniertesten Studie lehrt die Forscherin 20 Stunden pro Woche die Kunst, einen Faustkeil herzustellen. Teilnehmer sind 20 Studenten, die jeder 100 Unterrichtsstunden bekommen. Wir filmen alles, um später aufzuschlüsseln, welche Lerntechniken den besten Erfolg haben. Außerdem bewahren wir jedes »fertige« Werkzeug inklusive sämtlicher Abschlüge auf und registrieren und vermessen alle Teile, damit wir die Lernfortschritte verfolgen können. Während dieser Zeit müssen die

Probanden mehrmals in den Kernspintomografen (Magnetresonanztomografen). So können wir feststellen, ob sich Hirnstrukturen und -funktionen verändert haben. Psychologische Tests sollen prüfen, inwieweit bestimmte kognitive Kompetenzen wie das Planen von Handlungen oder das Kurzzeitgedächtnis mit zunehmender Fertigkeit korrelieren.

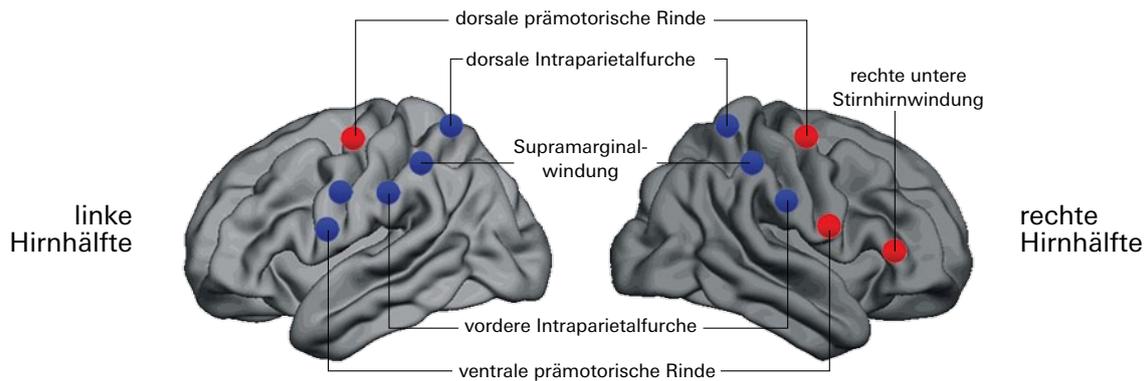
Mindestens so viel steht fest: Für einen Anfänger ist es alles andere als leicht, einen ordentlichen Faustkeil zu schlagen. Nur warum tut man sich damit dermaßen schwer? Oakley und seine Kollegen glaubten damals, der Schlüssel zum Erfolg sei das »spezifisch menschliche« abstrakte Denken. Es käme in erster Linie darauf an, sich das gewünschte Gerät genau vorzustellen und während der Fertigung vor Augen zu haben. Doch nach unserer Erfahrung ist die eigentliche Schwierigkeit die Umsetzung! Das weiß auch jeder Handwerker.

Beim Faustkeil gilt es, die einzelnen Hammerschläge – je nach Arbeitsschritt mit einem anderen Stein, einem Knochen oder Geweihstück – sehr gezielt und dabei fein dosiert zu setzen. Das erfordert fast millimetergenaue Arbeit und streng kontrollierte Kraft. Die Bewegung selbst ist zu schnell, um sie im Verlauf noch korrigieren zu können. Wie bei einer Marmorskulptur entfernt jeder Schlag etwas vom Volumen,

## Kompetenzsteigerung durch mehr Mitsprache

Moderne Bildgebung enthüllt, welche Gebiete des Großhirns bei der Anfertigung simpler (blaue Punkte) und zusätzlich beim Herstellen anspruchsvoller Steingeräte (rote Punkte) aktiv sind. Selbst für das schlichte Oldowan-Werkzeug, wie die ersten Menschen es schon vor mehr

als zwei Millionen Jahren schlugen, sind verschiedene Hirnregionen gefordert. Für einen Faustkeil, der den Menschen vor 50 000 Jahren im späten Acheuléen perfekt gelang, werden mehrere weitere Areale beansprucht.



THEBRY CHAMINADE

und dies lässt sich nicht rückgängig machen. Schon kleine Fehler können also das ganze Werk zerstören.

Die französische Forscherin Blandine Brill, Direktorin an der École des Hautes Études en Sciences Sociales in Paris, und ihre Kollegen haben solche Bewegungsabläufe mit speziellen Sensoren aufgezeichnet. Im Gegensatz zu Anfängern vermögen demnach versierte Faustkeilhersteller die Kraft ihrer Schläge entsprechend der gewünschten Größe des Abschlags zu dosieren. Diese Kontrolle braucht viel Übung. Und erst eine genau gesetzte Abfolge verschiedener Schläge jeweils an den richtigen Stellen führt zu exakt dem Gerät, das sie sich vorgestellt hatten.

Man kann sich denken, wie mühsam das alles zu lernen ist. Für Steinzeitmenschen war der Prozess sicherlich nicht leichter – aber damals ging es ums Überleben. Meines Erachtens trieben die Steingeräteherstellung sowie ihre Vermittlung in komplexen sozialen Prozessen unsere geistige Evolution voran. Wir sprechen gern vom »Homo artifex«; denn als geschulte und kreative Handwerker waren die steinzeitlichen Menschen Künstler und Gestalter.

Doch die intensive Schulung von Studenten stellt in diesem Projekt nicht die einzige Herausforderung dar. Auch mit den technischen Möglichkeiten für die Hirnaufnahmen müssen wir uns befassen. Im Kernspintomografen, für Messungen von Hirnaktivitätsmustern an sich das Mittel der Wahl, darf man sich nicht bewegen, sollen brauchbare Bilder entstehen. Wir wollen aber wissen, welche Hirngebiete beim Bearbeiten von Stein aktiv sind. Deswegen wichen wir auf das FDG-PET-Verfahren aus: Positronenemissionstomografie mittels radioaktiv markierten Zuckers, der in die Blutbahn injiziert wird. Die Signalsubstanz erhalten die Teilnehmer über eine Fußvene, eine etwas unangenehme Prozedur. So haben sie die Hände zum Arbeiten frei. Während sie den Stein behauen, nehmen stoffwechsel-

aktive Zonen des Gehirns den markierten Zucker auf, und anschließend können wir seine Verteilung messen.

Auf diese Art untersuchten wir das Geschehen im Gehirn während der Anwendung zweier Werkzeugtechnologien: des Oldowan und des späten Acheuléen. Die beiden standen am Beginn beziehungsweise am Ende des Altpaläolithikums, also jenes wichtigen, langen ersten Abschnitts der Altsteinzeit, in dem sich das menschliche Hirnvolumen fast verdreifachte. Das Altpaläolithikum fing – in Afrika – vor etwa 2,6 Millionen Jahren an und dauerte bis vor ungefähr 20 000 Jahren. Den Anfang machte die Kultur des Oldowan. Das Ende des Altpaläolithikums ist durch das späte Acheuléen mit seinen perfekten Faustkeilen charakterisiert, das nach einer Fundstätte bei Saint-Acheul in der Picardie heißt. Uns interessierte, ob die Entwicklung dieser Technologien wohl neuartige Anforderungen an die Hirnleistung gestellt hatte, was dann über Jahrtausende durch Selektionsprozesse zur Volumenvergrößerung geführt haben könnte.

Die Oldowan-Kultur ist nach der Olduvai-Schlucht in Tansania benannt. Erstmals hat sie das Forscherehepaar Louis und Mary Leakey Mitte des 20. Jahrhunderts beschrieben. Dieser Werkzeugtyp brachte nach neuerer Erkenntnis die ersten Steinmesser: scharfe Splitter, die man von einem Geröllstein abschlug. Noch einfacher geht es kaum. Trotzdem zeigten unsere PET-Untersuchungen, dass die Herstellung deutlich mehr Hirnschmalz verlangt, als wenn man zwei Steine nur irgendwie gegeneinanderschlägt.

Bei uns durften die Studenten das zunächst vier Stunden lang ohne Anleitung üben. Dabei lernten sie allmählich, bestimmte Merkmale des Steins zu erkennen, auf die es ankommt. Beispielsweise bekamen sie ein Gefühl für vorstehende Bereiche, wo Abschläge leichter gelingen. Schon diese ersten Erfahrungen spiegelten sich in veränderten Hirnaktivitäten: Denn ihre Sehrinde im Hinterkopf zeigte

Unterschiede zu vorher. Auch dass versierte Werkzeugmacher ihre Schläge genau zu dosieren verstehen, erkennt man auf den Aufnahmen – wenn solche Leute ein Oldowan-Messer herstellen, das den Vorbildern nahekommt. Bei ihnen ist zusätzlich die Supramarginalwindung hinten im Scheitellappen verstärkt aktiv. Dieser Bereich beteiligt sich am Wahrnehmen der Position von Körper und Gliedmaßen im Raum.

Das Acheuléen begann die einfache Oldowan-Kultur in Afrika vor etwa 1,7 Millionen Jahren zu verdrängen. Die Steinwerkzeuge wurden raffinierter. Unter anderem gab es die ersten groben, tropfenförmigen Faustkeile. Aus dem späten Acheuléen kennen wir dann bewundernswerte Stücke, wie einige 50 000 Jahre alte Geräte aus Boxgrove. Sie sind ganz fein gearbeitet, seitlich sehr flach, in mehreren Richtungen symmetrisch und haben völlig gleichmäßige, scharfe Kanten. Das zeugt von höchster Handwerkskunst. Möchte man das nachmachen, muss man nicht nur jeden einzelnen Schlag genau kontrollieren, sondern ihn auch sorgsam planen. So wie ein Golfer für jeden Schlag das passende Eisen wählt, verwendet der Steinhauer je nach Bedarf harte steinerne Hämmer oder weichere aus Knochen oder Geweih, wenn er Kanten und Oberflächen vorbereitet, damit sie in gewünschter Weise brechen oder absplittern. Er muss wiederholt zwischen den unterschiedlichen Arbeitsschritten wechseln und darf dabei das Endergebnis nie aus den Augen verlieren. Aus eigener leidvoller Erfahrung weiß ich, dass man die Arbeit nicht abkürzen darf. Die Struktur des Steins gibt die Abfolge unerbittlich vor. Wird man ungeduldig, sollte man lieber eine Pause einlegen.

Wenn es endlich gelingt, der anspruchsvollen Aufgabe gerecht zu werden, spiegelt sich das tatsächlich in den PET-Aufnahmen wider. Beim Anfertigen eines schönen Faustkeils beteiligen sich auch einige derselben Hirngebiete wie bei einem Oldowan-Werkzeug. Doch nun ist in der präfrontalen Hirnrinde auch die rechte untere Stirnhirnwindung aktiv. Neurowissenschaftler wie Adam Aron von der University of California in San Diego setzen dieses Gebiet in Beziehung zu der kognitiven Kontrolle über unpassende Impulse, die beim Umschalten zwischen verschiedenen Aufgaben notwendig ist.

Mit einem Trick konnten wir unsere PET-Ergebnisse inzwischen per Kernspintomograf bestätigen, der höher aufgelöste Bilder liefert. Dazu arbeiteten wir mit Thierry Chaminade zusammen, der heute am Institut de Neurosciences de la Timone, Université Aix-Marseille, tätig ist. Die in alter Steinmetzkunst geschulten Probanden durften sich im Scanner zwar nicht rühren, sahen dabei aber Videos von der Herstellung eines Oldowan- oder Acheuléen-Geräts. Denn viele Forscher, darunter Chaminade, haben nachgewiesen, dass beim reinen Beobachten und dabei innerlichen Nachvollziehen einer Handlung viele derselben Hirnsysteme benutzt werden wie bei der Tätigkeit selbst. Das funktionierte auch in unserem Fall gut. Wie schon zuvor bei den PET-Studien beteiligten sich für Oldowan- und Acheuléen-Geräte die gleichen visuell-motorischen Areale. Und wenn der Film die Anfertigung von Werkzeugen des späten Acheuléen zeigte, war zusätzlich die rechte untere Stirnhirnwindung aktiv.

Unsere Schlussfolgerung: Während schon die Technologien früher Oldowan-Stadien anspruchsvolle handwerkliche

## Trieb das Herstellen von Werkzeug die Hirnevolution eines »Homo artifex« voran?

Fertigkeiten voraussetzten, benötigten die Methoden des Acheuléen offenbar ein erhöhtes Maß an kognitiver Verhaltenskontrolle durch den präfrontalen Kortex. Diese These würde gut zu Fossilbefunden passen, wonach das späte Acheuléen zu den Phasen mit der schnellsten Hirngrößenzunahme der letzten zwei Millionen Jahre gehörte. Was von beidem Ursache und was Folge war, erzählen die Fossilien nicht. Trieb das Herstellen von Werkzeug die Hirnevolution eines »Homo artifex« voran, oder war diese Kunst lediglich eine Begleiterscheinung davon? Um hier weiterzukommen, wollten wir noch mehr darüber herausfinden, was im Gehirn beim Erlernen solcher Tätigkeiten vorgeht.

Ich musste 300 Stunden üben, bis ich endlich Faustkeile von ähnlicher Güte wie die von Boxgrove zu Stande brachte. Vielleicht wäre es mit einem Lehrer oder in einer Gemeinschaft professioneller Steingerätehersteller schneller gegangen, doch sicher bin ich nicht. Es gibt zwar seit Jahrzehnten Forschungen zur Arbeitsweise in der Altsteinzeit selbst, aber fast keine systematischen Studien zum Lernprozess. Um diese Lücke zu schließen, bot mir der Archäologe Bruce Bradley von der University of Exeter 2008 eine Zusammenarbeit an. Er selbst schlägt seit Jahren Steinwerkzeuge und wollte die nächste Generation akademischer Steinmetze heranziehen. Er schlug mir vor, dabei Hirnscans zu erfassen.

Damals verlockte mich besonders ein neues Verfahren, mit dem man Nervenfasern des Gehirns, die so genannte weiße Substanz, darstellen kann: die Diffusions-Tensor-Bildgebung oder DTI (englisch: diffusion tensor imaging), eine Variante der Magnetresonanztomografie. Bogdan Draganski, damals an der Universität Regensburg, heute an der Université de Lausanne tätig, hatte damit 2004 gezeigt, dass sich die »Verdrahtung« zwischen Hirngebieten verändert, wenn man Jonglieren lernt. Bis dahin hieß es meist, das erwachsene Gehirn sei kaum noch plastisch.

Wir vermuteten, dass ebenfalls in einem gewissen Ausmaß neue neuronale Verbindungen entstehen, wenn man sich in der Herstellung von Steingeräten übt. Gespannt waren wir darauf, welche Nervenetze wohl davon betroffen sein würden. Falls die Anforderungen der Steingeräteindustrien tatsächlich die Hirnevolution vorantrieben hatten, konnten wir womöglich einen Hinweis auf einen solchen Zusammenhang finden. Im Idealfall würden wir bei

Mehr Wissen auf  
**Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema  
Menschwerdung finden Sie unter  
[spektrum.de/t/menschwerdung](http://spektrum.de/t/menschwerdung)



JOSE-MANUEL BENITO ÁLVAREZ / PUBLIC DOMAIN



**Dieser Faustkeil aus Feuerstein stammt von einem Anfänger. Jedes abgeschlagene Stück wird registriert, vermessen und gewogen. So lassen sich spätere Lernfortschritte im handwerklichen Geschick und Planen verfolgen.**

den »Steinmetzlehrlingen« im Verlauf ihrer Ausbildung Muster von anatomischen Veränderungen entdecken, die im Kleinen dem entsprechen, was mutmaßlich einst während der Menschenevolution geschah.

Zu unserer Freude untermauerte die Studie unsere Hirndaten aus den PET- und MRT-Aufnahmen: Im Zuge des Trainings wurden genau jene Nervenfaserverzüge stärker, welche die zuvor identifizierten aktivierten Gebiete der Stirn- und Scheitelregion miteinander verbinden, einschließlich die für die Impulskontrolle so wichtige rechte untere Stirnhirnwindung. Zudem änderten sich die Nervenstränge umso deutlicher, je mehr Stunden jemand trainiert hatte.

Forscher sprechen von phänotypischer Akkommodation, wenn sich ein Organismus direkt an seine Lebensumstände anpasst, ohne dass er sich dabei genetisch verändert. Auch das Gehirn kann in dieser Weise reagieren. Eine solche Hirnplastizität verleiht die Flexibilität, neues Verhalten auszuprobieren und dabei auch bis an die Grenzen der derzeitigen Anpassungsmöglichkeiten zu gehen. Sollten einige Individuen hierbei ein besonders vorteilhaftes Verhaltensmuster entwickeln, dürften sie es beibehalten. Dann beginnt ein evolutionäres Wettrennen: Von der natürlichen Selektion bevorzugt sind nun Individuen mit genetischen Varianten, die dazu verhelfen, das neue Verhaltensmuster leichter, effizienter oder zuverlässiger zu erlernen als die Artgenossen. So wird sich die neue Anlage über die Generationen durchsetzen.

Nach unseren Daten wäre zumindest nicht ausgeschlossen, dass ähnliche Zusammenhänge die menschliche Gehirnevolution antrieben und den »Homo artifex« hervorbrachten. Über bekannte evolutionäre Mechanismen könnte die Werkzeugherstellung somit erbliche Hirnveränderungen mit sich gebracht haben.

Aber waren in der menschlichen Entwicklung an den betreffenden Stellen überhaupt spezifische Veränderungen aufgetreten, die zu jenen passen, welche wir bei unseren Studenten gesehen hatten? Weil Schädelknochen keinen derart genauen Aufschluss geben, betrachteten wir, wie die entsprechenden Strukturen bei Schimpansen aussehen, unseren nächsten lebenden Verwandten. Schon für unser DTI-Projekt hatte ich Erin Hecht zur Mithilfe bei der Datenanalyse gewinnen können. Sie arbeitet heute an der Georgia State University in Atlanta; in ihrer Doktorarbeit an der Emory University hatte sie anatomische Strukturen von Menschen- und Schimpansenhirnen gegenübergestellt.

Dabei hat die Forscherin anhand von DTI-Aufnahmen die weiße Hirnsubstanz von Schimpansen und Menschen verglichen. Ihre Daten bestätigten nun unsere Vermutung: Die gleichen neuronalen Netze, die in unseren eigenen Studien aufgefallen waren, sind beim Menschen stärker ausgeprägt als beim Schimpansen. Das gilt in besonderem Maß für Nervenstränge hin zur rechten unteren Stirnhirnwindung. Das bestärkt meine These, wonach die Werkzeug-

herstellung ein Hirnwachstum bedingte. Allerdings spielten hierbei sicherlich noch viele weitere Fertigkeiten mit, die das Leben den Menschen der frühen Steinzeit abverlangte.

Wie lange es damals dauerte, zu lernen, perfekte Stein-geräte zu schlagen, weiß ich nicht. In unserer Studie zu den Hirnverbindungen übten die Teilnehmer unter Anleitung im Durchschnitt 167 Stunden, und dann fiel es ihnen immer noch schwer, einen ordentlichen Faustkeil zu fabrizieren. Meine 300 Stunden ohne Lehrer waren also vielleicht gar nicht so schlecht. Jedoch wissen wir aus eigener Erfahrung, wie langweilig und frustrierend eine solche scheinbar ewig dauernde Ausbildung sein kann. Durchzuhalten erfordert eine Menge Motivation und Selbstkontrolle – zwei im Licht unserer Evolution bemerkenswerte Eigenschaften.

### Quellen des Ansporns:

#### Eigene hohe Motivation ... oder ein guter Lehrer

Die nötige Motivation kann ein guter Lehrer geben, aber der Ansporn kann auch aus einem selbst kommen. Dann mag einen die zu erwartende Leistung oder eine sonstige zukünftige »Belohnung« anfeuern. Viele Wissenschaftler halten jedoch das Lehren für das eigentliche definierende Kennzeichen von menschlicher Kultur – wobei es zugleich für viele Lebensbereiche bis hin zu Sozialbeziehungen und technologischen Herausforderungen unerlässlich ist, sich die Zukunft vorstellen zu können.

Hohe Motivation wird einen ohne gehörige Selbstbeherrschung allerdings nicht weit bringen. Viele geistige Fähigkeiten hängen davon ab, wie gut man sich selbst im Griff hat, also störende Impulse unterbinden kann. Laut einer neuen Studie von Evan MacLean, der jetzt an der University of Arizona in Tucson arbeitet, an 36 Vogel- und Säugerarten korreliert deren Fähigkeit zu Impulskontrolle und Planung mit der Hirngröße. Dazu passt, dass die erfolgreiche Herstellung eines Faustkeils davon abhängt, wie gut Hirngebiete für Impulskontrolle und Planung eingebunden sind.

Zusätzlich muss ein Werkzeugmacher ein vertieftes Verständnis für Materialeigenschaften erwerben. Sich das selbst beizubringen, ist sehr schwer. Der Lernfortschritt erfolgt nämlich stufenweise. Die meiste Zeit muss man einfach viel allein üben, um ein Gefühl für die richtigen Schläge zu entwickeln, allmählich mehr Routine zu erwerben und das bisher erreichte Können zu festigen. Aber ab und zu hilft ein Ratschlag, damit man eine Stufe weiterkommt. Natürlich findet man manchmal einen neuen Kniff auch selbst, doch mit Lehrer geht es insgesamt schneller und leichter.

Da genügt oft schon reines Zuschauen. In der Tat gilt das getreuliche Nachahmen in der vergleichenden Psychologie als eine Säule unserer Kultur. Etliche Forscher, darunter der Evolutions- und Entwicklungspsychologe Andrew Whiten von der University of St Andrews (Schottland), weisen darauf hin, dass das Imitationsvermögen von Menschenaffen nicht im Entferntesten an den starken Nachahmungsimpuls und die hohe Präzision heranreicht, die Menschen bereits als Kinder zeigen.

Doch wie weit bringt einen reine Nachahmung? Schach etwa vermag man durchaus zu begreifen, wenn man viele Spiele verfolgt; es geht allerdings wesentlich leichter, wenn

einem jemand die Regeln und Strategien erklärt. Gleiches gilt für die Herstellung von Steinwerkzeugen. Das zeigte sich deutlich, als Thomas Morgan von der University of California in Berkeley und seine Kollegen kürzlich Studenten beibrachten, einfache Oldowan-Geräte anzufertigen. Dabei behaute ein versierter Lehrer vor den Augen eines Teilnehmers entweder nur wortlos einen Stein beziehungsweise zeigte ihm die richtige Handhabe auch direkt an dessen Werkstück; oder er kleidete die Arbeitsschritte und Hinweise zugleich in Worte. Vielleicht werden wir durch Studien dieser Art einmal mehr darüber erfahren, wann und zu welchem Zweck die menschliche Sprache entstand.

Daneben sind weitere Verbindungen zwischen Werkzeugherstellung und Sprachentwicklung denkbar. Bekanntlich wirken die meisten Hirnregionen bei den verschiedensten Verhaltenserscheinungen in irgendeiner Weise mit. Man denke nur an das nach dem französischen Arzt Paul Broca (1824–1880) benannte Sprachzentrum in der linken unteren Stirnhirnwandung. Befunde seit den 1990er Jahren zeigen: Dieses Areal ist auch am Verarbeiten von Musik oder an mathematischen Operationen beteiligt sowie daran, komplexe manuelle Tätigkeiten zu verstehen. Angesichts der starken Neigung des Menschen, mit Gesten zu kommunizieren, postulierten Forscher schon früher, dass Gestikulieren im Zusammenhang mit Werkzeugherstellung der Lautsprache in der Evolution vorausging und sogar erst die Voraussetzung dafür war. Am gründlichsten hat der Mathematiker und Hirnforscher Michael A. Arbib von der University of Southern California in Los Angeles diese Idee ausgearbeitet.

Unsere neueste Hypothese nach unseren Forschungsergebnissen: Durch die Anforderungen der Steingeräteherstellung in der Altsteinzeit veränderten sich bestimmte neuronale Netze, zu denen die untere Stirnhirnwandung zählt. Dieselben Strukturen unterstützten dann auch primitive Kommunikationsformen mit Gesten und möglicherweise sogar Lauten. Jene »protolinguische«, also einfache sprachliche Verständigungsweise unterlag evolutionären Selektionsprozessen, die schließlich die spezifischen Anpassungen für unser Sprachvermögen hervorbrachten. Das Schöne ist – diese Hypothese können wir jetzt in praktischen Studien prüfen. ◀

### QUELLEN

**Hecht, E. E. et al.:** Acquisition of Paleolithic Toolmaking Abilities Involves Structural Remodeling to Inferior Frontoparietal Regions. In: *Brain Structure and Function* 220, S. 2315–2331, 2015

**Morgan, T. J. H. et al.:** Experimental Evidence for the Co-Evolution of Hominin Tool-Making Teaching and Language. In: *Nature Communications* 6, 6029, 2015

**Renfrew, C. et al. (Hg.):** *The Sapien Mind: Archaeology Meets Neuroscience*. Oxford University Press, 2009

**Stout, D., Kreisheh, N.:** Skill Learning and Human Brain Evolution: An Experimental Approach. In: *Cambridge Archeological Journal* 25, S. 867–875, 2015

### LITERATURTIPP

**Pringle, H.:** Die Geburt der Kreativität. In: *Spektrum der Wissenschaft* 6/2013, S. 22–29  
*Ein Artikel über die ersten Spuren von Schmuck und Kunst*

# MEDIZIN

# EBOLAS ZWEITER ANGRIFF

**Viele Überlebende der Ebolaepidemie von 2014 leiden heute unter Hirnfunktionsstörungen und anderen schweren Beeinträchtigungen. Die Gründe dafür sind vermutlich persistierende Ebolaviren und Überreaktionen des Immunsystems.**



**Seema Yasmin** ist Medizinerin und Wissenschaftspublizistin. Ihr Artikel entstand bei Recherchen in Liberia, die vom Pulitzer Center on Crisis Reporting unterstützt wurden.

► [spektrum.de/artikel/1420983](https://www.spektrum.de/artikel/1420983)

Josephine Karwah trat frisch entlassen aus der Ebola-Behandlungsstation in Monrovia, der Hauptstadt Liberias, und streichelte ihren schwangeren Bauch. Nur zwei Wochen zuvor, im August 2014, war sie mit letzter Kraft in das weiße Zelt gehumpelt. Da hatte sie die Station bereits gekannt, denn ihre Mutter war hier gestorben und in einem weißen Leichensack fortgeschafft worden. Auch der Vater war dem Ebolafieber zum Opfer gefallen, ebenso Tante und Onkel. Josephine selbst jedoch lebte. Sie und ihr ungeborenes Kind hatten das Fieber überstanden und gehörten damit zu den 17 000 Überlebenden der Ebola-epidemie, die von 2014 bis 2016 in Westafrika wütete und 11 300 Menschen tötete – rund 40 Prozent der Infizierten (siehe **Spektrum** Januar 2016, S. 72). Für Josephine, die wieder in ihr Heimatdorf zurückkehrte, war klar, dass sie ihr Baby »Miracle«, Wunder, nennen würde.

Dann begann der Albtraum. Zurück zu Hause, eine Autostunde von Monrovia entfernt, wurde Josephine von den Bildern ihrer toten Familienmitglieder heimgesucht. Pochende Kopfschmerzen unterbrachen ihre nächtlichen Angstträume, und stechende Pein brannte in ihren Hüften und Knien, während sie versuchte, wieder einzuschlafen. Tagsüber half sie ihrer älteren Schwester, Seife zu kochen, um diese auf dem Markt zu verkaufen. Doch es fiel ihr schwer, sich auf die Arbeit zu konzentrieren, denn ihr





Medizinische Einsatzkräfte in Schutzanzügen helfen einer mutmaßlich Ebolakranken, sich in eine Klinik zu begeben. Die Aufnahme entstand im November 2014 nahe der Stadt Macenta in Guinea (Westafrika).

rechtes Auge tat weh, und durch das linke erschien die Welt wie hinter Wolken, als würde sie durch ein beschlagenes Brillenglas blicken. Wenn sie in die Geldwechselstube ging, kam sie mit falschen Beträgen wieder heim: Sie konnte sich nicht mehr erinnern, wie viele liberianische Dollar sie dabei gehabt hatte, als sie das Haus verließ.

Josephine ist eine von 1500 Ebolaüberlebenden in Liberia. Etliche leiden wie sie unter Gedächtnisverlust, Gelenk- und Muskelschmerzen sowie Augenproblemen. Im Februar 2016 berichtete der liberianische Epidemiologe Mosoka Fallah während einer Tagung in Boston über die bisher größte Studie mit Ebolaüberlebenden. Seinen vorläufigen Daten zufolge sehen sich mehr als die Hälfte jener, die das Fieber überstanden haben, mit Muskel- und Gelenkproblemen konfrontiert. Zwei Drittel sind von neurologischen Störungen betroffen, und rund 60 Prozent klagen ein Jahr nach der Erkrankung über Augenkomplikationen. Zwar hat die Weltgesundheitsorganisation WHO den öffentlichen Notstand in Westafrika im März 2016 für beendet erklärt, doch nun manifestiert sich bei zahlreichen Menschen das, was die Ärzte Post-Ebola-Syndrom nennen.

Das Krankheitsbild war schon vorher beschrieben worden. Nach kleineren Ebolaausbrüchen in Ost- und Zentralafrika, die seit den 1990er Jahren immer wieder einmal aufflammten, hatten Überlebende an schmerzenden Gelenken, Muskeln und beeinträchtigtem Sehvermögen gelitten – oft so schwer wiegend, dass sie nicht mehr arbeiten konnten. Dabei hatte es sich jedoch um begrenzte Infektionswellen gehandelt mit relativ wenigen Betroffenen. Die Ebolaepidemie 2014 in Westafrika hingegen ließ 17 000 Überlebende zurück, die nun dem Risiko eines Post-Ebola-Syndroms ausgesetzt sind. Mediziner und Patienten wissen: Die Sache ist nicht vorbei.

Fallahs Büro befindet sich am Ende eines langen Korridors im John F. Kennedy Medical Center in Monrovia. Der Harvard-Absolvent, aufgewachsen in einem von Liberias größten Slums, gehörte zu einem Team, das während der westafrikanischen Ebolaepidemie sowohl Behandlungs- als auch Impfansätze testete. Daraus entwickelten sich seine Studien mit Überlebenden.

Die US-Gesundheitsbehörde National Institutes of Health (NIH) und das liberianische Ministerium für Gesundheit und soziale Fürsorge hatten 2014 ein gemeinsames Projekt ins Leben gerufen, die Partnership for Research on Ebola Vaccines in Liberia (»Prevail«, Partnerschaft zur Erforschung von Ebolaimpfstoffen in Liberia). Doch just als die ersten Tests zur Sicherheit des Impfstoffs abgeschlossen waren, ebte die Epidemie in Liberia ab. Die Zahl der Ebolaneuinfektionen fiel auf einen viel niedrigeren Stand als erwartet, daher wurde die erste Studie, Prevail I, deutlich reduziert. Es sollten jetzt nur noch die Sicherheit des Impfstoffs und

## Tausenden droht das Post-Ebola-Syndrom. Mediziner und Patienten wissen: Die Sache ist nicht vorbei

die Immunreaktion auf die Impfung untersucht werden, aber nicht mehr die Schutzwirkung gegenüber einer Ebola-Infektion.

Die Wissenschaftler, die an Prevail mitarbeiteten, widmeten sich nun verstärkt den Nachwirkungen der Ebola-epidemie. Denn aus ganz Westafrika trafen Berichte von Überlebenden ein, die sich körperlichen und psychischen Problemen ausgesetzt sahen. Fallah wurde zum Studienleiter in Liberia ernannt und verlagerte seinen Forschungsschwerpunkt hin zu Patienten, die das Fieber überstanden hatten.

Der Epidemiologe ließ Teile des Kennedy Medical Centers umbauen und die notwendige Infrastruktur für die Untersuchung von Ebolaüberlebenden schaffen. Vor seinem Büro und den ganzen Flur hinauf saßen fortan Frauen und Männer, die auf einen Arzttermin warteten. Seit Juni 2015 haben sich mehr als 1000 von den 1500 Betroffenen im Land dazu entschlossen, an der Studie teilzunehmen. Ihr Gesundheitszustand wird fünf Jahre lang halbjährlich untersucht. Dabei soll jeder Teilnehmer vier Freunde oder Verwandte mitbringen, die mit ihm in engem Kontakt stehen, sich aber nicht infiziert haben. Fallah hofft auf diese Weise, mehrere tausend Personen zu rekrutieren, die als Kontrollgruppe dienen und den Forschern helfen können, die für das Post-Ebola-Syndrom typischen Symptome zu erkennen.

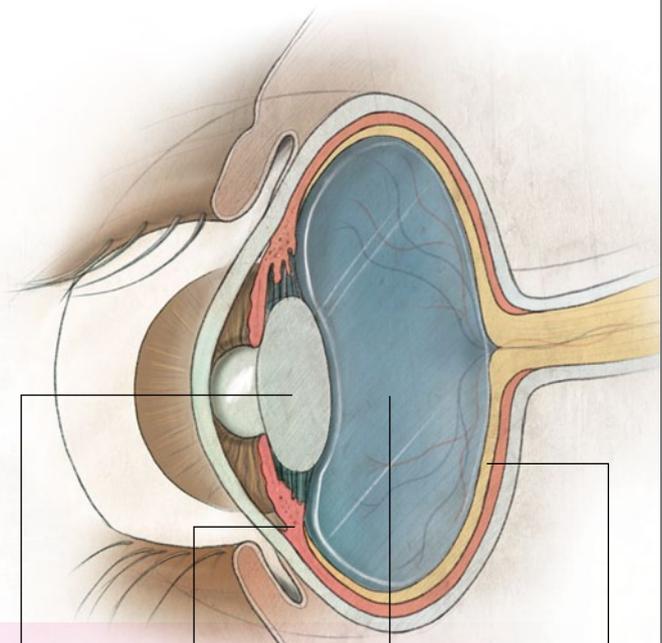
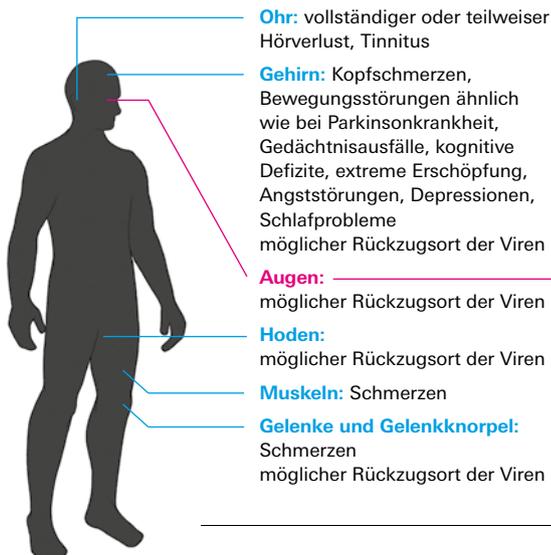
Als Fallah im Februar 2016 die ersten Studienergebnisse vorstellte, zeichneten die Zahlen ein düsteres Bild: 60 Prozent der Teilnehmer berichteten über Augenprobleme, 53 Prozent über Muskel- und Gelenkschmerzen und 68 Prozent über neurologische Störungen. Letztere begann Fallahs Team eingehender zu untersuchen. Bei einem Neurologentreffen im April berichteten die Wissenschaftler, dass nahezu drei von vier Ebolaüberlebenden über Kopfschmerzen klagten, ebenso viele mit einer Depression kämpften, und bei gut jedem zweiten Gedächtnisstörungen beziehungsweise eingeschränkte Gehfähigkeit auftreten. Bei jedem vierten bis fünften Überlebenden waren Veränderungen der Sehfähigkeit zu verzeichnen. Sie gingen bei zahlreichen Betroffenen

### AUF EINEN BLICK SPÄTFOLGEN DER SEUCHE

- 1 Offiziell ist die Ebolaepidemie in Westafrika beendet. Sie hinterlässt 17 000 Überlebende, von denen mehr als die Hälfte am Post-Ebola-Syndrom leiden.
- 2 Eine liberianische Studie mit Überlebenden hat ergeben, dass etliche von ihnen Augenprobleme, Muskel- und Gelenkschmerzen und neurologische Störungen haben.
- 3 Menschen, die als geheilt und symptomfrei gelten, müssen befürchten, dass die Krankheit zurückkehrt. Zudem sehen sie sich vielfach sozialer Isolation ausgesetzt.

## Das Post-Ebola-Syndrom

Mehr als jeder zweite Ebolaüberlebende, der das Fieber überwunden hat, leidet unter ernststen Beeinträchtigungen. Das ergab eine Studie mit mehr als 1000 von insgesamt 1500 bestätigten Überlebenden in Liberia. Das Spektrum der Beschwerden reicht von neurologischen Störungen bis zu Muskelschmerzen. Ärzte vermuten, das Virus könnte sich nach dem Abklingen der akuten Krankheitsphase in Körperregionen verstecken, in denen wenig Immunzellen patrouillieren – etwa im Augapfel. Möglich erscheint auch, dass die anfängliche Immunreaktion auf den Virusbefall zu Entzündungen führt, die dann die Organe schädigen. Besonders häufig betroffen sind die Augen: Etwa 60 Prozent der Patienten berichten über Augenschmerzen und beeinträchtigtes Sehvermögen.



### Linse

Trübungen (Katarakte) vor allem im vorderen Teil der Linse, verschwommene Wahrnehmung, Verlust der Sehfähigkeit, beeinträchtigtes Dämmerungssehen, Wahrnehmung von Halos um Lichtquellen

### Glaskörperflüssigkeit

lokale Trübungen auf Grund von Eiweißaggregaten und Schwebstoffen

### Mittlere Augenhaut

Schwellung, Augenrötung, Schmerzen, Lichtempfindlichkeit, verschwommenes und beeinträchtigtes Sehen, »fliegende Mücken« (Mouches volantes)

### Retina (Netzhaut)

Ablösung, veränderte Pigmentierung, Entzündungen, partieller Sehverlust oder Blindheit, beeinträchtigtes Dämmerungssehen, Lichtempfindlichkeit, Wahrnehmung von Blitzen oder Punkten und Flecken

einher mit einer Uveitis, einer Entzündung der mittleren Augenhaut.

Die Sehstörungen zogen schon bald Fallahs besondere Aufmerksamkeit auf sich. Bei der Lektüre früherer Berichte, die bis in die 1990er Jahren zurückgingen, stieß er auf viele ähnliche Beschreibungen. Nach einem Ebolaausbruch im Kongo 1995 beispielsweise hatten Ärzte 20 Überlebende untersucht, einige davon mehr als zwei Monate nach der Infektion. Vier berichteten über Augenschmerzen, übermäßige Lichtempfindlichkeit, verminderte Sehschärfe und Entzündungen der Augenhaut. Nach einem weiteren Ausbruch in Uganda 2007 wurden 49 Überlebende mehr als zwei Jahre lang beobachtet. Bei etlichen von ihnen traten neben Gedächtnisausfällen, Gelenkschmerzen, Schlafstörungen und Hörverlusten auch verschwommenes Sehen und Schmerzen hinter den Augen auf.

In einer neueren Studie mit acht Ebolapatienten, die an US-Kliniken behandelt worden waren, hatten sämtliche

Teilnehmer gesundheitliche Probleme – und zwar noch vier Monate nach der Entlassung. Sechs litten an psychischen Symptomen wie Depressionen, Angstzuständen und Gedächtnisstörungen, und fünf klagten über Augenpein und vermindertes Sehvermögen. Es gab keinen Zweifel mehr, dass das Post-Ebola-Syndrom tatsächlich existiert. Doch die verfügbaren Daten erlaubten keinen Aufschluss darüber, wie das Virus die Beschwerden hervorruft.

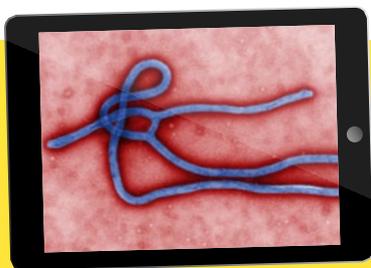
Mit einer ähnlich unklaren Situation hatten sich Ärzte schon beim HI-Virus auseinandersetzen müssen. In den 1980er Jahren versuchten sie dessen Wirkung zu verstehen, indem sie sich auf Erkenntnisse über andere Viruserkrankungen stützten. Das Gleiche tun sie jetzt bei Ebola, sagt Avindra Nath, Neurologe und Wissenschaftler an den NIH, der eng mit Fallah zusammenarbeitet. Nath hat fast drei Jahrzehnte damit verbracht, Infektionen des Gehirns zu erforschen. Zwar ist Ebola kein Retrovirus wie HIV, doch der Neurologe ist davon überzeugt: Viele Jahre HIV-Forschung

haben den Erkenntnisgewinn darüber, wie Ebola auf das Nervensystem wirkt, erheblich beschleunigt. »Viele, die sich aktuell mit Ebola befassen, haben das zuvor mit HIV getan. Wir bauen jetzt auf unseren Erfahrungen auf und passen unsere Techniken an das neue Arbeitsgebiet an«, erläutert er.

Nath fragt sich, ob die neurologischen Symptome bei Ebolaüberlebenden von der Virusinfektion selbst stammen oder auf Reaktionen des Immunsystems zurückzuführen sind. Zum Vergleich: HIV befällt Immunzellen namens Makrophagen, die daraufhin im Gehirn Zytokine freisetzen – kleine Signalproteine, die auf Nervenzellen toxisch wirken können. Studien an Affen haben ergeben, dass auch Ebola-viren Makrophagen infizieren und dabei bisweilen einen massiven »Zytokinsturm« auslösen. Zytokine dienen als Botenstoffe, die Entzündungsreaktionen dirigieren und die Durchblutung erhöhen können. Ihre Freisetzung in großen Mengen kann im gesamten Körper zu Blutungen (Hämorrhagien) beitragen, auch im Gehirn, was die Gedächtnisprobleme, Kopfschmerzen und Bewegungsstörungen erklären könnte, die bei Ebolaüberlebenden auftreten.

Der Blick auf wieder andere Viren erlaubt vielleicht, den extremen Erschöpfungszustand (»Fatigue«) zu verstehen, der zahlreiche Betroffene befällt. So kämpften 25 Prozent der Patienten, die am Denguefieber erkrankt waren, und fast 40 Prozent derer, die eine Infektion mit dem Epstein-Barr-Virus erleiden, nach überstandener akuter Krankheit mit Fatigue. Auch hier könnten entzündungsfördernde Zytokine die Ursache sein. Sie wirken auf Rezeptoren im Gehirn und können so Appetitlosigkeit sowie Schwäche auslösen.

Gelenkschmerzen gehören zu den häufigsten Symptomen nach überstandener Ebolafieber. Beispielsweise klagten in einer Studie mit Überlebenden des Ausbruchs 1995 im Kongo zwei von drei Betroffenen darüber – und dies zwei Jahre nach der Infektion. Warum? Bestimmte Proteine, die an der Immunreaktion mitwirken, könnten verklumpen und sich dann in Hüft- oder Schultergelenken ansammeln,



CDC / CYNTHIA GOLDSMITH

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Ebola finden Sie unter [spektrum.de/t/ebola](http://spektrum.de/t/ebola)

wo sie die Gelenkschleimhaut reizen und Schwellungen verursachen. Andere Komponenten des Immunsystems, etwa Antikörper, tragen vielleicht ebenfalls dazu bei und eignen sich deshalb möglicherweise als Ersatzmarker für Gelenkprobleme. Nach dem Ausbruch im Kongo hatten jene Überlebenden, die unter schmerzenden Gelenken litten, höhere Antikörperspiegel. Ihre Pein könnte noch von anderen Proteinen mitverursacht worden sein: D-Dimeren, kleinen Proteinfragmenten, die sich von Blutgerinnseln lösen und bei verschiedenen anderen Infektionskrankheiten mit



Josephine Karwah aus dem Dorf Smell No Taste bei Monrovia überlebte das Ebolafieber, leidet nun aber am Post-Ebola-Syndrom.

Gelenksbeschwerden während der Genesung in Verbindung gebracht werden. So hatten Patienten, die nach einer Ansteckung mit dem Bakterium *Neisseria meningitidis* über schmerzende Gelenke berichteten, hohe Konzentrationen von D-Dimeren im Blut. Bei Ebolaüberlebenden wurde dieser Zusammenhang noch nicht untersucht.

Auch bei den Augenkomplikationen nach überstandener Ebolafieber halten Experten eine Beteiligung des Immunsystems für wahrscheinlich. Besonders beunruhigend ist jedoch der Verdacht, das Virus könne sich im Auge vermehren, nachdem es aus dem Blut längst verschwunden ist. Der Augapfel könnte den Erregern demnach als Versteck dienen, in dem sie sich den Angriffen des Immunsystems entziehen. Hierfür gibt es empirische Belege. Im September 2014 beispielsweise erkrankte der amerikanische Arzt Ian Crozier während eines Einsatzes in Sierra Leone an Ebola. Weniger als zwei Monate, nachdem er aus einem US-Krankenhaus entlassen worden war, begann sein linkes Auge zu schmerzen und sich von blau nach grün zu verfärben. Als die behandelnden Ärzte mit einer Kanüle Material aus dem Augennern entnahmen, fanden sie darin mehr Virus-exemplare als im Blut während der akuten Fieberphase.

Der Augapfel ist wohl nicht der einzige Rückzugsort des Ebolavirus. Auch die Hoden, das Zentralnervensystem und die Gelenkknorpel könnten dazugehören. Jedenfalls dienen sie mehreren anderen Pathogenen als Zuflucht, darunter HIV. Weil diese Körperregionen anfällig sind für Kollateralschäden, sobald das Immunsystem gegen Eindringlinge mobil macht, verfügen sie zum Schutz vor starken Entzündungsreaktionen über Moleküle, die Immunreaktionen unterdrücken, sowie über physische Barrieren, die Immunzellen aufhalten. Dies macht sie freilich auch zu sicheren Zonen für Viren. Erreger, die dort ausharren, haben möglicherweise dafür gesorgt, dass die schottische Kranken-

schwester Pauline Cafferkey ein Jahr nach der Erstinfektion erneut erkrankte – und zwar zu einem Zeitpunkt, als bereits neun Monate lang keine Ebolaviren mehr in ihrem Blut nachgewiesen worden waren.

Falls der Erreger auch in den Hoden überdauert, wäre dies eine mögliche Erklärung dafür, warum er bei einigen Überlebenden noch Monate nach dem Abklingen der Symptome im Sperma auftritt. Bei Beginn des Ausbruchs in Westafrika empfahl die WHO den Genesenden, nach dem ersten negativen Bluttest mindestens drei Monate lang nur kondomgeschützten Geschlechtsverkehr zu haben. Diese Empfehlung beruhte auf Daten zum Ebolaausbruch 1995 im Kongo. Damals war das Virus noch 82 Tage nach dem Auftreten der ersten Symptome (und rund 60 Tage nach der Entlassung aus dem Krankenhaus) im Sperma von Betroffenen gefunden worden.

Während der westafrikanischen Epidemie von 2014 bis 2016 jedoch gab es Überlebende, in deren Samenflüssigkeit die Erreger wesentlich länger nachweisbar waren: teils mehr als ein Jahr nach der akuten Krankheitsphase. Bei der Konferenz in Boston bestätigte Fallah diese Beobachtungen. Er berichtete sogar über liberianische Patienten, deren Sperma

## Die neuen Erkenntnisse über den Erreger könnten dazu führen, die Überlebenden zu stigmatisieren

noch 18 Monate nach dem Fieberschub Viren enthielt. Bei einigen Männern verschwand der Erreger zunächst aus der Samenflüssigkeit, tauchte jedoch binnen eines Jahres wieder darin auf. Die WHO ist jetzt dazu übergegangen, männlichen Ebolaüberlebenden ein Jahr lang nur geschützten Geschlechtsverkehr zu empfehlen, ebenso regelmäßige Untersuchungen des Spermas.

In seinem Büro in Monrovia verwahrt Fallah die Patientenakte einer Frau, deren Sohn im November 2015 an Ebola starb. Die Familie berichtete, keinen Kontakt zu Erkrankten oder Überlebenden gehabt zu haben. Fallah vermutet jedoch, die Mutter habe mit einem Überlebenden Geschlechtsverkehr praktiziert, sei dabei unbemerkt mit Ebola infiziert worden und habe die Krankheit an den Sohn weitergegeben. Schon zuvor, im März 2015, war der Epidemiologe mit dem Fall einer wahrscheinlich sexuell übertragenen Ebolainfektion befasst gewesen. Eine Frau, die der Krankheit erlag, hatte mit einem Mann Verkehr gehabt, der sechs Monate vorher aus einer Ebolabehandlungsstation entlassen worden war. Zwar fanden sich in Blutproben des Mannes keine Spuren des Virus, doch seine Spermaprobe war positiv.

All das bedeutet: Der Erreger kann nach dem Abklingen der Krankheitssymptome weiterhin im Körper vorkommen – und das sogar, wenn er im Blut nicht mehr nachweisbar ist. Ebola schlummert in vermeintlich gesunden Menschen, kann reaktiviert werden, erneut Symptome verursachen und die Betroffenen auch wieder ansteckend machen. Das Ge-

nom des Virus oder Teile seiner RNA in Körperflüssigkeiten von Überlebenden nachzuweisen, ist freilich noch nicht damit gleichzusetzen, dass sie das Virus auf andere übertragen können, betont Fallah. Er sieht eine große Gefahr: Die neuen Erkenntnisse über die Fähigkeiten des Erregers könnten dazu führen, die Überlebenden zu stigmatisieren. »Es ist schon schlimm genug, am Post-Ebola-Syndrom zu leiden, das wir bisher kaum verstehen«, sagt er, »doch unerträglich wird es, wenn man zusätzlich noch isoliert wird.«

Wie begründet seine Befürchtungen sind, zeigt die Geschichte Josephine Karwahs. Einige Tage, nachdem sie die Krankenstation in Monrovia verlassen hatte, wachte sie nachts wieder einmal auf, diesmal wegen schmerzhafter Bauchkrämpfe. Kurz darauf hatte sie einen Blasensprung. Zusammen mit ihrer Schwester Ophelia versuchte sie, telefonisch einen Krankenwagen zu rufen – erhielt aber die Auskunft, es sei keiner verfügbar. Sie nahm Kontakt zu einem Radiosender in Monrovia auf und bat um Beistand, doch niemand kam. Fünf Uhr morgens stolperte sie auf die Straße, in der Hoffnung, dort Hilfe zu finden. Als sie panisch schrie, kamen einige Frauen aus den Häusern gelaufen, doch niemand wollte sich einer Ebolaüberlebenden nähern. Josephine fiel mit dem Rücken gegen eine Mauer und spürte das Baby zwischen ihren Beinen. Sie presste, stöhnte und brachte ihr Kind zur Welt. Aber Miracle atmete nicht. Keiner half der jungen Mutter; schließlich trat ihr Bruder heran, nahm das tote Neugeborene an sich und wickelte es zusammen mit der Plazenta in ein Handtuch, in dem es später beerdigt wurde.

So viele Fragen quälen Josephine. War Miracle von dem Virus getötet worden, oder starb das Kind, weil keiner geholfen hatte? Lauert das Virus immer noch in ihr, und wird es, wenn sie noch einmal schwanger wird, auch ihre künftigen Babys töten?

Wenn Josephine im Rahmen der Überlebendenstudie im Kennedy Medical Center erscheint, stellt sie Fallah diese Fragen. Er befürchtet, auch die Gebärmutter könne dem Virus als sicherer Rückzugsort dienen. Vielleicht kehrt der Erreger eines Tages von dort zurück und bedroht nicht nur die junge Frau, sondern auch andere Menschen. Es ist auch möglich, dass der soziale Stress, dem Josephine als Ebolaüberlebende ausgesetzt ist, ihr Kind umgebracht hat. Wenn man von allen gemieden wird, nicht einmal Geld bezahlen kann, ohne es in Tücher einzuwickeln, der Geliebte sich abwendet – was macht das körperlich mit einem selbst und dem ungeborenen Kind? All das geht Fallah durch den Kopf, als er sagt: »Ich weiß es nicht. Wir werden versuchen, es herauszufinden.« ◀

### QUELLEN

**Christie, A. et al.:** Possible Sexual Transmission of Ebola Virus – Liberia, 2015. In: Morbidity and Mortality Weekly Report 64, S. 479–481, 2015

**Hunt, L., Knott, V.:** Serious and Common Sequelae after Ebola Virus Infection. In: Lancet Infectious Diseases 16, S. 270–271, 2016

**Varkey, J. B. et al.:** Persistence of Ebola Virus in Ocular Fluid during Convalescence. In: New England Journal of Medicine 372, S. 2423–2427, 2015

# Bald ist es so weit ...

Jetzt schon an Weihnachten denken und ein Abo verschenken!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

**Print** 12 Ausgaben, € 89,-  
**Digital** 12 Ausgaben, € 60,-  
**Print + Digital** € 95,-



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

**Print** 12 Ausgaben, € 85,20  
**Digital** 12 Ausgaben, € 60,-  
**Print + Digital** € 91,20



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

**Print** 12 Ausgaben, € 89,-  
**Digital** 12 Ausgaben, € 60,-  
**Print + Digital** € 95,-



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

**Print** 4 Ausgaben, € 29,60



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften

**Print** 4 Ausgaben, € 29,60



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

**Print** 4 Ausgaben, € 29,60

**Jetzt bestellen:**

service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743

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

# Ihre Vorteile:

## 1. Ein ganzes Jahr Freude:

Schenken Sie ein Magazin mit anspruchsvollen Artikeln über die neuesten internationalen Entwicklungen in allen Bereichen der Wissenschaft und Forschung.

## 2. Mit Grußkarte:

Der Beschenkte erhält das erste Heft mit einer Grußkarte in Ihrem Namen. Auf Wunsch auch zu Weihnachten.

## 3. Plus Geschenk zur Wahl:



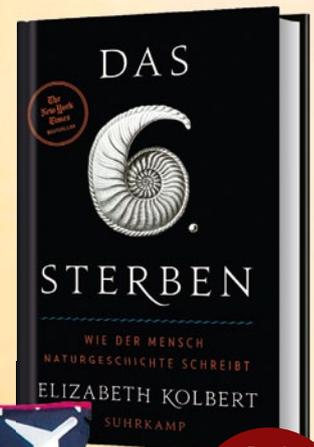
Spiel des Jahres 2016  
»Codenames«



Kalender  
»Himmel und Erde 2017«



Doku des Jahres 2015:  
DVD »Das Salz der Erde«



Buch  
»Das 6. Sterben«  
(Pulitzer-Preis 2016)



Taschenmesser  
»Spartan« von  
Victorinox



Taschen-Set  
»Airport Zip Pockets«  
von Loqi

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

SERIE

## Unbekanntes Terrain im Sonnensystem

Teil 1: Oktober 2016

### Gibt es Planet X?

von Michael D. Lemonick

Teil 2: November 2016

### Blick über den solaren Tellerrand

von Stamatios M. Krimigis und Robert B. Decker

Teil 3: Dezember 2016

### Rosetta – Eine Mission geht zu Ende

von Gerhard Schwehm

NASA / JPL-CALTECH

# VOYAGER-MISSION BLICK ÜBER DEN SOLAREN TELLERRAND

**Eine jahrzehntelange Reise führte die Voyager-Sonden bis an die Grenze zum interstellaren Raum. Das ermöglicht uns heute einzigartige Einblicke in die Region, wo galaktische Materie auf die Teilchenströme unseres Heimatsterns prallt.**



**Stamatios M. Krimigis** (Bild) vom Applied Physics Laboratory der Johns Hopkins University leitet den Betrieb des LECP-Instruments der Voyager-Sonden. Er analysiert dessen Daten von den Eigenschaften elektrisch geladener Teilchen mit niedriger Energie gemeinsam mit dem Physiker **Robert B. Decker**.

» [spektrum.de/artikel/1420984](http://spektrum.de/artikel/1420984)



NASA / JPL-CALTECH

► 1977 starteten zwei Raumsonden zu einer Mission, die sich als die bisher längste der Raumfahrtgeschichte erweisen und unser Bild vom Sonnensystem grundlegend verändern sollte. Damals war das Raumfahrtprogramm gerade zwei Jahrzehnte alt, und viele der großen Himmelskörper in unserer Umgebung waren noch unerkannt. 1957 umkreiste das erste menschengemachte Objekt, Sputnik 1, die Erde. 1962 flog Mariner 2 an der Venus vorbei. Den Mars erreichte Mariner 4 1965, als erste Raumsonde mit einer Kamera an Bord. In den 1970er Jahren wagte sich die Menschheit dann mit Sonden zu Jupiter und Saturn vor. Zu den äußeren Gasplaneten Uranus und Neptun drang damals noch keine Mission vor. Das sollte erst Voyager 2 ändern: 1985 erreichte die Sonde Uranus und vier Jahre später Neptun.

Die Reise führte sie und ihre Schwester, Voyager 1, danach noch viel weiter – und das Abenteuer dauert bis heute an. Denn als Voyager 1 und 2 planmäßig an den Planeten unseres Sonnensystems vorbeigeflogen waren, schickten ihre Konstrukteure sie auf eine interstellare Mission. Sie sollten den pausenlosen Teilchenstrom aus der heißen Atmosphäre der Sonne hinter sich lassen und in das Gas eintreten, das den Raum zwischen den Sternen in unserer Galaxie füllt.

Als die Trägerraketen mit den Sonden abhoben, wusste noch niemand, wie weit diese Grenze entfernt sein würde. Die Schätzungen reichten vom 5- bis zum 50-Fachen des mittleren Abstands zwischen Erde und Sonne, der als Astronomische Einheit (AE) bezeichnet wird. Es stellte sich

heraus: Die wahre Grenze liegt noch viel weiter draußen, als sich die Wissenschaftler vorgestellt hatten.

Unser Zentralgestirn stößt fortwährend geladene Teilchen aus. Dieser so genannte **Sonnenwind** (siehe Glossar S. 48) bildet eine Blase aus Plasma, auf die von außen das Magnetfeld unserer Galaxie drückt sowie alle Materie, die sich mit teilweise enormen Energien im interstellaren Bereich zwischen den Sternen bewegt (siehe Infografik auf S. 50/51).

## AUF EINEN BLICK DEN SONNENWIND IM RÜCKEN

- 1** 1977 starteten Voyager 1 und 2, um die äußeren Planeten zu erkunden. Anschließend sollten sie dorthin vorstoßen, wo der Einfluss der Sonnenstrahlung endet. Damals wusste niemand, wo diese Grenze liegt.
- 2** Heute befinden sich beide Sonden in Bereichen, an denen von unserer Sonne ausgesandte Materie auf galaktische Teilchen und Felder trifft. Dort spielen sich unerwartete und teilweise unverstandene Prozesse ab.
- 3** Die Voyager-Mission wird auf absehbare Zeit die einzige bleiben, die uns Messdaten direkt von der Schwelle zum interstellaren Raum liefert. Das kann noch bis 2025 dauern – danach versiegt die Stromversorgung.

Alles innerhalb der Region, die vor allem dem Einfluss der Sonne unterliegt, heißt **Heliosphäre**. Im **interstellaren Raum** hingegen dominieren Teilchen und Strahlung, die im Lauf der letzten Jahrmillionen von fernen Supernovae und anderen kosmischen Phänomenen in der Milchstraße umhergeschleudert wurden. In den Außenbereichen der Heliosphäre gibt es einen Übergangsbereich: In diesem »**Termination Shock**« verringert sich die Geschwindigkeit des Sonnenwinds von ursprünglich 300 Kilometern in der Sekunde auf ein Drittel davon. Das umgebende Medium bremst das Plasma so stark ab, dass es sich um das Zehnfache auf etwa 100 000 Kelvin erhitzt. In einigem Abstand davon liegt die »**Heliopause**«. Sie markiert die Grenze zwischen der Heliosphäre, also den Teilchen und den Magnetfeldern des Sonnensystems, und denen der übrigen Sterne in den nahen Bereichen der Milchstraße.

Vermutlich folgt darüber hinaus noch ein Bereich, den man sich ein wenig so vorstellen kann wie das unruhige Kräuseln, das ein Stein in einem flachen Flussbett erzeugt – nur dass sich hier die Sonne mitsamt der Heliosphäre durch

## Alle 175 Jahre stehen die Planeten optimal für Reisen von einem zum nächsten – 1977 war es so weit

die Galaxis bewegt. Dabei könnte sie einen kometenschweifartigen Strom aus dünnem Plasma hinter sich herziehen.

Zu Beginn ihrer Reise standen den Voyager-Sonden zahlreiche Instrumente zur Verfügung, um die Planeten zu untersuchen. Für die interstellare Mission werden davon aber nur noch fünf gebraucht. Die restlichen sind heute abgeschaltet, um die allmählich abnehmende Energie aus den Radioisotopenbatterien optimal zu nutzen (siehe Abbildung rechte Seite).

Das Magnetometer befindet sich am Ende eines 13 Meter langen Auslegers und damit möglichst weit entfernt von störenden Einflüssen aus dem zentralen Körper der Raumsonde. Das empfindliche Gerät vermisst detailliert Größe und Richtung der magnetischen Felder in der Umgebung. Außerdem besitzen die Sonden zwei lange Plasmawellen-Antennen, welche die Frequenzen von elektrischen Feldern empfangen. An einem zweiten, kleineren Ausleger sind weitere Instrumente montiert. Eines misst die Zusammensetzung der intensiven kosmischen Strahlung; ein anderes detektiert etwas energieärmere Teilchen. Zuletzt spürt ein Plasmasensor die Ionen des Sonnenwinds und Elektronen mit Energien von wenigen Elektronvolt auf.

Der Plasmasensor funktioniert bei Voyager 1 nicht mehr, nur noch der ihrer Schwestersonde – wobei es bemerkenswert ist, dass nach rund vier Jahrzehnten Flug überhaupt bloß dieses eine Instrument ausgefallen ist. Alle Geräte waren ursprünglich lediglich für die Dauer der ersten Mission von vier Jahren ausgelegt.

Damit die beiden Reisenden überhaupt auf Kurs und aus dem Sonnensystem herausgebracht werden konnten, war

eine Reihe besonderer Manöver nötig. Mit dem Schub von Trägerraketen allein wären nämlich enorme Treibstoffmengen nötig, um ein so großes Objekt weit über die Bahn des Jupiters hinaus zu beschleunigen. Daher verwendete das Team der US-Raumfahrtbehörde NASA einen himmelsmechanischen Trick, der als Swing-by-Manöver bezeichnet wird. Dabei katapultiert sich eine Raumsonde durch einen nahen Vorbeiflug an einem Planeten auf weitaus höhere Geschwindigkeiten und in eine neue Richtung, indem sie seine Anziehungskraft und Bahnbewegung nutzt. Steht der Planet günstig, kann der Swing-by das Flugobjekt zu einem weiter außen gelegenen Himmelskörper schleudern. Heute sind solche Manöver bei interplanetaren Missionen Routine; zur Zeit der Planungsphase in den 1960er Jahren hatte sie allerdings noch niemand probiert.

Der Raumfahrtingenieur Gary Flandro untersuchte 1965 für das Jet Propulsion Laboratory, ein Forschungsinstitut der NASA, wie sich Swing-bys optimal zur Erkundung des Sonnensystems verwerten lassen. Er stellte fest: Einmal alle 175 Jahre stehen die Planeten gerade so günstig, dass eine Raumsonde in Rekordzeit von einem zum nächsten befördert werden kann. Sie wäre daraufhin hinter Neptun immer noch schnell genug, um die dortige so genannte Fluchtgeschwindigkeit des Sonnensystems von etwa sieben Kilometern pro Sekunde zu überschreiten. Das bedeutet, sie überwindet die Anziehungskraft der Sonne und kehrt nie wieder zu uns zurück.

Zufällig stand diese viel versprechende Anordnung zum damaligen Zeitpunkt kurz bevor – 1977 würde es so weit sein. Die Ingenieure arbeiteten rasch entsprechende Routen und mögliche Designs für mehrere Sonden aus. Für diejenige von ihnen, die später Voyager 1 getauft wurde, wäre nach der Begegnung mit Saturn zwar ein Vorbeiflug an Pluto möglich gewesen. Stattdessen entschied das Team zu einem frühen Zeitpunkt in dieser Planung, Titan anzu- steuern, Saturns größten Mond. Mit diesem Manöver würde Voyager 1 allerdings endgültig aus der Bahnebene der Planeten gelenkt werden.

Mit Voyager 2 wollten die Planer darum die seltene Konstellation besonders effizient ausnutzen und nach Jupiter und Saturn bei einer Verlängerung der Mission auch die weiter entfernten Gasplaneten Uranus und Neptun

### Glossar

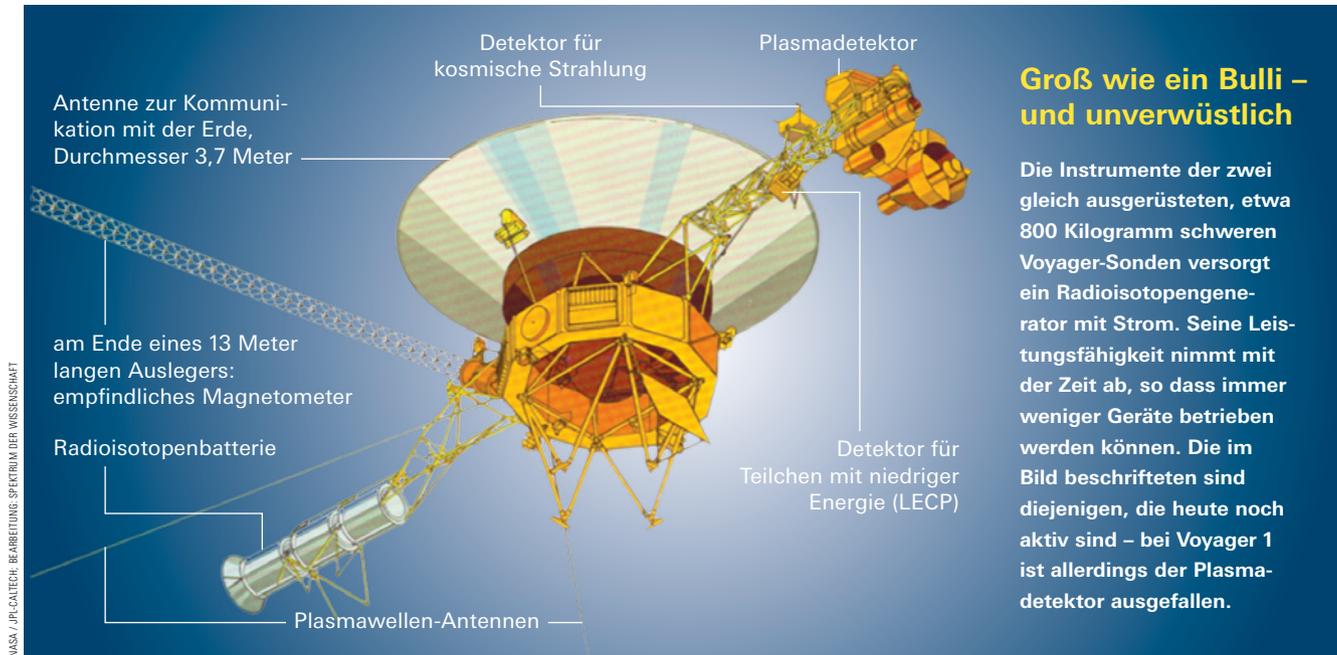
**Heliopause:** Die äußere Grenze der Heliosphäre

**Heliosphäre:** Eine blasenförmige Region, die durch den Druck des Sonnenwinds entsteht und galaktische Felder und Teilchen verdrängt

**Interstellarer Raum:** In diesem Medium überwiegt die Strahlung anderer Objekte aus der Milchstraße. Unsere Sonne zeichnet sich hier nur noch bis zu einem Abstand von etwa 1,5 Lichtjahren durch ihre größere Anziehungskraft gegenüber weiter entfernten Sternen aus.

**Sonnenwind:** Ein Strom geladener Teilchen, den die Sonne mit bis zu mehreren hundert Kilometer pro Sekunde ausstößt

**Termination Shock:** Der Bereich, ab dem der Sonnenwind durch Wechselwirkungen mit interstellarer Materie abrupt abgebremst und aufgeheizt wird



## Groß wie ein Bulli – und unverwüstlich

Die Instrumente der zwei gleich ausgerüsteten, etwa 800 Kilogramm schweren Voyager-Sonden versorgt ein Radioisotopengenerator mit Strom. Seine Leistungsfähigkeit nimmt mit der Zeit ab, so dass immer weniger Geräte betrieben werden können. Die im Bild beschrifteten sind diejenigen, die heute noch aktiv sind – bei Voyager 1 ist allerdings der Plasmadetektor ausgefallen.

besuchen. Die Sonde gewann bei ihren Swing-by-Manövern Geschwindigkeiten relativ zur Sonne von rund zehn Kilometern pro Sekunde an Jupiter, vier an Saturn und zwei an Uranus. Am Neptun allerdings wurde es nötig, sie um drei Kilometer pro Sekunde abzubremesen, um noch seinen Mond Triton besuchen zu können. Unter dem Strich blieben dennoch etwa 15 Kilometer pro Sekunde übrig – mehr als genug, um die dortige Fluchtgeschwindigkeit des Sonnensystems zu überwinden (siehe Diagramm S. 52).

Nach dem Start 1977 bis zum Vorbeiflug an Neptun 1989 lieferten die beiden Sonden extrem wertvolle Daten der vier äußeren Planeten unseres Sonnensystems. Viele Erkenntnisse waren revolutionär und veränderten unsere Vorstellung von der möglichen geologischen Vielfalt ferner Himmelskörper nachhaltig. Beispielsweise zeigten die Bilder von Jupiters Mond Io, dass sich dort Lava ablagerte – der erste Hinweis auf Vulkanismus jenseits unseres Planeten. Ein weiterer Mond Jupiters, Europa, offenbarte sich als komplett von einem Eismantel bedeckt, in dem breite Furchen auf einen unterirdischen Ozean schließen ließen. Alte und junge Oberflächenstrukturen auf dem größten Mond Ganymed legten tektonische Aktivität nahe. Auch entdeckten die Forscher in den Daten der Sonden, dass sich die Magnetfelder der äußeren Planeten sehr ungewöhnlich verhalten. Bei Neptun ist das Feld um 47 Grad gegen die Rotationsachse geneigt; sein Zentrum liegt zudem etwa einen halben Planetenradius vom Mittelpunkt des Gasriesen entfernt. Die Mechanismen, die hinter diesem Phänomen und einigen anderen bei der Voyager-Mission entdeckten Effekten stehen, stellen Astrophysiker teilweise immer noch vor Rätsel. Voyager 2 ist bis heute die einzige Raumsonde, die Uranus und Neptun besucht und aus der Nähe fotografiert hat.

Neben den spektakulären Bildern von Planeten und Monden verrieten insbesondere hochpräzise Messungen von Teilchen und Feldern den Wissenschaftlern etwas

über die Dynamik des Sonnensystems als Ganzes. Bevor sie den Wirkungsbereich des ungestörten Sonnenwinds verließen, vermaßen Voyager 1 und 2 fast drei Jahrzehnte lang die Eigenschaften des Plasmastroms, der von unserer Sonne ausgeht. Die energiereichsten Ionen und Elektronen entstehen dabei vor allem während Zeiten hoher Sonnenaktivität. Dann gibt es viele Sonnenflecken, und es kommt zu zahlreichen Eruptionen, bei denen gewaltige Mengen Materie ausgestoßen werden. Während der Phasen geringerer Sonnenaktivität werden hingegen viele geladene Teilchen erst in einem Abstand von einigen Astronomischen Einheiten beschleunigt, wenn sich Ströme des Sonnenwinds aus verschiedenen solaren Regionen vereinigen. Die Intensität beider Arten geladener Teilchen nahm grob proportional zum Quadrat des Abstands von der Sonne ab – bis etwa zum Jahr 2000. Dann änderten sich die Gesetzmäßigkeiten, weil sich beide Sonden dem Termination Shock näherten, ab dem der Sonnenwind verstärkt mit den umgebenden interstellaren Feldern und Teilchen wechselwirkt.

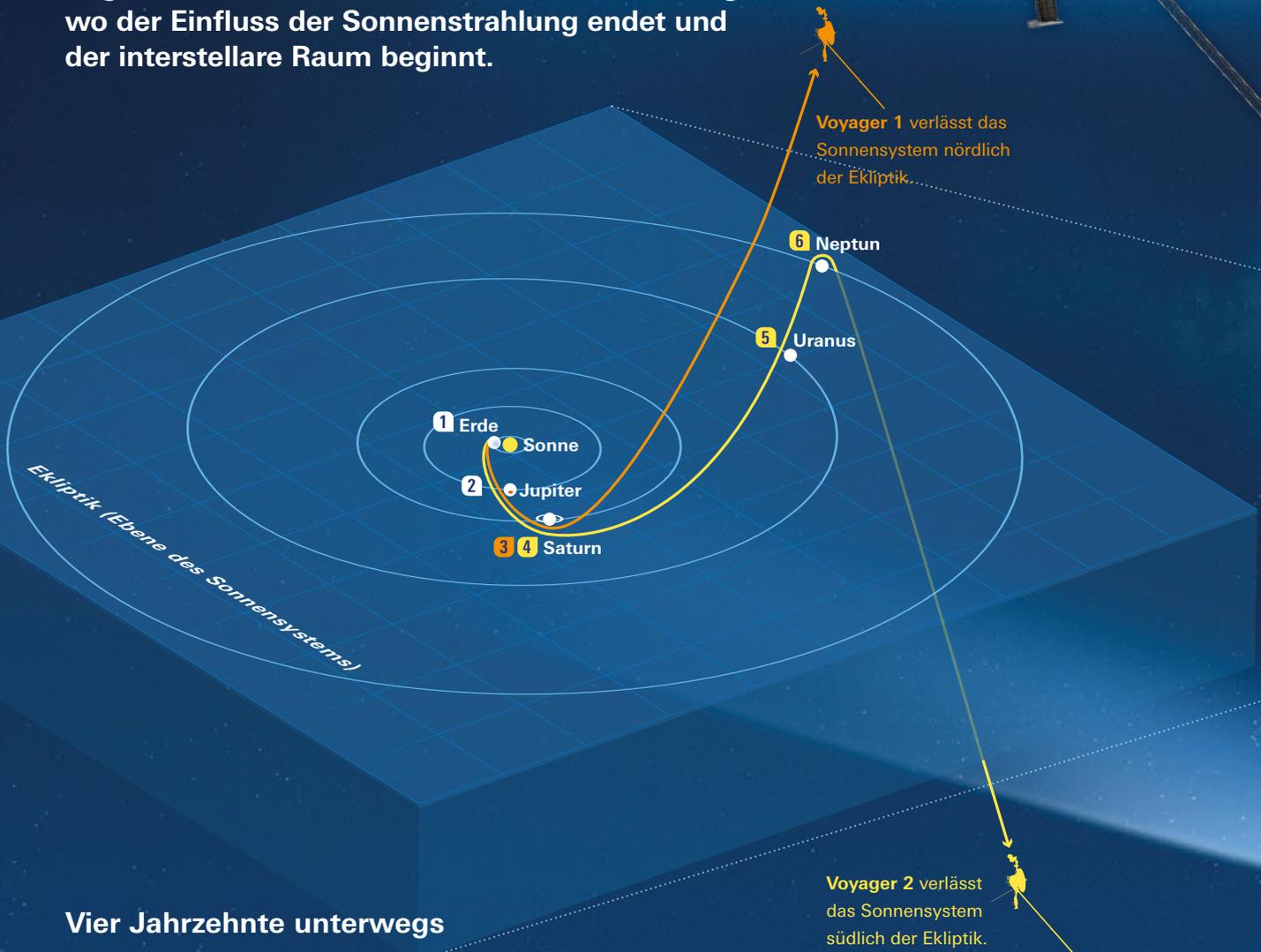
### Teilchen kamen plötzlich aus einer anderen Richtung – etwas drückte also auf die Felder der Sonne

Dort spielt eine weitere Art von Ionen eine immer stärkere Rolle: Ursprünglich neutrale Atome aus dem Medium zwischen den Sternen – meist Wasserstoff, Helium und Sauerstoff – verlieren ihre Elektronenhülle, während sie mit rund 25 Kilometern pro Sekunde auf die Heliosphäre treffen. Solche Atome stammen etwa von weit entfernten Sternen, die als Supernovae explodierten. Sobald sie in den Einflussbereich der Sonne gelangen, wechselwirken sie mit dem Sonnenwind, der von einem spiralförmig nach außen gewundenen Magnetfeld begleitet wird, das durch die stete Drehung der Sonne entsteht. Je weiter die Voyager-Sonden sich von der Sonne wegbewegen, desto stärker wird die Intensität dieser kosmischen Strahlen.

# DIE LANGE REISE DER VOYAGER-SONDEN

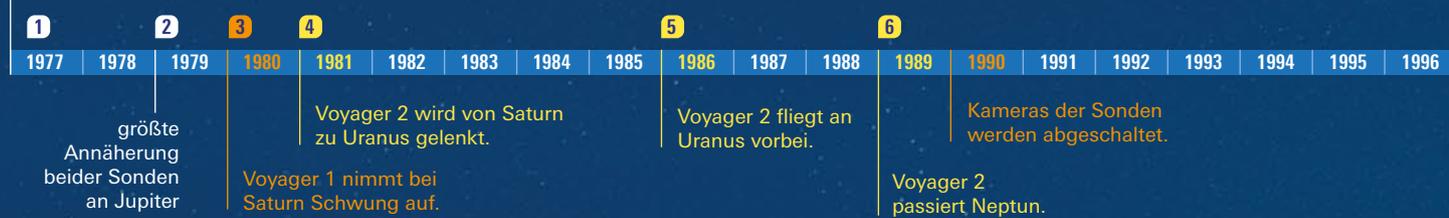
Voyager-Sonde

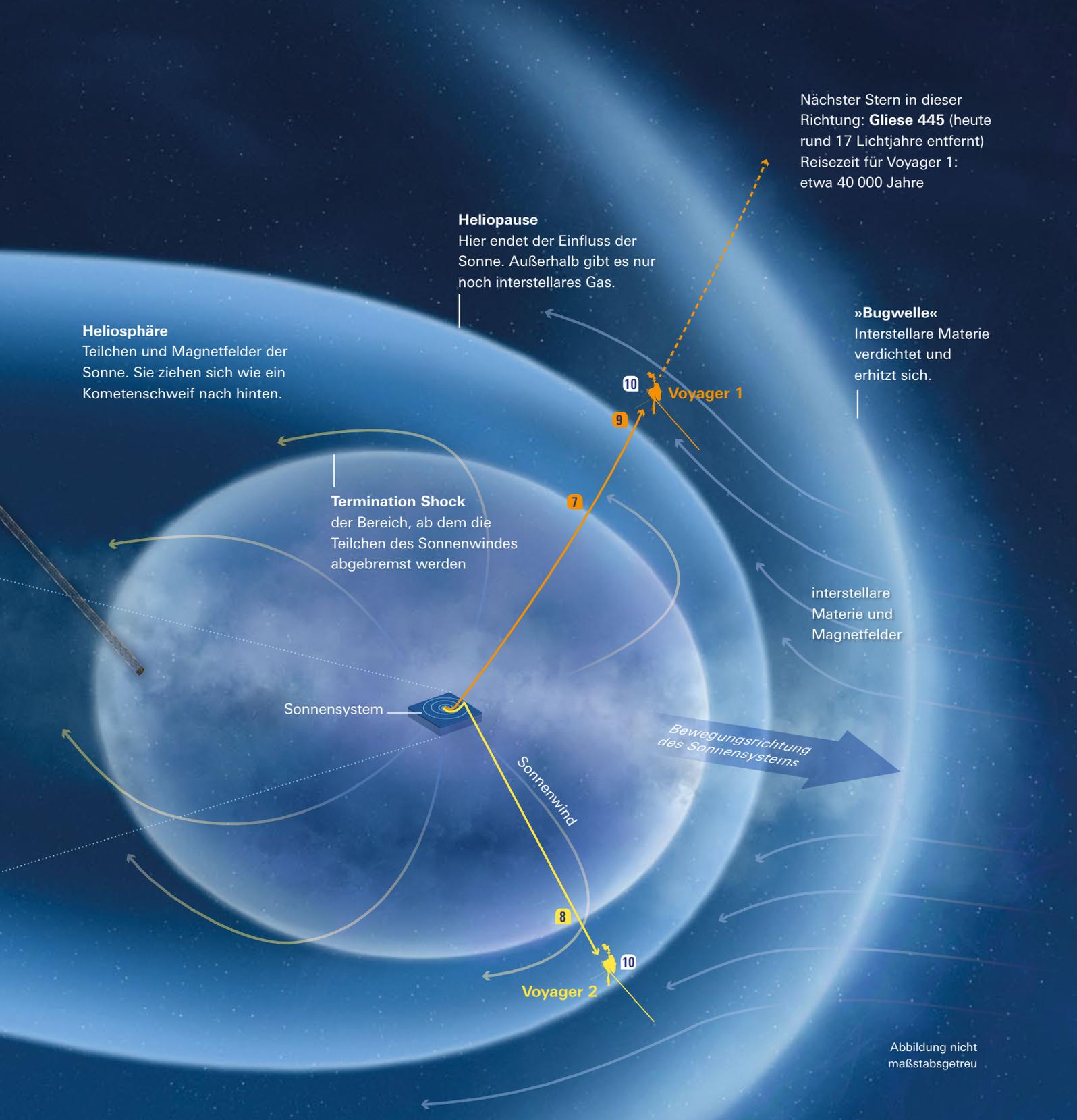
1977 starteten die beiden baugleichen Sonden Voyager 1 und 2, um die äußeren Planeten unseres Sonnensystems zu erkunden. Anschließend flogen sie weiter – und vermessen heute die Region, wo der Einfluss der Sonnenstrahlung endet und der interstellare Raum beginnt.



## Vier Jahrzehnte unterwegs

Am 20. August 1977 startet **Voyager 2**,  
16 Tage später **Voyager 1**.





**Heliosphäre**  
Teilchen und Magnetfelder der Sonne. Sie ziehen sich wie ein Kometenschweif nach hinten.

**Heliopause**  
Hier endet der Einfluss der Sonne. Außerhalb gibt es nur noch interstellares Gas.

Nächster Stern in dieser Richtung: **Gliese 445** (heute rund 17 Lichtjahre entfernt)  
Reisezeit für Voyager 1: etwa 40 000 Jahre

»Bugwelle«  
Interstellare Materie verdichtet und erhitzt sich.

**Termination Shock**  
der Bereich, ab dem die Teilchen des Sonnenwinds abgebremst werden

interstellare Materie und Magnetfelder

Sonnensystem

Sonnenwind

Bewegungsrichtung des Sonnensystems

Voyager 2

Abbildung nicht maßstabsgetreu

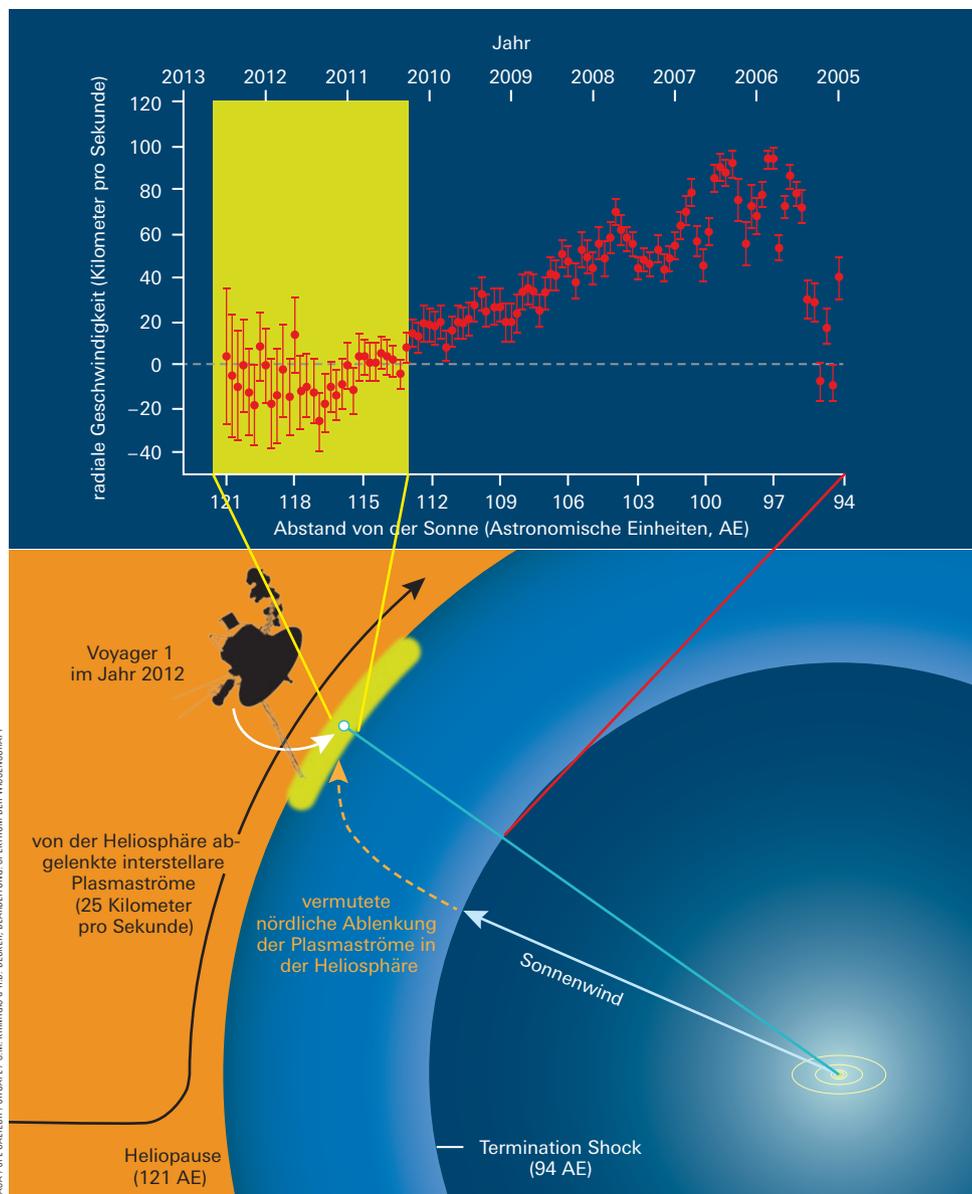
1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	7	2004	2005	2006	8	2007	2008	2009	2010	2011	9	2012	2013	2014	2015	10	2016				
								Voyager 1 überholt die 1972 gestartete Sonde Pioneer 10, das bis dahin am weitesten entfernte von Menschen gebaute Objekt.					Voyager 1 überschreitet den Termination Shock bei 94 Astronomischen Einheiten (AE).					Voyager 2 überschreitet den Termination Shock bei 84 AE.					Voyager 1 überschreitet die Grenze zum interstellaren Raum bei 121 AE.				Voyager 2 befindet sich vor der Heliopause, Voyager 1 dahinter.

Voyager 1 erreichte den Termination Shock am 16. Dezember 2004 bei einem Sonnenabstand von 94 AE. Dieser Moment kündigte sich bereits in den Daten an, die wir erhielten. Teilchen, die stark entlang von Magnetfeldern gebündelt sind, kamen plötzlich nicht mehr aus der Richtung, aus der wir sie erwartet hatten. Offenbar übte etwas einen asymmetrischen Druck auf die Felder der Sonne aus – nämlich die Magnetfelder des interstellaren Mediums. Die folgenden acht Jahre reiste Voyager 1 dann durch einen etwa 30 AE breiten Zwischenbereich, in dem interstellare und solare Felder und Teilchen wechselwirken und der nach außen durch die Heliopause begrenzt ist. Diese durchquerte Voyager 1 im Jahr 2012.

Unterdessen flog Voyager 2 in eine andere Richtung und kreuzte den Termination Shock 2007 bei etwa 84 AE. Sowohl vom 29. als auch vom 31. August jenes Jahres erhielten wir entsprechende Signale – vermutlich deshalb mehrmals, weil der Termination Shock an dieser Stelle eine

wellenförmige Oberfläche oder eine vergleichbare Art von Substruktur hat. Heute befindet sich die Sonde rund 22 AE hinter dieser Grenze im äußersten Bereich der Heliosphäre jenseits des Termination Shock. Diese Region ist relativ ruhig und zumindest dort, wo ihn die beiden Sonden vermessen haben, recht gleichförmig mit einer großen Menge Ionen niedriger Energie gefüllt.

Die Plasmasensoren von Voyager 2 – die von Voyager 1 funktionieren ja nicht mehr – gestatteten Messungen der heißen, geladenen Materie vor und nach dem Termination Shock. Theoretisch sollte dort eine Stoßwelle auftreten, bei der sich einige Teile des Mediums innen schneller bewegen als mit Schallgeschwindigkeit, außen auf langsamere Geschwindigkeiten abgebremst werden und sich dabei enorm aufheizen. Den von Voyager 2 übermittelten Werten nach hätte die Materie jenseits des Termination Shock allerdings eine unerwartet niedrige Temperatur und sollte damit noch immer Überschallgeschwindigkeit besitzen. Die Missionswissen-



## Turbulenzen an der Heliopause

Der Sonnenwind strömt radial nach außen und verlangsamt sich hinter dem Termination Shock (untere Grafik). Die Wissenschaftler vermuteten zunächst, die geladenen Teilchen der Sonne würden allmählich durch die interstellaren Plasmaströme abgelenkt werden und sich ihnen angleichen. Doch die Messungen von Voyager 1 aus der äußersten Grenzregion (gelb) zeichnen 2012 ein komplizierteres Bild (Diagramm oben): Der Sonnenwind folgt offenbar nicht dem interstellaren Medium – negative Geschwindigkeiten zeigen, dass er teilweise zurückgedrückt wird. Die geladenen Teilchen scheinen in der Region regelrecht hin- und herzuspringen.

schaftler vermuten jedoch, dass große Mengen der scheinbar fehlenden Energie auf Teilchen übertragen werden, die Voyager 2 mit ihren Sensoren nicht mehr aufspüren kann.

Auch Voyager 1 konnte etwas zu unserem Bild von den seltsamen Verhältnissen in der äußersten Heliosphäre beitragen, obwohl ihre Plasmadetektoren seit 1981 defekt sind. Wir sind gemeinsam mit unserem Team verantwortlich für das LECP-Instrument, das Messwerte von niederenergetischen, geladenen Teilchen registriert. Diese Daten legen nahe, dass sich die radial nach außen gerichtete Geschwindigkeitskomponente des Sonnenwinds reduziert: Von knapp 100 Kilometern pro Sekunde bei 97 AE sinkt der Wert auf null bei 113 AE (siehe Abbildung linke Seite). Das war zu erwarten, denn schließlich sollte die Materie deutlich vor der Heliopause durch Wechselwirkungen mit der interstellaren Plasmabewegung allmählich in ihre Richtung umgelenkt werden. Aber vollkommen unerwartet kehrte sich die Geschwindigkeit der Teilchen in einer Region von 115 bis 121 AE auf durchschnittlich minus 15 Kilometer pro Sekunde um. Anders ausgedrückt: Der Sonnenwind wird vom interstellaren Plasma offenbar in der nördlichen Heliosphäre nicht wie erwartet seitlich weggedrückt, sondern regelrecht wieder in Richtung Sonne zurückgeschleudert.

Um dem auf den Grund zu gehen, programmierte die Bodenkontrolle Rollmanöver, bei denen sich Voyager 1 alle paar Monate für einige Stunden um 90 Grad dreht. So wollten wir überprüfen, ob und wie die radiale Geschwindigkeit eventuell auf andere Komponenten umgelenkt wird, während Voyager 1 weiter in die äußerste Heliosphäre vordrang. Die Geschwindigkeitsanteile senkrecht zur Flugrichtung erwiesen sich hingegen als relativ klein und nahezu konstant. Mehrere Modelle versuchen, das mysteriöse Verhalten des Sonnenwinds in dieser »Stagnationsregion« zu erklären, doch bislang hat sich keines durchgesetzt.

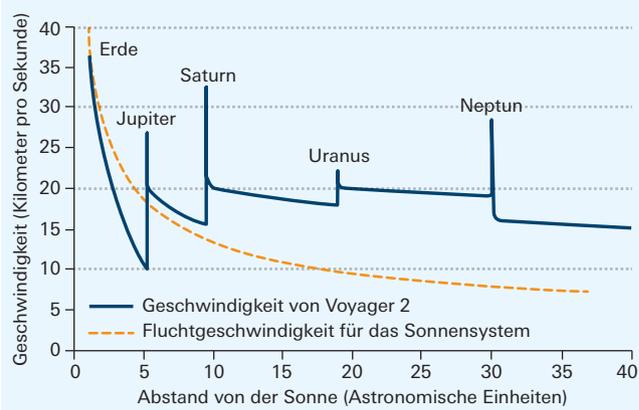
### Verwirrende Daten aus dem interstellaren Raum

Wir gingen jedenfalls davon aus, dass jenseits der Heliopause der Sonnenwind gänzlich verschwinden würde. Der interstellare Raum hätte sich dann durch zunehmende kosmische Strahlung und ein eindeutig ausgerichtetes, galaktisches Magnetfeld bemerkbar gemacht. Auch hier sieht die Wirklichkeit komplizierter aus.

Die Intensität kosmischer Strahlung wächst zwar seit Mai 2012 an. Theoretisch erwarteten wir außerhalb des elektromagnetischen Wirkungsbereichs der Sonne allerdings, dass sie gleichmäßig aus allen Richtungen kommen sollte. Tatsächlich aber ist die Verteilung bis heute nicht isotrop, sondern besitzt eine räumliche Struktur und scheint den lokalen Magnetfeldern zu folgen. Und auch diese verhalten sich nicht so wie gedacht. Sie sollten sich dem interstellaren Felds angleichen, jedoch scheinen sie noch immer mehr oder weniger die Richtung der anders ausgerichteten solaren Magnetfelder beizubehalten.

Diese verwirrenden Daten führten zu einer langen und bis heute anhaltenden Debatte darüber, ob Voyager 1 nun wirklich bereits den Einflussbereich von Teilchen und Feldern des Sonnensystems verlassen und den interstellaren Raum erreicht hat. Denn die Sonne schickt zwar kein Plasma mehr dorthin – aber ihre magnetischen Felder wirken sich

## Mit Schleudermanövern der Sonne entfliehen



NASA / JPL/CALTECH; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Bei ihrem Start reichte die Geschwindigkeit der beiden Voyager-Sonden noch nicht aus, um der Anziehungskraft der Sonne zu entkommen (so genannte Fluchtgeschwindigkeit, gestrichelte Linie, orange). Sie mussten Schwung bei anderen Planeten aufnehmen, um nicht irgendwann wieder ins Sonnensystem zurückzufallen. Im Diagramm dargestellt sind die Swing-by-Manöver von Voyager 2 (blaue Linie).

offenbar weiterhin aus. Ist die Region, die Voyager 2012 durchquerte, gar nicht die wirkliche Heliopause?

Vor allem die seltsame Anisotropie der kosmischen Strahlung, die kein theoretisches Modell vorhergesagt hatte, bereitete den Astronomen lange Kopfzerbrechen. Messungen von Dichte, Temperatur und Richtung der Plasmaströme hätten das Rätsel lösen können, doch der entsprechende Detektor funktioniert ja nicht mehr. Zumindest die Dichte bestimmten die Wissenschaftler schließlich indirekt: Die Antennen zum Empfang von Plasmawellen, die jahrelang keine Aktivität festgestellt hatten, empfingen im April 2013 plötzlich Frequenzoszillationen. Diese ließen sich in Werte für die Plasmadichte umrechnen, die mit den erwarteten übereinstimmten. Die Dichte in der Heliosphäre, die vom intakten Sensor von Voyager 2 gemessen wird, ist rund 50-mal kleiner.

Im September 2013 kam bei uns an der Johns Hopkins University das gesamte Voyager-Team zusammen. Gemeinsam betrachteten wir alle vorliegenden Daten, verglichen sie mit verschiedenen Theorien und kamen zu dem Schluss, dass sich Voyager 1 tatsächlich im interstellaren Raum befindet – offiziell seit dem 25. August 2012.

Seither sorgen die Daten weiterhin für Überraschungen. Die Umgebung ist weitaus turbulenter, als Astronomen lange vermutet hatten. Zeiträume mit relativ gleichförmiger Verteilung der kosmischen Strahlung werden durch regelrechte Tsunamis unterbrochen, bei denen unsere Sonne, ausgelöst durch Phasen besonders starker Aktivität, zeitverzögert Stoßwellen nach außen durch die Heliopause schleudert. Offenbar wirkt sich die Sonne also noch deutlich jenseits dieser Grenze auf das Geschehen im interstellaren Medium aus. Voyager 1 befindet sich Ende 2016 fast 140 AE von der Sonne entfernt. Die Sonde reist mit einer Geschwin-

digkeit von 3,6 AE pro Jahr und liefert währenddessen immer mehr Daten über die überraschend komplexen Vorgänge in dieser Region.

Eine noch nicht abschließend beantwortete Frage ist, ob sich vor der Heliopause eine Art Stoßwelle aufstaut, Bow Shock genannt. Dabei würde sich die interstellare Materie verdichten und erhitzen, wenn sie der Heliosphäre näher kommt. Inzwischen können Astronomen derartige Auswirkungen nicht nur direkt vor Ort mit den Voyager-Sonden studieren, sondern auch über indirekte Beobachtungen mit Erdsatelliten. So untersuchen sie etwa mit dem 2008 gestar-



NASA / JPL

## Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema Sonnensystem finden Sie unter [spektrum.de/t/sonnensystem](http://spektrum.de/t/sonnensystem)

teten Interstellar Boundary Explorer (IBEX) ungeladene Atome, die bei den bereits geschilderten Wechselwirkungen von kosmischen mit solaren Teilchen an der Grenze zum interstellaren Raum entstehen und die Erde erreichen. Inzwischen sieht es den Daten von IBEX zufolge so aus, als wäre unser Sonnensystem nicht schnell genug, um eine ausgeprägte Stoßwelle an der Heliopause zu erzeugen, wie man sie von Überschalljets kennt. Es handelt sich wohl eher um eine etwas sanftere und weiter ausgedehnte Bugwelle ähnlich derjenigen eines langsamen Schiffs. Die Ingenieure hoffen darauf, mit dem intakten Plasmasensor von Voyager 2 mehr über die Vorgänge an der Heliopause zu erfahren, sobald die Sonde dort angekommen ist. Derzeit hat sie diese Grenze bei etwas mehr als 110 AE und einem Tempo von 3,3 AE pro Jahr noch vor sich. Es lässt sich keine genaue Prognose geben, wann sie ihr begegnen wird.

Oft wird die Frage nach der verbleibenden Lebensdauer der Sonden gestellt; schließlich haben sich die verschiedenen Messinstrumente als erstaunlich haltbar erwiesen. Doch ihr Betrieb hängt vor allem von der unaufhaltsam schwindenden Leistung der Radioisotopenbatterie ab, welche die Zerfallswärme von Plutonium in elektrischen Strom für die Instrumente umwandelt. Beim Start standen 465 Watt zur Verfügung, inzwischen sind es wegen der Halbwertszeit des verwendeten Plutoniumisotops von 87,7 Jahren lediglich rund 260 Watt. 1990 wurden bereits die Kameras abgeschaltet. Ab 2020 könnte es nötig werden, einige der heute noch funktionierenden Instrumente nurmehr zeitweise zu betreiben, um Strom zu sparen. Der Treibstoff jedenfalls sollte bis dahin für Manöver reichen. 2025 dürfte so wenig Batterieleistung übrig sein, dass kein einziges Instrument mehr funktioniert. Dann werden wir nie mehr etwas von den Sonden empfangen.

Gelegentlich wird auch angemerkt, dass Voyager 1 und 2 eigentlich auf absehbare Zeit gar nicht den Einfluss des

Sonnensystems verlassen, sondern nur dessen Atmosphäre aus geladenen Partikeln: gewissermaßen den chemischen und nicht den gravitationsbedingten Teil unserer Heimat im All. Das ist richtig und sollte nicht verwechselt werden, denn selbst die Kometen in der so genannten Oort'schen Wolke sind schwach an unsere Sonne gebunden, und diese befinden sich in bis zu einer Distanz von 100 000 AE beziehungsweise rund 1,5 Lichtjahren.

Bis auch die Schwerkraft unserer Sonne keine wesentliche Rolle mehr spielt, dauert es daher mehrere zehntausend Jahre. Voraussichtlich in 40 000 Jahren werden die Sonden an anderen Sternen in einem Abstand von weniger als zwei Lichtjahren vorbeifliegen: Voyager 1 am Roten Zwerg Gliese 445 und Voyager 2 am Zwergstern Ross 248. Bei diesen Begegnungen ist die jeweilige Entfernung allerdings immer noch so groß, dass sie gänzlich unspektakulär ablaufen werden. Vor den Sonden liegt eine unvorstellbar lange Reise durch die Dunkelheit der Milchstraße.

Bedauerlicherweise hat derzeit keine Raumfahrtagentur konkrete Pläne für eine neue interstellare Mission. Zwar wird auch die 2006 gestartete Sonde New Horizons, die das Pluto-System besucht hat und derzeit den Kuipergürtel erforscht, voraussichtlich in den 2040er Jahren die Heliopause erreichen. Sie war bei ihrem Start jedoch, genau wie ursprünglich die Voyager-Geschwister, zur Beobachtung von Himmelskörpern ausgelegt und nicht, um gezielt das All über die Heliopause hinaus zu erkunden. Mit dem Willen zu einer derartigen Mission wäre es heute mit speziellen Antriebssystemen und entsprechender Planung durchaus möglich, eine Distanz von 200 Astronomischen Einheiten in weniger als 25 Jahren zurückzulegen.

So werden die Erkenntnisse von der Voyager-Mission auch nach ihrem Ende lange die einzigen Daten bleiben, die direkt aus dem interstellaren Raum gewonnen wurden. Bereits mehrmals bedrohten Budgetkürzungen das Programm. Stets argumentierten Wissenschaftler dagegen mit der einzigartigen Stellung der Sonden. Ihrem Einsatz sowie öffentlicher Unterstützung wegen der großen Bekanntheit von Voyager 1 und 2 verdanken wir, dass diese Vorposten der Menschheit auch weiterhin Befehle empfangen, Daten übermitteln und die Menschen inspirieren – als Beispiel dafür, wie weit uns Entdeckergeist bringen kann. ◀

## QUELLEN

**Burlaga, L. F. et al.:** Magnetic Field Observations as Voyager 1 Entered the Heliosheath Depletion Region. In: Science 341, S. 147–150, 2013

**Decker, R. B. et al.:** No Meridional Plasma Flow in the Heliosheath Transition Region. In: Nature 489, S. 124–127, 2012

**Krimigis, S. M. et al.:** Search for the Exit: Voyager 1 at Heliosphere's Border with the Galaxy. In: Science 341, S. 144–147, 2013

**McComas, D. J. et al.:** The Heliosphere's Interstellar Interaction: No Bow Shock. In: Science 336, S. 1291–1293, 2012

**Stone, E. C. et al.:** Voyager 1 Observes Low-Energy Galactic Cosmic Rays in a Region Depleted of Heliospheric Ions. In: Science 341, S. 150–153, 2013

© American Scientist



**WIR MACHEN  
SIE STARK.**

Das  
**IMMUNSYSTEM**  
Ein innovativer Schlüssel  
gegen Krebs.

Unser Immunsystem ist wohl eines der stärksten Instrumente im Kampf gegen Krebs. Genau darauf setzt ein neues und innovatives Therapieprinzip: Die Immunonkologie. Sie versetzt unser Immunsystem wieder in die Lage, die Krebszellen zu erkennen und anzugreifen.

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

# SCHLICHTING! DIE SCHMALE INSEL DER BEHAGLICHKEIT



**Zum Gefühl einer wohligen Wärme gehört mehr als eine angenehme Raumtemperatur: Es muss auch die Luftfeuchtigkeit passen und genau die richtige Menge Strahlungsenergie zwischen dem Menschen und seiner Umgebung fließen.**

**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.

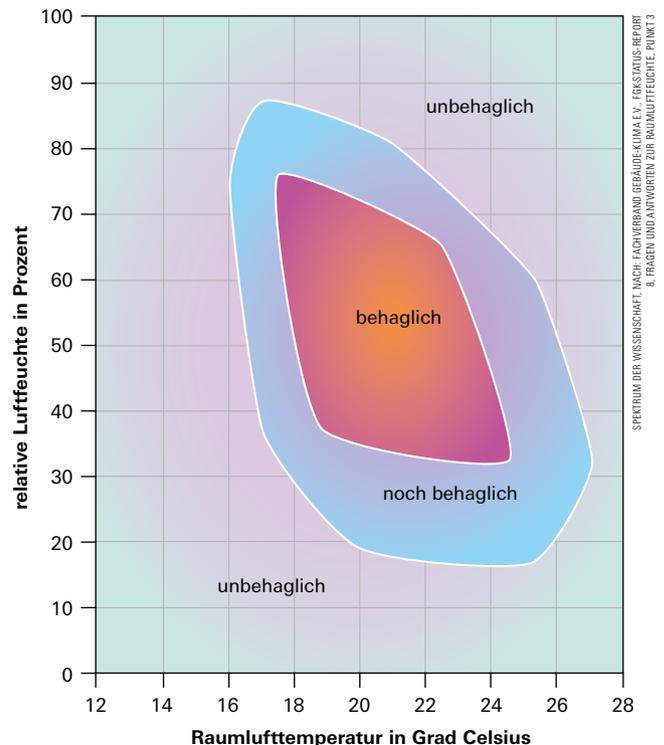
► [spektrum.de/artikel/1420985](http://spektrum.de/artikel/1420985)

► Wenn wir in der kalten Jahreszeit in unserem Ferienhaus an der Nordsee eintreffen, bleiben wir nach dem ersten Anfeuern des Ofens notgedrungen noch einige Zeit lang warm angezogen. Denn es kann je nach Außentemperatur einige Stunden dauern, bis die Zimmer behaglich geworden sind. Behaglichkeit – so nennen wir im Alltag den Zustand, bei dem unser Körper durchschnittlich gerade so viel Energie durch Wärme abgibt, wie er in Ruhe produziert. Er muss weder zittern noch übermäßig schwitzen, um seine Temperatur konstant zu halten; dann fühlen wir uns wohl. Diese subjektive Empfindung widerspricht anfangs allerdings der Temperaturangabe des Thermometers. Das zeigt bereits 20 Grad Celsius an, wenn es gefühlt vielleicht erst 15 Grad oder noch weniger sind und wir mehrere Kleidungsschichten brauchen, um nicht zu frieren.

Unser Körper weiß es besser. Unter solchen Bedingungen reicht nämlich die Anzeige des Thermometers für ein korrektes Abbild der Temperaturverhältnisse nicht aus. Dieses misst im Wesentlichen die Temperatur der Luft. Da

**Unser thermisches Wohlbefinden hängt vom Zusammenspiel zwischen Temperatur und Wassergehalt der Luft ab: Ist es zu trocken oder zu schwül, stresst das unseren Organismus. Größte Behaglichkeit spenden etwa 20 bis 22 Grad Celsius bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 bis 60 Prozent.**

## Wie Temperatur und Luftfeuchte es unserem Körper gemütlich machen





FOTOLIA / WIP-STUDIO; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

deren Wärmekapazität aber klein ist, heizt sich ein großes Volumen davon schnell auf. Die massiven Wände und die Gegenstände im Zimmer benötigen dagegen viel mehr Energiezufuhr pro Volumen, bis sie die Solltemperatur von 20 Grad erreicht haben. Und das braucht seine Zeit.

Auf den ersten Blick erscheint diese Begründung unverständlich – tauscht unser Körper denn nicht vor allem mit der unmittelbaren Umgebungsluft Energie aus? Die Rolle der Wärmestrahlung sollte man aber nicht unterschätzen. Jedes Objekt strahlt seiner Temperatur entsprechend Energie ab und empfängt wiederum Strahlung von allem rundherum. Dadurch stehen wir immer auch mit weiter entfernten Gegenständen in thermischem Kontakt, etwa den noch kalten Wänden.

Wenn wir normalerweise 20 Grad Celsius als angenehm empfinden, so gehen wir stillschweigend davon aus, dass auch die Dinge im Zimmer zumindest im Mittel diese Temperatur haben. In der anfangs herrschenden Ungleichgewichtssituation im Ferienhaus strahlt unser Körper jedoch den Wänden und Fenstern unter dem Strich mehr Energie zu, als es der Fall wäre, wenn sie bereits 20 Grad erreicht hätten.

Zwar kann man diesen größeren Verlust des Körpers in Gegenwart von kalten Wänden dadurch ausgleichen, dass man die Lufttemperatur deutlich über den Zielwert steigert.

### Erkenntnis und Empfindung gehen immer Hand in Hand

Friedrich Hebbel (1813–1863)

Doch auch eine solche Situation nehmen wir meist nicht als behaglich wahr – uns fröstelt dann zwar nicht, aber wir haben das unbestimmte Gefühl, dass es zieht.

Ein ähnlicher Eindruck kommt auf, wenn man in einem sonst gut geheizten Raum vor einem Fenster ohne Mehrfachverglasung sitzt. Anders als die besser isolierenden Wände behält es eine niedrigere Temperatur. Daher gibt unser Körper daran insgesamt wesentlich mehr Wärme ab als an die übrigen Gegenstände im Zimmer. Im Allgemeinen können wir zwischen verschiedenen Energie-transportarten rein gefühlsmäßig nicht gut unterscheiden, und so beurteilen wir den

Verlust in Richtung Fenster ähnlich, als träfe uns von dorthier strömende kalte Luft.

Zur thermischen Behaglichkeit gehört über diese Zusammenhänge hinaus nicht nur eine ausgeglichene Temperatur des gesamten Zimmers, sondern auch eine relative Luftfeuchtigkeit von etwa 50 Prozent (siehe Abbildung links). In trockeneren Räumen fühlen wir uns nicht wohl, vor allem weil das die Schleimhäute reizt. Die relative Feuchte ist eine Bezeichnung für das Verhältnis von der vorhandenen Wasserdampfmenge in einem bestimmten Volumen zur größten, die darin möglich ist.

Diese maximale Dampfmenge wird auch als Sättigungsfuchte bezeichnet: Mehr Wasser kann in einem bestimmten Volumen nicht existieren, ohne dass es sofort kondensiert.

Ein Maß dafür ist der so genannte Sättigungsdampfdruck: der maximale Beitrag des Wasserdampfs zum Gesamtdruck. In der Atmosphäre kommt noch der Druck der anderen Gase dazu; deswegen wird der Dampfdruck auch Partialdruck genannt.

Der Sättigungsdampfdruck des Wassers wächst mit der Temperatur. Das ist anschaulich klar, da dann immer mehr Teilchen genug Bewegungsenergie haben, um den Flüssigkeitsverbund gegen den Druck der Umgebung zu verlassen. Den quantitativen Zusammenhang kann man der so genannten Dampfdruckkurve entnehmen (siehe Abbildung rechts).

### Die Außenluft bringt wenig Wasser mit – darum müssen wir nachhelfen

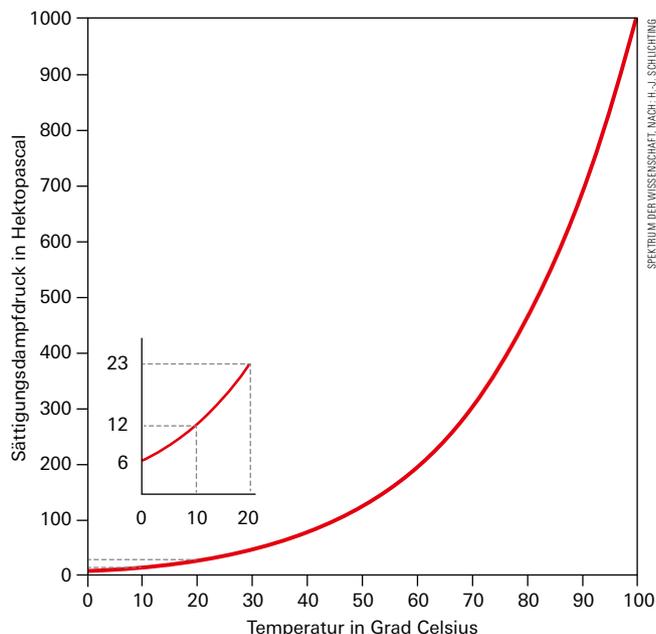
Wenn wir im Winter bei einer Temperatur von null Grad Celsius lüften und die frische Luft mit dem darin enthaltenen Wasserdampf auf 20 Grad erwärmen, nimmt der Sättigungsdampfdruck von 6 auf 23 Hektopascal zu. Dazu proportional steigt die maximale Feuchte fast auf das Vierfache – der absolute Wassergehalt bleibt aber gleich. Selbst wenn die relative Feuchtigkeit außen 100 Prozent beträgt, hat sie im geheizten Zimmer also nur noch einen Wert von 25 Prozent. Das ist für eine angenehme Situation jedoch zu wenig. Daher muss im geheizten Zimmer zusätzlich Wasser verdunsten. Sollte in der Küche nicht gerade gekocht werden, reicht dafür die normalerweise etwa durch unsere Atemluft abgegebene Wasserdampfmenge nicht aus. Bei Langstreckenflügen bekommt man das umso stärker zu spüren: Die Atmosphäre ist in den üblichen Reiseflughöhen mit minus 50 Grad Celsius extrem kalt, und so enthält die hineingesaugte und aufgewärmte Frischluft kaum Feuchtigkeit.

Wie viel Wasser wäre denn nötig, um in unserem geheizten Zimmer behagliche Bedingungen zu schaffen? Wenn flüssiges Wasser gasförmig wird, vergrößert sich sein Volumen bei Normalbedingungen grob um das 1000-Fache – ein Liter Wasser ergibt etwas mehr als einen Kubikmeter reinen Dampf.

Bei 20 Grad und einem äußeren Luftdruck von rund 1000 Hektopascal ist allerdings der maximale Anteil des Wasserdampfdrucks an der Atmosphäre mit 23 Hektopascal viel geringer. Ein Liter verdunstetes Wasser sättigt daher bei Zimmertemperatur ein verhältnismäßig umso größeres Luftvolumen. In einem Raum mit 100 Kubikmetern erhöht er die relative Luftfeuchtigkeit um rund 50 Prozent. Geht man davon aus, dass etwa jede Stunde die Luft im Raum ausgetauscht wird, müsste für behagliche Feuchte stündlich ein Liter Wasser verdampft werden.

Kochen, Duschen und ähnliche Aktivitäten wirken sich immer nur temporär aus. Zimmerpflanzen sorgen zumindest zu einem Teil auf natürliche und konstante Weise für Befeuchtung. Auch Menschen und Tiere bringen durch ihren Metabolismus ständig Wasserdampf in die Räume. Da wir im Lauf eines Tages nicht mehr Wasser verlieren können, als wir trinken, ist aber klar: Pro Person und Stunde gelangt weniger als ein zehntel Liter in die Luft.

## Dampfdruckkurve des Wassers zwischen Gefrier- und Siedepunkt – und dem kleinen Intervall bis zur Raumtemperatur



**Bei einem äußeren Luftdruck von 1000 Hektopascal kann Wasserdampf je nach Temperatur unterschiedlich stark zum Gesamtdruck beitragen. Wird dieser Wert überschritten, kommt es zur Kondensation. Dieser »Sättigungsdampfdruck« (roter Graph) steigt exponentiell bis zum Siedepunkt.**

Die Frage indes, ob beim kurzzeitigen Öffnen der Fenster neben dem Wasser nicht außerdem viel Energie aus dem Raum verschwindet, lässt sich schon aus der Erfahrung verneinen. Das Zimmer wird anschließend wieder schnell warm, und die Temperaturanzeige des Thermometers ändert sich kaum. Die Ursache ist wieder die verhältnismäßig geringe Wärmekapazität der Luft.

Die typische winterliche Gefahr durch zu trockene Luft besteht im Sommer eher nicht, vielmehr machen uns dann hohe Temperaturen bei großer Feuchte zu schaffen. Normalerweise verschafft sich der Organismus durch Schweiß die nötige Kühle. Denn zu dessen Verdampfung ist wegen der großen Wärmekapazität des Wassers viel Energie nötig, die größtenteils der Haut und damit dem Körper entzogen wird (siehe *Spektrum* November 2012, S. 74: »Warum wir in der Sauna überleben«). Wenn aber die Luft in der Nähe der Haut bereits von Wasser gesättigt ist, verdampft weniger Schweiß, und die Wirkung unterbleibt.

Unter solchen Umständen hilft oft nur noch ein Ventilator oder leichter Wind, der die feuchte Luft in Körpfernähe durch trockenere ersetzt. Enthält allerdings diese zugefächerte Luft bereits viel Wasserdampf, bringt auch das nichts. Im Sommer empfinden wir daher Trockenheit als wesentlich behaglicher – also gerade umgekehrt wie in den kühleren Jahreszeiten.



## Der Hintergrund

Frauen sind in wissenschaftlichen Führungspositionen unterrepräsentiert. Es fehlen jedoch passende Instrumente, um schnell sehr gute und geeignete Wissenschaftlerinnen zu finden.

## Das Projekt

AcademiaNet ist eine Datenbank mit Profilen von über 2100 exzellenten Forscherinnen aus allen Fachdisziplinen.

## Unser Ziel

Wir wollen Ihnen mit unserem Rechercheportal die Besetzung von Führungspositionen und -gremien mit Wissenschaftlerinnen erleichtern.

## Die Partner

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
der Wissenschaft

**nature**

Sie wollen mehr erfahren?

[www.academia-net.de](http://www.academia-net.de)

# QUMRAN KULTORT, SCHREIBSTUBE, WISSENSPEICHER

**SERIE: SCHRIFT** Hunderte antike Schriftrollen lagen fast 2000 Jahre lang in Höhlen nahe dem Toten Meer verborgen. Die meisten davon waren stark zerfallen, sind inzwischen aber rekonstruiert und veröffentlicht. Doch wie dieses einmalige Archiv entstand und welchen Bezug es zu der jüdischen Siedlung Khirbet Qumran hatte, stellt immer noch ein Rätsel dar.



Die promovierte Theologin **Friederike Schücking-Jungblut** ist Akademische Rätin auf Zeit am Lehrstuhl für Alttestamentliche Theologie an der Universität Heidelberg. Sie leitet seit 2015 das Projekt »Zwischen Literatur und Liturgie – Pragmatik und Rezeptionspraxis poetischer/liturgischer Schriften der jüdischen Wüste« des Sonderforschungsbereichs »Materiale Textkulturen«.

» [spektrum.de/artikel/1420991](https://spektrum.de/artikel/1420991)

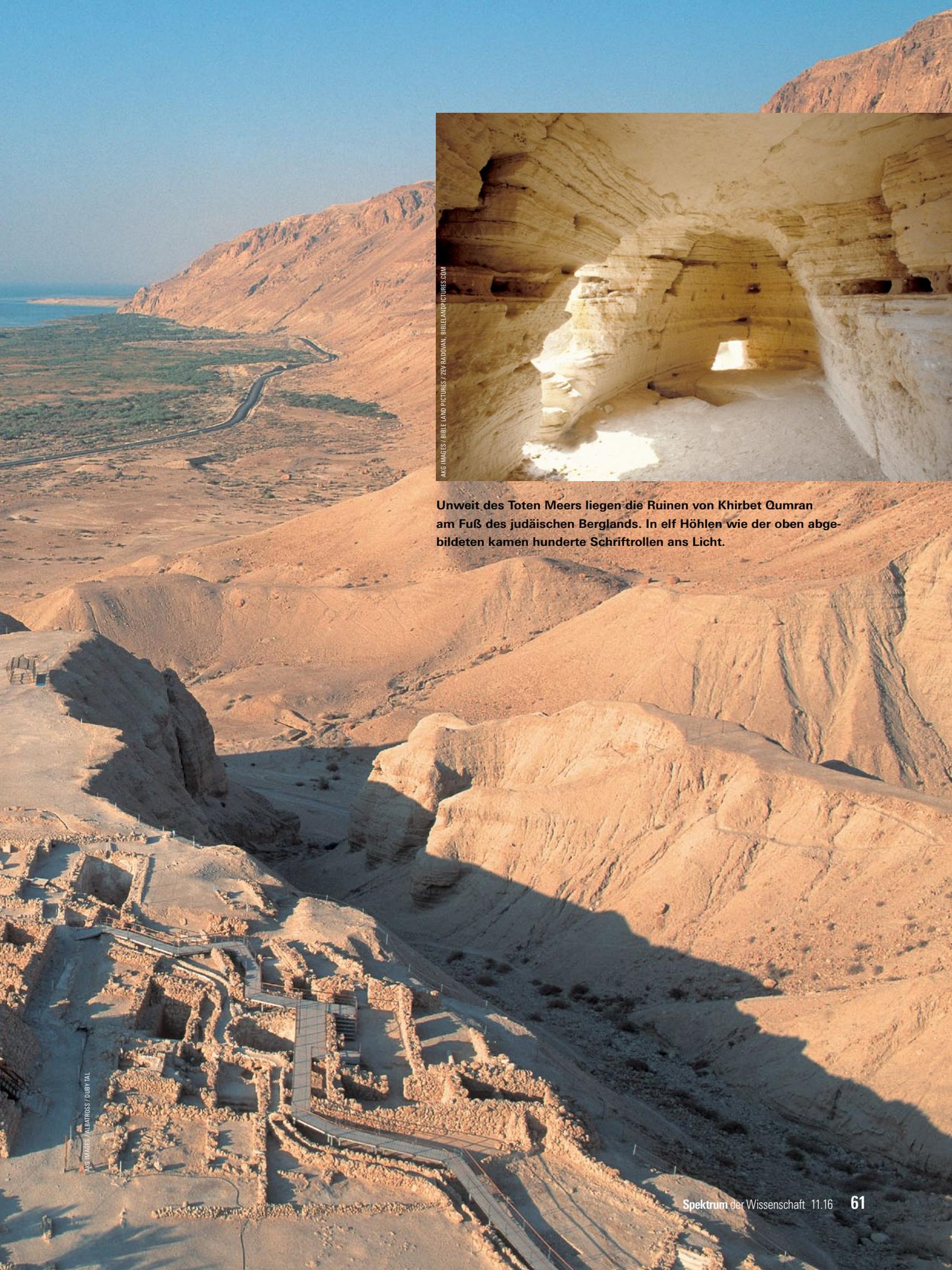
## SERIE Magie der Schrift

Teil 1: September 2016  
**Rätselhafter Indus-Kode**  
von Andrew Robinson

Teil 2: Oktober 2016  
**Das Grab des Magiers**  
von Joachim Friedrich Quack

Teil 3: November 2016  
**Qumran – Kultort, Schreibstube,  
Wissenspeicher**  
von Friederike Schücking-Jungblut

Teil 4: Dezember 2016  
**Buchstaben, Begehren und Tod –  
fantastische Literatur im Mittelalter**  
von Ludger Lieb



ANG IMAGES / BIBLE LAND PICTURES / ZEVI RADWAN, BIBLELANDPICTURES.COM

**Unweit des Toten Meers liegen die Ruinen von Khirbet Qumran am Fuß des jüdischen Berglands. In elf Höhlen wie der oben abgebildeten kamen hunderte Schriftrollen ans Licht.**

ANG IMAGES / ALBATROSS / JOURY TAL

Über eine karge Wüstenlandschaft fällt das jüdische Bergland zum Toten Meer hin ab. In dieser unwirtlichen Gegend wurde Mitte des 20. Jahrhunderts ein für die Wissenschaft grandioser Schatz gehoben: Nahe dem antiken Ort Khirbet Qumran kamen in elf Höhlen Fragmente von gut 900 Schriftrollen aus der Zeit zwischen dem 3. Jahrhundert v. Chr. und dem 1. Jahrhundert n. Chr. zu Tage. Ähnliche Funde, jedoch in weit geringerem Umfang, machten Archäologen in der Folgezeit auch an anderen Orten in der Nähe des Toten Meers. Der Großteil der Texte ist auf Hebräisch verfasst, manche auf Aramäisch und ein paar wenige auf Griechisch. Etwa 230 von ihnen sind auch aus dem Alten Testament bekannt, jedoch mehrere hundert Jahre älter als die ältesten zuvor bekannten Kopien. Das erlaubt Forschern einen einzigartigen Einblick in die Entstehung und die frühe Geschichte der Bibel.

Vor dieser Entdeckung war zum Beispiel unklar, warum die hebräische Fassung vor allem der Bücher Samuel und des Buchs Jeremia so stark von der Septuaginta, der antiken griechischen Bibelübersetzung, abweicht. Die Qumran-Funde zeigen, dass dies nicht den Übersetzern anzulasten ist. Einigen Fragmenten zufolge gab es in hellenistischer und römischer Zeit mindestens zwei verschiedene hebräische Versionen dieser Bücher. Die eine diente dann als Vorlage für die griechische Übersetzung, die andere ging in die hebräische Bibel der so genannten masoretischen Tradition ein.

Die Schriftrollen bestanden meist aus Leder, also auf einer Seite – im Unterschied zum Pergament – beschreibbarer Tierhaut, überwiegend von Ziegen oder Schafen; seltener fand Papyrus Verwendung, in einem Fall auch Kupfer. Bis in die 1990er Jahre war erst ein kleiner Teil ediert worden, also lesbar gemacht und für die Forschung veröffentlicht, was sogar Verschwörungstheorien aufkommen ließ: Der Vatikan behindere die Wissenschaftler, da etliche Manuskripte dem biblischen Kanon widersprächen. Tatsächlich war der Grund weit weniger aufregend: Bis auf



AKG IMAGES / IAM

**Nur wenige Schriftrollen waren so gut erhalten wie diese 1952 gefundene kupferne. Der überwiegende Teil stellt Restauratoren und Forscher noch heute vor eine Herausforderung: Statt zwei großer Fragmente mussten und müssen tausende konserviert und einander zugeordnet werden – wie rechts im Bild im Dead Sea Scrolls Laboratory in Jerusalem.**

wenige Ausnahmen waren die Rollen zu Zehntausenden von Schnipseln zerfallen – für die beteiligten internationalen Forscher ein herausforderndes Puzzle. Seit 2002 sind alle Texte öffentlich zugänglich, einige mittlerweile auch über das Internet.

Für die historische Einordnung der Funde ist auch Khirbet Qumran wichtig. Die Ausgräber deuteten diese antike Siedlung lange als Rückzugsort einer jüdischen Gemeinschaft, die aus Glaubensgründen die Abgeschiedenheit der unwirtlichen Region gesucht hätte. Vor allem die in den zuerst gefundenen Manuskripten immer wieder betonte rituelle Reinheit schien gut dazu zu passen: Etliche in den Fels geschlagene oder gemauerte Becken identifizierten die Archäologen als Mikwen, also als Tauchbäder für kultische Waschungen, um einen Zustand spiritueller Unversehrtheit zu erreichen. Schriftrollen und Mikwen erschienen wie zwei Seiten derselben Medaille.

Schnell wurde die in Qumran ansässige Gemeinschaft mit den Essenern gleichgesetzt. Über diese jüdische Gruppe hatten der Theologe Philo von Alexandria (etwa 10 v. Chr. – 45 n. Chr.) und der Historiker Flavius Josephus (etwa 37 – 100 n. Chr.) berichtet, beide selbst Juden, sowie der römische Historiker Plinius der Ältere (23/24 – 79 n. Chr.). Letzterer verortete die Essener westlich des Toten Meers – also in die Region von Khirbet Qumran. Alles passte zusammen: Diese Gruppe hatte sich vom offiziellen Judentum, wie es die Priesterschaft des Jerusalemer Tempels vorgab, den Quellen nach abgrenzen wollen. Die abgeschiedene Lage des Wüstenorts kam dem offenbar entgegen. Auch wie die eigenen Leute in den Qumran-Texten bezeichnet wurden, schien zu den Essenern zu passen: Die »Söhne des Lichts« sollten sich von den »Söhnen der Finsternis« fernhalten.

## AUF EINEN BLICK DORF DER SCHREIBER

- 1** Mitte des 20. Jahrhunderts wurden in Höhlen nahe dem Toten Meer und nahe der antiken Siedlung Khirbet Qumran mehr als 900 Schriftrollen gefunden, die zwischen dem 3. Jahrhundert v. Chr. und dem 1. Jahrhundert n. Chr. entstanden.
- 2** Die meisten Texte behandeln religiöse Themen, weshalb die Höhlen lange als Archiv der Essener galten, einer für diese Region durch antike Autoren bezeugten jüdischen Gemeinschaft.
- 3** Neue Auswertungen der Grabungsbefunde widersprechen dieser Deutung jedoch. In jedem Fall scheint die Siedlung um Christi Geburt ein Ort gewesen zu sein, an dem professionelle Schreiber ihre Dienste anboten.



GETTY IMAGES / AFP / GALL TIBBON

Doch viele Details widersprechen nach heutigem Wissen der Hypothese. So brachten Archäologen auf dem Friedhof der Siedlung Frauen- und Kinderleichen ans Licht, die Essener aber lebten im Zölibat. Auch wissen Geoarchäologen und Archäobotaniker inzwischen, dass die Umgebung des Toten Meers in der Antike ein fruchtbarer Landstrich gewesen ist, in dem Bauern ihre Felder bestellten. Funde tausender Dattelkerne, importierter Keramiken und zahlreicher Münzen zeigen dementsprechend: Khirbet Qumran war in der Landwirtschaft erfolgreich und Teil eines regionalen Handelsnetzes, jedoch keine weltabgeschiedene Klosteranlage. Daher vermeiden Forscher es inzwischen, die Bewohner mit irgendeiner in anderen antiken Quellen erwähnten Gruppe zu identifizieren. Stattdessen verwenden sie den Eigennamen, der in den Manuskripten auftaucht: »Jachad«, hebräisch für »Einung« oder »Gemeinschaft«.

### Ein Leben voller Gebete

Unstrittig ist gleichwohl die große Rolle der Religion und entsprechender Schriften im Leben dieser Menschen. Schriftlich fixierte Regeln erlauben Rückschlüsse auf die kultischen Praktiken des Jachad, so etwa zu einem jährlichen Fest der Bundeserneuerung, bei dem die Mitglieder sich an ihren Eintritt in die Gruppe erinnerten und ihre Bindung an sie beschworen. Daneben fanden sich eine Vielzahl von poetischen und liturgischen Texten, aus denen man schließen kann, dass das tägliche Leben der Gemeinschaft von Gebeten begleitet war: Mehr als 80 Prozent der

im Alten Testament aufgeführten Psalmen tauchen auch in den Qumran-Fragmenten auf, dazu eine Vielzahl vergleichbarer, aber nichtbiblischer Texte für das tägliche Gebet und für das an Sabbat- und Festtagen, mitunter beides auf denselben Artefakten.

Die meisten Manuskripte hatten mit maximal 15 Zentimeter Höhe und abgerollt weniger als zwei Meter Breite ein vergleichsweise handliches Format. Damit eigneten sie sich gut sowohl für den gemeinschaftlich kultischen wie für den individuell meditativen Gebrauch. Einige waren so gestaltet, dass sich sprachliche Strukturen beim Lesen leicht erfassen ließen, indem beispielsweise ein wiederkehrender Refrain im Schriftbild abgesetzt wurde. Auch die Orthografie sollte häufig die Leser unterstützen, etwa durch Einfügen ansonsten unnötiger Buchstaben in den reinen Konsonantentext, die einen Hinweis auf die Aussprache gaben. Alle diese Maßnahmen zeigen, dass die Rollen zum lauten Vorlesen gedacht waren. Ebenso wie die Vielfalt liturgisch-poetischer Texte belegt also auch deren materiale und formale Gestaltung eine rege schriftbasierte Frömmigkeitspraxis innerhalb des Jachad.

Das legt die Frage nahe, ob die Rollen vielleicht sogar vor Ort angefertigt wurden. Nach einer vor allem in den 1990er Jahren verbreiteten These des Göttinger Theologen Hartmut Stegemann (1933–2005) waren ihre Herstellung und das Kopieren von Schriften sogar die wesentliche Funktion der Siedlung. So mögen einige der zuvor als Mikwen gedeuteten Wasserbecken für das Gerben des benötigten Leders



verwendet worden sein. Außerdem könnten zwei Räume der Anlage als Skriptorium beziehungsweise Bibliothek gedient haben. Doch stellen Studien der letzten 15 Jahre auch diese These in Frage. Insbesondere verwundert, dass in der Siedlung selbst keinerlei Rollenreste zu Tage kamen und dass die Texte der Schriftrollen den Ort mit keinem Wort erwähnen. Gehörten sie also wirklich zusammen?

Tatsächlich gibt es weiterhin gute Anhaltspunkte dafür, etwa der schlichte Umstand, dass gut die Hälfte der »Archivhöhlen« in unmittelbarer Nähe, wenn nicht sogar im Umfriedungsbereich Khirbet Qumrans lagen. Fremde hätten also nichts ohne Wissen und Billigung der Einwohner darin deponieren können. Des Weiteren sprechen diverse Kleinfunde aus der Siedlung für Schreibaktivitäten: ein paar Tintenfässer, einige beschriftete Tonscherben, so genannte Ostraka, eine davon mit einer Alphabetübung. Andererseits fand man auch Schreibübungen in einer der Höhlen. Dergleichen war sicherlich nicht wertvoll genug, um es von einem anderen Ort dorthin zu bringen. Schließlich bestätigte bei einer besonders gut erhaltenen Rolle die chemische Analyse der verwendeten Tinte, dass sie mit Wasser aus dem Toten Meer angerührt worden war – dieses hat einen außergewöhnlich hohen Bromgehalt. Nach heutigem Kenntnisstand gab es aber kein anderes Dorf an dessen Ufern, in dem Schreiber lebten.

Einige Manuskripte haben ein so ähnliches Schriftbild, dass sie wohl von ein und derselben Person stammen. Manche entstanden offensichtlich im Rahmen einer Ausbildung, wie die zahlreichen eingetragenen Korrekturen vermuten lassen. Alle Rollen, für die anhand solcher Indizien eine Anfertigung in der Siedlung als wahrscheinlich gilt, sind im Übrigen jünger als die darauf geschriebenen Texte. Auch wenn es sich noch nicht eindeutig beweisen lässt: Khirbet

**»An den Strömen von Babel, da saßen wir und weinten, wenn wir an Zion dachten.« So beginnt Psalm 137. Der im 20. Jahrhundert häufig vertonte Hymnus ist auch auf der so genannten Psalmenrolle zu finden.**

Qumran beherbergte um Christi Geburt wohl eine Schreibstube, in der ausgebildete Arbeitskräfte religiöse Bücher für den kultischen Gebrauch des Jachad anfertigten.

Ein für uns heutzutage wichtiger Aspekt ist der des Wissensspeichers. Die erhaltenen Fragmente und Schriftrollen haben über fast zwei Jahrtausende hinweg Wissen über das soziale und vor allem das religiöse Leben im hellenistischen und römischen Palästina bewahrt. Doch lag dies in der Absicht der Menschen? Dienten die Höhlen von Anfang an als Archiv oder wurden sie dazu erst im Zuge der politischen Wirren eingerichtet, um heilige Texte vor dem Zugriff durch die römische Besatzungsmacht zu bewahren? Und weiter: Lag deren Auswahl ein Plan zu Grunde oder erfolgte sie eher zufällig?

#### **Qumran brauchte keine Luxusausgaben**

Hier hilft der Blick zu anderen zeitgleichen Schriftdepos in der jüdischen Wüste. Nicht nur sind diese wesentlich kleiner. Sofern ihre Fragmente Rekonstruktionen erlauben, umfassten sie ausschließlich großformatige Luxusausgaben, während man bei der Anlage des Qumran-Archivs auf dergleichen weniger Wert legte. Oft begnügte man sich dort sogar mit minderer Schreiberqualität – einige Manuskripte enthalten Fehler, die manchmal korrigiert wurden, mitunter nicht einmal das.

Anhand von Briefen und Dokumenten lassen sich die anderen Sammlungen meist reichen Personen oder Familien



AKG IMAGES / BIBLE LAND PICTURES, BIBLELANDPICTURES.COM

zuordnen, während so etwas in den Qumran-Rollen ganz fehlt. Da Archäologen bei den sonstigen Depots auch Gerätschaften des täglichen Lebens entdeckten, sehen sie die betreffenden Höhlen als Verstecke, vor allem während des 1. Jüdischen Krieges (66–74 n. Chr.). Dass ihre Besitzer die Schriftrollen auf ihrer Flucht mitgenommen hatten, zeugt von dem großen Wert, den sie ihnen beimaßen. Warum sie dort blieben und was mit den Menschen geschehen ist, lässt sich nicht mehr ermitteln.

Der Schutz vor den Römern dürfte zwar auch in Qumran von Bedeutung gewesen sein. Dass dort Manuskripte von geringerem Wert aufbewahrt wurden, offenbart zudem ein weitergehendes, allgemeineres Interesse an der schriftlichen Überlieferung. Das erklärt auch die erwähnte Vielfalt der Genres: Das Archiv zog andernorts lebende Anhänger des Jachad an, die nicht nur die Texte studierten, sondern auch ihrerseits welche der Sammlung hinzufügten. So fanden sich dann eben nur wenige Manuskripte von der gleichen Hand – ein großer Teil stammte aus anderen Regionen Palästinas.

Wo diese stetig wachsende Bibliothek aufbewahrt wurde, ob zunächst im Dorf oder von Anfang an in den Höhlen, lässt sich auf Grundlage der bislang bekannten Fakten nicht sagen; auch eine zeitweise gemischte Aufbewahrung ist denkbar. Spätestens in der Zeit des 1. und des 2. Jüdischen Krieges (132–135 n. Chr.) dürften sich die Angehörigen des Jachad um die Sicherheit ihres intellektuellen Schatzes gesorgt und ihre Sammlung in den Grotten magaziniert haben. Vermutlich schmuggelte mancher Jude auch kostbare Dokumente aus Jerusalem heraus und brachte sie zu dem Dorf am Toten Meer – sicher mit dem Ziel, sie in besseren Zeiten wieder hervorzuholen und ihre Texte zu lesen, zu lehren oder zu singen.

Doch die Hoffnung erfüllte sich nicht: Weite Teile Judäas und sogar Jerusalems selbst wurden während der beiden Kriege zerstört, alle Juden aus der über den Ruinen der Hauptstadt erbauten römischen Stadt Aelia Capitolina verbannt. Und so verblieben die Schriftrollen für Jahrtausende in den Grotten von Qumran – ein Wissensspeicher, dessen Potenzial noch lange nicht ausgeschöpft ist, und das wichtigste Zeugnis für die Schrift- und Schreiberpraktiken im antiken Judentum. ◀

QUELLEN

**Frey, J. et al. (Hg.):** Qumran und die Archäologie. Texte und Kontexte. Wissenschaftliche Untersuchungen zum Neuen Testament 278. Mohr Siebeck, Tübingen 2011

**Popović, M.:** Qumran as Scroll Storehouse in Times of Crisis? A Comparative Perspective on Judean Desert Manuscript Collections. In: Journal for the Study of Judaism 43, S. 551–594, 2012

**Tov, E.:** Scribal Practices and Approaches Reflected in the Texts Found in the Judean Desert. Studies on the Texts of the Desert of Judah 54. Brill, Leiden/Boston 2004

WEBLINK

Bilder der Fragmente von Qumran und anderen Archiven im Internet: [www.deadseascrolls.org.il](http://www.deadseascrolls.org.il)

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter [spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit](http://spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit)



FRAUKE FÖCKE

# WELTERNÄHRUNG GEGEN SALZ GEFEIT

**Weil die Ackerböden der Welt in dramatischem Maß versalzen, entwickeln Agrarforscher daran angepasste Nutzpflanzen – mit ersten Erfolgen.**



**Mark Harris** ist Wissenschafts- und Technikjournalist in Seattle.

► [spektrum.de/artikel/1420989](https://spektrum.de/artikel/1420989)

Eric Rey holt aus seiner Aktentasche ein Gefäß mit gegartem Naturreis. Vorsichtig probiere ich davon ein paar Körner. Sie sehen normal aus, riechen und schmecken auch so und sind zart wie gewohnt. Nur sind sie ein bisschen fad – am liebsten würde ich nachwürzen. Das entbehrt nicht einer gewissen Ironie, denn dieser Reis wurde in salzigem Wasser gezogen. Sogar bei einem anschließenden Blindtest merke ich keinen Unterschied zu herkömmlichen, normal in Süßwasser gereiften Sorten. Wir befinden uns in Seattle (US-Bundesstaat Washington) bei der Biotechnologiefirma Arcadia Biosciences mit Hauptsitz in Davis, Kalifornien. Rey ist ihr Geschäftsführer.

Die meisten Pflanzen der Welt, auch gewöhnlicher Reis, gehen in Salzwasser ein. Doch hier handelt es sich um eine gentechnisch veränderte Kultur. Diesem Reis haben die Forscher Eigenschaften von so genannten Halophyten

eingepflanzt, die an Standorte mit hohem Salzgehalt wie Meeresküsten oder Salzsteppen angepasst sind.

Gemessen an den Erntemengen zählt Reis neben Mais und Weizen zu den wichtigsten Feldfrüchten der Welt. In vielen Ländern, vor allem in Asien, stellt er die Hauptnahrung dar. Aber in China sind die Böden mancherorts inzwischen dermaßen stark versalzt, dass Getreide dort schon nicht mehr gut wächst. Laut Rey ließe sich dem aber begegnen, wenn man jene physiologischen Mechanismen und die dazugehörigen Gene nutzt, mit deren Hilfe sich Halophyten gegen zu viel Salz im Wasser wehren. Solche Gene könnte man in Reis und andere Kulturpflanzen einbringen. Das wäre ein wertvoller Beitrag zur Welternährung angesichts der stetig steigenden Bevölkerungszahlen. Allein bis Mitte dieses Jahrhunderts wird die Menschheit voraussichtlich um weitere zwei Milliarden zunehmen.

Bedingt durch ungünstige Bewässerungsmethoden leidet heute fast ein Viertel der künstlich bewässerten Gebiete der Erde unter Versalzung, unter anderem weil zu viel Wasser verdunstet, während das darin gelöste Salz im Boden zurückbleibt. Millionen Hektar Ackerland drohen außerdem wegen des Meeresspiegelanstiegs durch eindringendes Salzwasser nutzlos zu werden. Viel wäre gewonnen, ließen sich auf diesen Flächen speziell daran angepasste und dort ertragreiche Kulturen anbauen.

Solche Ideen seien heutzutage keine Hirngespinnste mehr, konstatiert der Botaniker Eduardo Blumwald, auf dessen Forschung an der University of California in Davis der salztolerante Reis von Arcadia Biosciences zurückgeht. Er hält es durchaus für realistisch, Feldfrüchte bald schon in minderwertigem, also brackigem oder recyceltem Wasser und sogar in verdünntem Meerwasser zu ziehen. In seinen Gewächshäusern zeigt er mir jede Menge hohe, kräftig grüne Reispflanzen, die dort in salzigem Wasser offensichtlich bestens gedeihen. Blumwald zählt zu der kleinen

## AUF EINEN BLICK SALZTOLERANTE NUTZPFLANZEN

- 1** Fast ein Viertel der Anbauflächen weltweit leidet unter zunehmend versalzenden Böden, was fatal für die kultivierten Pflanzen ist.
- 2** Genetiker erproben verschiedene Wege, um die normalerweise geringe Salztoleranz von Reis, Tomaten und anderen Kulturarten deutlich zu steigern.
- 3** Mittels transgener Nutzpflanzen könnte man Millionen mehr Menschen als heute ernähren und viel versalztes Ackerland retten. Gegner dieser Methoden plädieren für alternative Zuchtmaßnahmen.



ISTOCK / EKATERINA KRASNIKOVA

**Queller wachsen in Salzmarschen und an Meeresküsten. Forscher lassen sich von ihren Tricks für Salzresistenz inspirieren.**

Zahl Wissenschaftler weltweit, die Gene von natürlichen Salzpflanzen auf häufig angebaute Kulturgewächse übertragen. Außer Reis manipulieren sie etwa Weizen, Gerste oder Tomaten. Auch mit Baumwolle gibt es bereits solche Studien.

Doch die eigentliche Bewährungsprobe für transgene neue Sorten ist der Schritt ins Freiland. Dort müssen die Pflanzen den natürlichen Wetterbedingungen standhalten, bis hin zu Unwettern, Hitzewellen und längeren Dürreperioden. Sie werden auch mit verschiedensten Schädlingen konfrontiert sein. Zunächst haben sie allerdings die Stürme zu bestehen, die ihnen von vielen Seiten wegen Sicherheitsbedenken und politischer Regularien erwachsen. So manchem Wissenschaftler, Landwirt und Verbraucher wollen gentechnisch veränderte Erzeugnisse nicht schmecken – aus vielerlei Gründen. Die Betroffenen fürchten beispielsweise, dass die fremden Gene ungewollt auf andere Pflanzen übertragen werden, wovon die Folgen nicht absehbar sind. Sie halten es für falsch, ausgerechnet die schwächsten, ärmsten Bevölkerungen solchen Risiken auszusetzen. Einige Umweltexperten sorgen sich zudem, dass Feldfrüchte, die Salz besser vertragen, Bauern erst recht zu wenig nachhaltigen Bewässerungsformen verleiten.

Typische Halophyten, die sogar die hohen Salzkonzentrationen von Meerwasser tolerieren, sind Mangroven: Bäume und Sträucher verschiedener Pflanzenfamilien, die an tropischen Meeresküsten und in brackigen Flussmündungen wachsen, jedoch wenig appetitanregend aussehen. Ende des 20. Jahrhunderts waren Agronomen noch optimistisch, einige jener Arten zumindest als nahrhaftes Tierfutter verwenden zu können, denn viele dieser Salzpflanzen produzieren reichlich Proteine und verdaubare Kohlenhydrate oder in ihren Samen Öl. Aber solche Vorhaben erwiesen sich als wenig praktikabel und konnten sich nicht durchsetzen – es gab dafür einfach keinen Markt.

Noch Mitte der 1990er Jahre, als Blumwald an Salzpflanzen zu forschen begann und herausfinden wollte, ob sie sich für die menschliche Ernährung nutzen lassen, hielten die meisten seiner Berufskollegen diesen Ansatz für völlig exotisch. Er berichtet: »Das Gros der Agrarforscher verschwendete damals an das Versalzungsproblem keine Gedanken. Die meisten von ihnen interessierten sich nur für größere, rundere, farbkraftigere oder süßere Produkte.«

Blumwald dagegen befasste sich mit einem Membranprotein von Halophyten, das zu den so genannten Antiportern zählt: speziellen Transportproteinen, die gleichzeitig zwei verschiedene Moleküle gegenläufig zur jeweils anderen Seite einer Membran bringen, sie also quasi gegeneinander austauschen. Der betreffende Antiporter beschleunigt den Tausch von Natriumionen (einem Bestandteil von Kochsalz) gegen Wasserstoffionen durch pflanzliche Zellmembranen (siehe »Wie sich Salzpflanzen wehren«, S. 69). Denn eine Pflanze darf mit dem eingesogenen Wasser nicht zu viel darin gelöstes Salz in die physiologisch aktiven Bereiche ihrer Zellen aufnehmen. Die vielen Natriumionen würden Enzyme beeinträchtigen, den Wassertransport behindern und letztlich die Fotosynthese und damit ihr Wachstum zum Erliegen bringen.

Wie der Forscher damals herausfand, wurden gewöhnliche Nutzpflanzen salztoleranter, wenn er sie genetisch so veränderte, dass sie große Mengen des betreffenden Antiporters herstellten. Noch bei einem Drittel des Salzgehalts von Meerwasser gediehen sie dann recht gut mit wenig unerwünschten Nebeneffekten. Solche Antiporter können überschüssiges Natrium nämlich beispielsweise in die so genannten Vakuolen leiten – mit Zellsaft gefüllte, oft sehr große, abgetrennte Bereiche im Inneren von Pflanzenzellen. Oder sie schicken es in Bläschen, die auf den Blättern sitzen: regelrechte »Blasenzellen« oder Salzblasen. Dadurch erscheinen etwa die Blätter von Quinoa, die als Getreideersatz in

den hohen Anden angebaut wird, wie mit vielen winzigen, durchscheinenden Kugeln übersät. Auch Gewächse sehr trockener Lebensräume verwenden ähnliche Mechanismen, um mit einem hohen Salzangebot zurechtzukommen.

Als Blumwald die Antiporterspiegel in alten englischen Tomatensorten steigerte, vertrugen diese Pflanzen Wasser »viermal so salzig wie Hühnersuppe«. Dabei bildeten sie ausgesprochen große, zugleich süße und saftige, runde Früchte – im Gewächshaus. Im Freiland mochten sie aber nicht gut wachsen. Dazu meint der Forscher: Gut geschützt, bei mindestens 40 Prozent Luftfeuchtigkeit, gedeiht fast alles. Doch auf einem Feld geht die Luftfeuchtigkeit manchmal auf fünf Prozent zurück. Weil die Pflanzen dann über ihre Blätter zu viel Feuchtigkeit verlieren, schließen sie ihre Poren und stellen ihr Wachstum ein.

### **Salztoleranz vermitteln heißt:**

#### **Mit einem Konglomerat von Genen operieren**

Das bedeutet: Ein salziger Standort verlangt von einer Pflanze oft gleichzeitig noch Toleranzen gegen diverse andere Extremsituationen wie Hitze oder Trockenheit. Dabei benötigt sie die Unterstützung durch Tausende von Genen im Zusammenhang mit einer breiten Palette von Stoffwechselprozessen. Allein rund um eine Salztoleranz können zahlreiche Erbfaktoren unter schwierigen Bedingungen ihre Aktivität verändern. Mit einem einzigen hilfreichen Gen zu operieren – diese bequeme Patentlösung gibt es nicht, betont denn auch der Botaniker Simon Barak von der Ben-Gurion-Universität des Negev in Beersheba (Israel).

Aus diesem Grund haben er und seine Kollegen ein Computerverfahren entwickelt, das ihnen anzeigt, welche der jeweils beteiligten Erbsequenzen bei einer bestimmten Stresstoleranz besonders auffallen. Barak hat aus publizierten Studien zur Acker-Schmalwand (*Arabidopsis thaliana*), einem Modellorganismus der Biologie, eine Datenbank von Stressgenen zusammengestellt. Diese hat er nach ihrer Bedeutung für das Überleben der Pflanze unter verschiedenen harten Bedingungen wie etwa Hitze oder Versalzung statistisch gewichtet und sortiert. So konnte er eine Anzahl viel versprechender Genkandidaten für unterschiedliche Stresstoleranzen identifizieren.

Anschließend untersuchte seine Arbeitsgruppe die Widerstandsfähigkeit von Pflanzen, die mutierte Versionen der betreffenden Gene aufwiesen. Diejenigen Mutanten, die eine stärkere Toleranz gegen Dürre, Salz oder Hitze besaßen, wurden für weitere Studien verwendet. Die Trefferquote mit dieser Methode betrug erstaunliche 62 Prozent, erzählt Barak. Wenn sie wollten, wären alle Mitarbeiter des Forscherteams mit der Weiterarbeit an diesen zahlreichen Varianten ein Leben lang ausgelastet. Dagegen findet man bei einer Mutantensuche mit klassischen Methoden unter tausenden Einzelpflanzen vielleicht bei ein bis drei Prozent überhaupt eine interessante Veränderung.

Auch andere Wissenschaftlergruppen suchen mit computergestützter Statistik nach Erbfaktoren für Salztoleranz. Auf diese Weise fand der Genetiker Narendra Singh Yadav eine Reihe mutmaßlich hierfür wichtiger Gene bei der tropischen Quellerart *Salicornia brachiata*, die unter anderem in der Gezeitenzone indischer Meeresküsten wächst. Da-

mals arbeitete Yadav am Central Salt & Marine Chemicals Research Institute im indischen Gujarat. Die genaue Funktion jener Erbanlagen kannte man zu der Zeit noch nicht. Zwei der aufgespürten Gene übertrug der Forscher auf – normalerweise sehr salzempfindlichen – Tabak und prüfte dann die Toleranz gegenüber Wasser mit einem Drittel des Salzgehalts von Meerwasser. Und tatsächlich keimten und wuchsen die Pflanzen mit diesen Genen deutlich besser als unveränderte Exemplare unter gleichen Bedingungen. Sie bildeten längere Wurzeln und größere Schösslinge aus, wurden höher und hatten mehr Blätter. Sichtbare Salzblasen bekamen sie zwar nicht, jedoch wiesen sie geringere Mengen an reaktiven Sauerstoffspezies (»Sauerstoffradikalen«) auf als die Kontrollpflanzen – das sind aggressive Moleküle, die sich unter Stress anhäufen. Während Yadav nun in Israel bei Simon Barak forscht, versucht seine frühere Arbeitsgruppe in Gujarat, in der oben beschriebenen Weise salztolerante Baumwollsorten zu gewinnen. Yadav vermutet, dass im Zusammenhang mit Stressresistenz noch viel mehr Gene der Entdeckung harren.

Eduardo Blumwald setzt mir auseinander, dass man solche Züchtungen, so klug sie auch angelegt sein mögen, trotzdem ziemlich kritisch betrachten muss. Unter seiner Leitung werden in Davis in einem Dutzend Gewächshäusern tausende verschiedene transgene Pflanzen intensiv auf ihre Widerstandsfähigkeit getestet, etwa Alfalfa, Kolbenhirse, Erdnüsse und Reis. Die meisten davon stammen von bewährten Nutzpflanzensorten ab, und in jeder einzelnen Studie versucht man, natürliche Stresssituationen zu imitieren. Große Ventilatoren erzeugen wechselnde scharfe Winde; die Wasserzufuhr erfolgt unregelmäßig und manchmal wie bei einem stürmischen Unwetter; bald sind die Pflanzen Salz ausgesetzt, bald Hitze. Denn Blumwald ist es müde, neu konstruierte Pflanzen im Freien anzubauen, nur um sie dort eingehen zu sehen. Er glaubt nicht mehr daran, dass es eines Tages gelingen wird, Feldfrüchte an reines Meerwasser anzupassen. Vielleicht würden manche Sorten sogar wachsen, meint er, dann aber höchstens sehr geringe Erträge bringen. Dagegen kann er sich Kulturen für verdünntes Meerwasser oder aufbereitetes Wasser gut vorstellen.

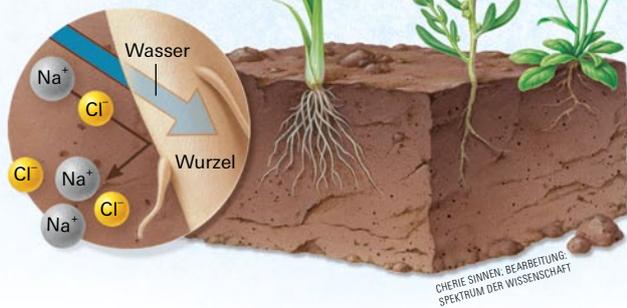
Allerdings sind transgene Nahrungspflanzen vielerorts umstritten. Die britische Umweltaktivistin Janet Cotter von der University of Exeter, die über solche Pflanzen forscht und Greenpeace wissenschaftlich berät, konstatiert: Man könne nie wirklich wissen, was sich in der Pflanze durch den Eingriff sonst noch verändert und ob das die Sicherheit des Nahrungsmittels oder die Umwelt irgendwie beeinträchtigt. Deswegen plädiert sie in der Pflanzenzucht für die Methode der markergestützten Selektion, auch Präzisionszucht oder Smart Breeding genannt. Dabei kommt man ohne gentechnische Eingriffe aus, prüft vielmehr mit modernsten molekularen Nachweisverfahren schon die Samen auf wichtige genetische Eigenschaften der Pflanze (siehe **Spektrum** Dezember 2015, S. 40). Um salztolerante Sorten zu züchten, kann man bei nicht domestizierten nahen Verwandten von Kulturpflanzen dafür nützliche Gene aufspüren und die betreffenden Wildpflanzen dann mit Kultursorten kreuzen. Anschließend durchmustert man die Nachkommen nach Varianten mit den gesuchten Eigenschaften.

# Wie sich Salzpflanzen wehren

Ein wenig Salz im Boden, hier Natriumchlorid oder Kochsalz, können alle Pflanzen aushalten. Mit dem Wasser nehmen sie in geringen Mengen darin gelöste Natrium- und Chloridionen in ihre Zellen und Gewebe auf. Hohe Konzentrationen würden jedoch lebenswichtige biochemische Prozesse beeinträchtigen. Daher gibt es an den Wurzeln der meisten Pflanzen spezielle Barrieren, die ein Zuviel dieser Ionen draußen halten sollen (1). Salzpflanzen – Halophyten – verfügen über verschiedene zusätzliche Tricks. Sie besitzen besondere Proteine, die überschüssige aufgenommene Salzionen praktisch unschädlich machen. Entweder schleusen sie diese in großen Mengen in ihre Vakuolen, flüssigkeitsgefüllte, abgesonderte Räume in den Zellen (2); oder sie verfrachten sie in äußere Salzblasen (3). Mit solchen Proteinen möchten Forscher Nutzpflanzen salztoleranter machen.

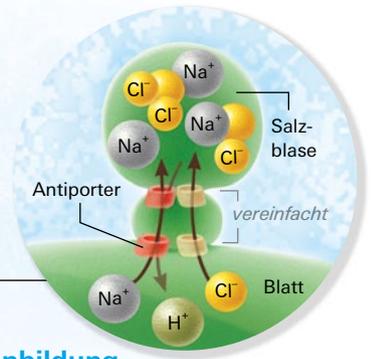
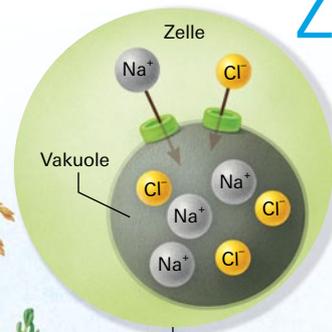
## 1 Wurzelbarrieren

Die meisten Pflanzen, etwa Reis, haben an ihren Wurzeln physikalische und biochemische Schranken, die Wasser hineinlassen, nicht aber Natrium- ( $\text{Na}^+$ ) und Chloridionen ( $\text{Cl}^-$ ). Das funktioniert allerdings nur bei relativ geringen Salzkonzentrationen.



## 2 Einsperren in Zellkammern

Halophyten wie die Quellerart *Suaeda maritima* verfrachten die vielen Salzionen in Vakuolen in ihren Zellen, insbesondere in den Blättern. Das besorgen Tunnelproteine (grün).



## 3 Blasenbildung

Manche Pflanzen wie Quinoa und *Arabidopsis*, die sehr hohe Salzkonzentrationen aushalten, verwenden offenbar so genannte Antipporter (rot): spezielle Transportproteine, die Natrium- und Chloridionen in Außenblasen verfrachten und dabei Wasserstoffionen ( $\text{H}^+$ ) gegenläufig zurück in die Blätter oder Stängel bringen. An diesem Mechanismus beteiligen sich weitere Proteine (beige).

Der britische Agrarwissenschaftler Timothy Russell bewertet transgene Pflanzen zwar weniger kritisch als Cotter, denn er schätzt, dass damit kein besonders großes Risiko einhergeht. Er glaubt aber, dass sich für auf normalem Weg gezüchtete stresstolerante Sorten wesentlich leichter ein Markt aufbauen lässt. Russell hat jahrzehntelange Erfahrungen mit landwirtschaftlichen Entwicklungsprojekten in der Dritten Welt. In Bangladesch arbeitet er zurzeit in leitender Position beim Internationalen Reisforschungsinstitut.

Nach seiner Einschätzung kann man auch mit konventioneller Züchtung eine durchaus akzeptable Salzverträglichkeit erreichen. Er fragt, warum man den hohen Aufwand des Gentransfers überhaupt betreiben soll, wenn ein solcher Eingriff nicht wirklich nötig ist.

Für Genübertragung wiederum spricht die eingesparte Zeit. Kreuzung und Aufzucht, Selektion der passenden Pflanzen und Samen und Weiterzucht dauern insgesamt viel länger. Befürworter gentechnischer Methoden glauben außerdem, dass Produkte transgener salztoleranter Gewächse herkömmlich erzeugte Nahrungsmittel vielleicht schon innerhalb der nächsten vier Jahre im Markt übertrumpfen werden. In Indien hat der salzresistente Reis, den

ich probieren durfte, die letzten Feldversuche zur Hälfte absolviert. Die Zulassungsverfahren werden dort bald anlaufen. Bei einem Zehntel des Salzgehalts von Meerwasser bildet diese Sorte 40 Prozent mehr Körner als normaler Reis. Eric Rey von Arcadia Biosciences rechnet zukünftig mit einer Sorte, die nochmals doppelt so viel Salz aushält. Von den besseren Erträgen würden sowohl die Bauern profitieren als auch seine Firma. Und die Süßwasserressourcen würden geschont.

Blumwald ist vorsichtiger. Er nennt dies einen kleinen Schritt in die richtige Richtung, wendet allerdings ein: Um einige Milliarden Menschen mehr zu ernähren, sind mindestens einige Dutzend, eher hunderte ähnliche Erfolge nötig. ◀

## QUELLEN

- Apse, M. P., Blumwald, E.:** Engineering Salt Tolerance in Plants. In: Current Opinion in Biotechnology 13, S. 146–150, 2002
- Flowers, T. J., Colmer, T. D.:** Plant Salt Tolerance: Adaptations in Halophytes. In: Annals of Botany 115, S. 327–331, 2015
- Ventura, Y. et al.:** The Development of Halophyte-Based Agriculture: Past and Present. In: Annals of Botany 115, S. 529–540, 2015

# CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

## MAGISCHE STIFTE

**Es wirkt wie Zauberei: Mit Filzschreiber gezeichnete bunte Linien ändern ihre Farbe, wenn man mit einem farblosen Stift darüber hinwegstreicht. Doch die Magie entpuppt sich als raffinierte Chemie.**



**Matthias Ducci** (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe.

**Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

► [spektrum.de/artikel/1420988](https://www.spektrum.de/artikel/1420988)

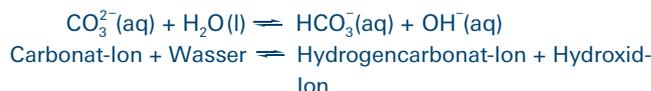
Seit einiger Zeit bieten Warenhäuser und Internetversandhändler neben den üblichen Buntstiften auch Filzschreiber mit einer faszinierenden Eigenschaft an: Damit gezeichnete Linien ändern beim Übermalen mit einem beigefügten »Magic Pen« wie von Zauberhand die Farbe. Welcher Farbwechsel stattfindet, verrät gewöhnlich schon das äußere Erscheinungsbild der Stifte; beispielsweise zeigt die Hülse die ursprüngliche Farbe und die Kappe das Ergebnis des Übermalens mit dem Magic Pen.

Wie funktioniert dieser verblüffende Verwandlungstrick? Mit einfachen Experimenten, die zu Hause durchführbar sind, kommen Sie dem Rätsel auf die Spur. Und Sie können sogar Zauberstifte mit Alltagsprodukten selbst herstellen!

### Ein Tintenkiller als Verwandlungskünstler

Zunächst wollen wir den Magic Pen, der den Farbwechsel hervorruft, genauer unter die Lupe nehmen. Verräterisch ist seine Wirkung auf blaue Tinte: Er lässt sie beim Übermalen verblassen. Handelt es sich also vielleicht nur um einen gewöhnlichen Tintenkiller? Unser nächster Test erhärtet diesen Verdacht: Ein Tintenkiller ruft beim Übermalen der mit dem Zauberfarbstift gezogenen Linien dieselben Farbänderungen hervor wie der Magic Pen! Bestehen somit beide tatsächlich aus den gleichen Substanzen?

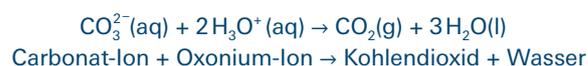
Die Google-Suche mit den Begriffen »Tintenkiller« und »Inhaltsstoffe« führt zu einer Webseite der Firma Pelikan, auf der steht, dass Tintenlöschstifte Wasser, Reduktionsmittel und Soda enthalten. Soda ist der Trivialname für Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Sollte dieses Salz in der Magic-Pen-Flüssigkeit vorkommen, müsste sie alkalisch sein. Bei der Einstellung des Carbonat/Hydrogencarbonat-Gleichgewichts in wässriger Lösung bilden sich nämlich Hydroxid-Ionen. Die entsprechende Gleichung lautet (die Symbole »aq« und »l« stehen für »wässrige Lösung« beziehungsweise »flüssig«):



Ob eine wässrige Lösung sauer, neutral oder alkalisch ist, lässt sich im Labor mit Indikatorpapier feststellen. Denselben Zweck erfüllen im Haushalt bestimmte Lebensmittel, etwa Rotkohlblätter. Die darin enthaltenen Pflanzenfarbstoffe, so genannte Anthocyane, erscheinen in alkalischem Milieu grün und in saurem rot.

Wenn Sie ein knapp handtellergroßes Stück eines Rotkohlblatts in fünf Milliliter Wasser mit einem Messer oder Löffel zerstampfen, erhalten Sie eine violette Lösung. Davon geben Sie einen Tropfen auf eine Folie. Öffnen Sie nun den Magic Pen am hinteren Ende mit einer Zange, klopfen Sie die Mine heraus und drücken Sie etwas vom Inhalt auf den Rotkohlsaft. Der Tropfen färbt sich augenblicklich grün. Also ist die Magic-Pen-Flüssigkeit in der Tat alkalisch.

Mit einem weiteren Test können Sie zudem zeigen, dass sie Carbonat-Ionen enthält. Drücken Sie dazu einen Tropfen aus der Magic-Pen-Mine auf eine schwarze Folie und fügen etwas 24-prozentige Salzsäure aus dem Baumarkt hinzu, die Sie vorher im Verhältnis 3:2 mit Wasser verdünnt haben. Dabei kommt es zu einem kurzen, heftigen Aufschäumen, hervorgerufen durch die Freisetzung von Kohlendioxid gemäß folgender Reaktion (das Symbol »g« steht für »gasförmig«):



Außerdem bilden sich weiße Schlieren – eine Besonderheit, auf die wir später zurückkommen.

Die Gegenwart eines Reduktionsmittels lässt sich gleichfalls mit Haushaltsprodukten nachweisen, beispielsweise

# SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

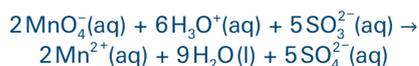
Mit verschiedenen Zauberstiften gekritzelte Farbflächen, auf denen der Magic Pen den Schriftzug »SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT« erscheinen lässt – wobei jedes Wort eine andere Farbe hat.

mit einer Betaisodona-Lösung aus der Apotheke, die durch das enthaltene Iod braun erscheint. Bei Zusatz eines ausreichend starken Reduktionsmittels entfärbt sie sich, weil sich in einer Redoxreaktion entsprechend der nachfolgenden Gleichung Iodid-Ionen bilden ( $e^-$  steht für die vom Reduktionsmittel gelieferten Elektronen):



Genau diese Entfärbung beobachten Sie, wenn Sie auf einen Tropfen Betaisodona-Lösung etwas Magic-Pen-Flüssigkeit träufeln. Demnach ist der Magic Pen also tatsächlich nur ein einfacher Tintenkiller!

Bei dem Reduktionsmittel handelt es sich üblicherweise um ein Gemisch aus Natriumsulfit ( $Na_2SO_3$ ) und Natriumdithionit ( $Na_2S_2O_4$ ). Zum Nachweis der Sulfid-Ionen kann eine stark verdünnte, mit etwas Essigsäure angesäuerte Kaliumpermanganat-Lösung dienen, die in Apotheken erhältlich ist und eine violette Farbe hat. Diese Farbe verschwindet, wenn Sie einige Tropfen der Magic-Pen-Flüssigkeit zufügen. Wer Zugang zu Schulchemikalien hat, kann auch den nächsten Schritt noch ausführen: Bei Zugabe einiger Tropfen einer verdünnten Bariumchlorid-Lösung fällt ein feiner weißer Niederschlag aus. Das beweist, dass Sulfid in der Magic-Pen-Flüssigkeit vorhanden ist, das vom Kaliumpermanganat zu Sulfat oxidiert wird:



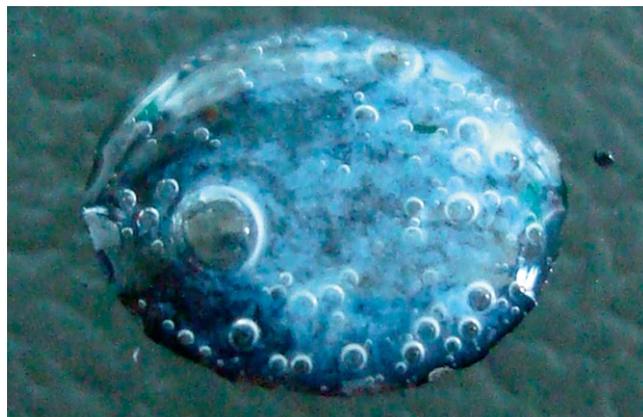
Permanganat-Ionen + Oxonium-Ionen + Sulfid-Ionen → Mangan-Ionen + Wasser + Sulfat-Ionen

Diese bilden mit den Barium-Ionen im Bariumchlorid schwer lösliches Bariumsulfat, das als weißer Niederschlag ausfällt (das Symbol »s« steht für »fest«):



Einen deutlichen Hinweis auf Natriumdithionit liefern die schon erwähnten weißen Schlieren beim Ansäuern der Magic-Pen-Flüssigkeit. Sie bestehen aus Schwefel, der fein verteilt anfällt und deshalb weiß erscheint. Er entsteht in einer relativ komplizierten Reaktion, die Chemiker als Dis-

proportionierung bezeichnen. Darunter versteht man einen Vorgang, bei dem Atome ein und desselben Elements zugleich als Oxidations- und Reduktionsmittel fungieren, indem einige von ihnen Elektronen an die anderen abgeben. Im Dithionit ( $S_2O_4^{2-}$ ) sind die Schwefelatome formal dreifach positiv geladen (und die Sauerstoffatome entsprechend zweifach negativ). Reagieren zwei derartige Ionen miteinander, geben jeweils drei der insgesamt vier enthaltenen Schwefelatome ein Elektron an das vierte ab, das dadurch elektrisch neutral wird, während sie selbst am Ende formal vierfach positiv geladen sind.



MATTHIAS DUCCI

Wird ein Tropfen Magic-Pen-Flüssigkeit mit Salzsäure versetzt, schäumt er auf. Demnach enthält er offenbar Soda – ein Carbonat, aus dem die Säure gasförmiges Kohlendioxid austreibt.



MATTHIAS DUCCI

Rotbraune Iod-Lösung (links) entfärbt sich bei Zugabe eines Tropfens Magic-Pen-Flüssigkeit. Diese beinhaltet folglich ein Reduktionsmittel, das Iod in farbloses Iodid verwandelt.



Dithionit-Ionen + Oxonium-Ionen → Schwefel + Hydrogensulfid-Ionen

Nachdem das Geheimnis des Magic Pen gelüftet ist, fragt sich nun, welche Substanzen in den farbigen Stiften enthalten sind. Hinweise auf die Antwort liefern Papierchromatogramme, wie sie schon Kinder in der Grundschule anfertigen. Schneiden Sie dazu in die Mitte eines Laborrundfilters – zu beziehen bei verschiedenen Herstellern im Internet – ein etwa einen Zentimeter breites Loch. Als Nächstes zeichnen Sie ein kleines Stück von dessen Rand entfernt mit einem der Zauberstifte einen Kreis. Anschließend rollen Sie aus einem zwei bis drei Zentimeter breiten Filterpapierstreifen einen Docht und schieben ihn in das Loch des Rundfilters. Das Ganze stellen Sie in den metallischen Schraubverschluss einer Flasche, den Sie halb mit Wasser gefüllt haben (Bild ganz unten). Der Docht saugt das Wasser hoch, so dass es zum runden Filterpapier gelangt und darin langsam nach außen wandert.

Im Normalfall zerläuft dabei der eingezeichnete Kreis, und es bilden sich unterschiedlich gefärbte Ringe. Demnach enthalten die Zaubertinten in der Regel also mehrere Farbstoffe, die sich verschieden gut in Wasser lösen. Wenn Sie nun die eine Hälfte des Chromatogramms mit dem Magic Pen oder einem Tintenkiller übermalen, kommen Sie dem Geheimnis der Farbänderung näher (Bilder rechts oben).

Betrachten wir einen Zauberstift, dessen Schrift von Grün nach Lila wechselt. Dem Chromatogramm zufolge enthält er ein Gemisch aus einem blauen und einem gelben Farbstoff (linker Filter im Bild rechts oben). Die blaue Komponente bleibt beim Übermalen mit dem Magic Pen unverändert, während sich die gelbe rot färbt. Das erklärt, warum der ursprünglich grüne Strich (Mischfarbe von Blau und Gelb) die Farbe Lila annimmt (Mischfarbe von Blau und Rot).

Der rote Stift mit gelber Kappe funktioniert etwas anders: Hier verblasst die rote Farbe, und die gelbe bleibt unverändert (mittlerer Filter im Bild rechts oben). Beim grünen Stift mit roter Kappe schließlich treten beide Effekte auf: Die blaue Farbe wird gelöscht, und die gelbe verwandelt sich in Rot (rechter Filter im Bild rechts oben).

Aus chemischer Sicht enthalten die Stifte demnach Farbstoffe, die unterschiedlich auf Basen oder Reduktionsmittel reagieren – die einen sind empfindlich dagegen, die anderen nicht. Zur erstgenannten Gruppe gehören viele Triphenylmethan- und Azofarbstoffe: Sie verblassen oder ändern ihre Farbe. Unempfindlich sind dagegen unter anderem Xanthenfarbstoffe, zu denen insbesondere die Rhodamine zählen.

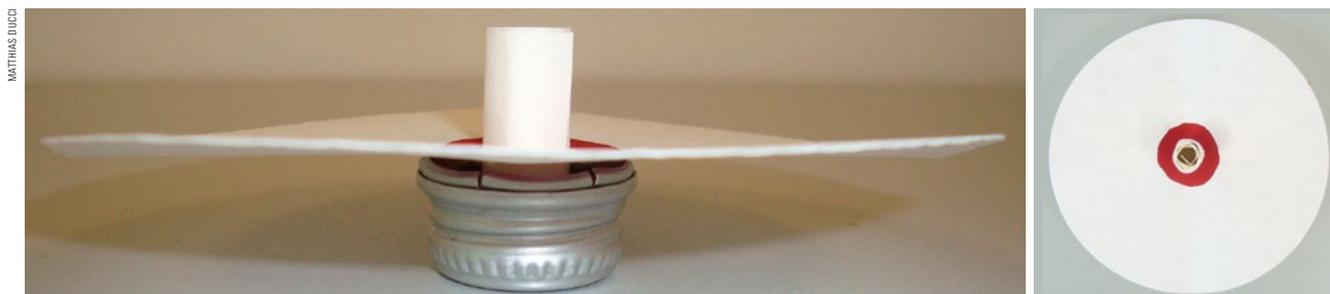
### Die molekularen Vorgänge beim Farbwechsel

Um Ihnen einen Eindruck von den chemischen Vorgängen zu vermitteln, die beim Übermalen mit dem Magic Pen ablaufen, sei ein Stift betrachtet, der einen besonders spektakulären Farbwechsel zeigt, nämlich von Blau nach Gelb-fluoreszierend.

Untersuchungen im Labor zufolge enthält die blaue Tinte den Triphenylmethanfarbstoff Wasserblau im Gemisch mit dem gelben Fluoreszenzfarbstoff Pyranin (dem Trinatriumsalz der 8-Hydroxypyren-1,3,6-trisulfonsäure). Dieser liegt allerdings im farblosen Zustand vor; sonst ergäbe sich ja eine grüne Mischfarbe. Er entfaltet seine gelbe Fluoreszenz erst beim Übermalen mit dem alkalischen Magic Pen. Der Grund dafür ist eine Hydroxy-Gruppe (–OH), von der sich in basischem Milieu ein Wasserstoff-Ion (H<sup>+</sup>) abspaltet, so dass sie zum O<sup>-</sup>-Rest wird. Dieser fungiert als so genanntes Auxochrom. Darunter verstehen Chemiker ein Atom oder eine Atomgruppe mit der Eigenschaft, das Absorptionsmaximum eines Moleküls zu größeren Wellenlängen hin zu verschieben. Im Fall von Pyranin verlagert es sich in den blauen Spektralbereich, weshalb die Substanz nun gelb erscheint.



Saure Kaliumpermanganat-Lösung (links) entfärbt sich bei Zugabe der Magic-Pen-Flüssigkeit (Mitte). Wird anschließend Bariumchlorid-Lösung zugetropft, bildet sich ein weißer Niederschlag von Bariumsulfat (rechts). Demnach besteht das Reduktionsmittel im Magic Pen aus Natriumsulfid.



Der Versuchsaufbau zur papierchromatografischen Analyse der Farbe von Zauberstiften in Seitenansicht (links) und von oben betrachtet (rechts).



Die Tinte von Zauberstiften enthält in der Regel mindestens zwei verschiedene Farbstoffe. Das zeigen die Papierchromatogramme, die auf der linken Seite der Rundfilter zu sehen sind. Die rechte Seite wurde jeweils mit einem Magic Pen übermalt, um zu demonstrieren, wie dieser mit den einzelnen Farbkomponenten reagiert.

Verantwortlich dafür ist ein Phänomen, das als +M-Effekt bezeichnet wird. Dieser tritt auf, wenn ein Substituent in einem aromatischen System – es besteht aus Kohlenstoff-Sechsringen, in denen sich so genannte  $\pi$ -Elektronen frei bewegen können – die Elektronendichte erhöht und es den Elektronen damit erleichtert, vom Grund- in den angeregten Zustand überzugehen. Daher findet dieser Übergang schon bei geringerer Energiezufuhr statt und wird folglich bereits durch langwelligeres Licht ausgelöst.

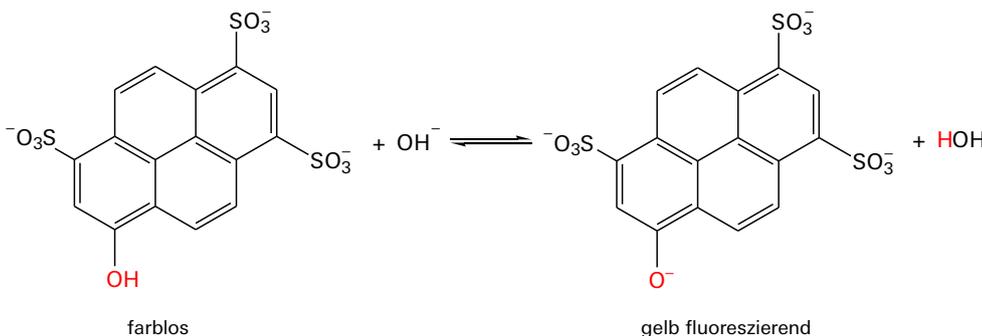
Während die Hydroxid-Ionen im Magic Pen das Pyranin in den gelb fluoreszierenden Zustand überführen, entfärben die Sulfat-Ionen das Wasserblau. Indem sie sich an das zentrale Kohlenstoffatom des Triphenylmethanmoleküls anlagern, zerstören sie nämlich die Doppelbindung zwischen diesem und dem benachbarten Benzolring. Aus einer ebenen, einem Mercedesstern gleichenden Konfiguration ( $sp^2$ -Hybridisierung), in der sich die für die Doppelbindung verantwortlichen  $\pi$ -Elektronen des aromatischen Ring-systems frei über das ganze Molekül verteilen können, wird so eine tetraedrische Anordnung ( $sp^3$ -Hybridisierung), in der das nicht mehr möglich ist. Dadurch erhöht sich automatisch die Energie für den Übergang der  $\pi$ -Elektronen aus dem Grund- in den ersten angeregten Zustand, so dass sichtbares Licht ihn nicht mehr auslösen kann. Deshalb

verliert der Stoff seine Farbigkeit. Dasselbe passiert übrigens, wenn man die blaue Tinte eines Füllers mit einem Tintenkiller behandelt.

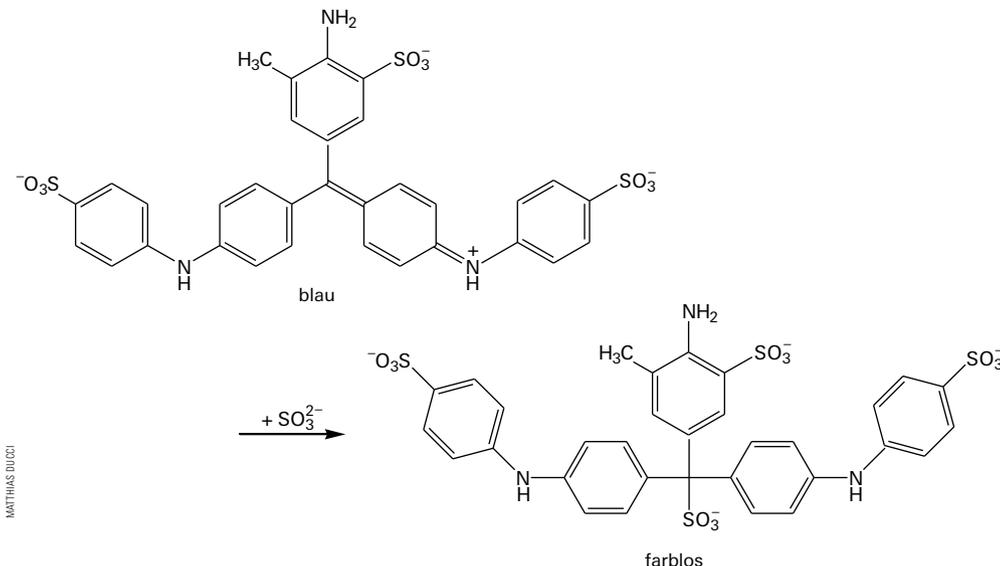
#### Herstellung eigener Zauberstifte mit Haushaltsprodukten

Ausgerüstet mit diesen Kenntnissen, sind Sie nun in der Lage, Zauberstifte auch selbst herzustellen. Dazu müssen Sie aus Filzschreibern mit herausnehmbarer Plastikmine und wasserlöslicher Farbe zunächst die Tinte entfernen. Das ist nicht weiter schwierig, wenn auch etwas mühselig. Entnehmen Sie die Mine und drücken Sie die Tinte unter fließendem Wasser heraus. Das dabei eindringende Wasser müssen Sie anschließend ebenfalls vollständig entfernen. Bevor Sie die Mine wieder einsetzen, spülen Sie auch noch die im Gehäuse verbliebene Spitze des Stifts aus, um sie von Tintenresten zu befreien.

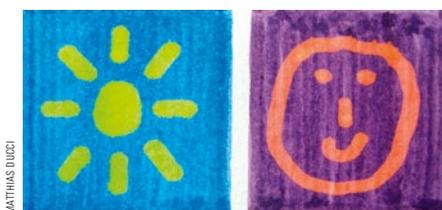
Die derart vorbereitete Mine füllen Sie dann mit der Zauberfarbe. Diese kann im einfachsten Fall aus einer Mischung von blauer und roter Tinte bestehen, von der Sie jeweils 1,5 Milliliter in den Schraubverschluss einer Wasserflasche geben und umrühren. Wenn Sie nun die Mine mit einem Ende hineintauchen, hat sie sich innerhalb von Sekunden zu etwa zwei Dritteln mit der Flüssigkeit vollgesogen. Durch Aufdrücken von saugfähigem Haushaltspapier



Wird das farblose Pyranin (links ohne Natriumionen gezeigt) mit einer Base versetzt, gibt es ein Wasserstoffion ( $\text{H}^+$ ) ab und wird dadurch gelb fluoreszierend.



**Triphenylmethanfarbstoffe wie Wasserblau entfärben sich, wenn sich ein Sulfition ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) an das zentrale Kohlenstoffatom anlagert.**



**Diese Zeichnungen entstanden mit selbst hergestellten Zauberstiften und einem Tintenkiller.**

Falls sich die Striche lediglich entfärben, haben Sie zu viel Zitronensäure zugefügt. Diese können Sie auch ganz weglassen; dann erhalten Sie einen Stift, der einen Farbwechsel von Grün nach Gelbfluoreszierend zeigt.

Noch eindrucksvoller erscheint die Fluoreszenz beim Betrachten unter UV-Licht. Dabei sollten Sie allerdings Papier verwenden, das keine optischen Aufheller enthält. Diese fluoreszieren bei Bestrahlung mit UV-Licht nämlich selbst bereits. Geeignet ist hellgelbes oder hellbraunes Papier, etwa solches aus der »Parchment – Royal Paper Collection« der Dresdner Feinpapier-Werkstatt (DFW), das im Schreibwarenhandel erhältlich ist. Unter UV-Licht leuchtet übrigens nicht nur Pyranin, sondern auch Eosin Y – allerdings nicht rot, sondern hellgrün.

Statt einen kommerziellen Tintenkiller zu benutzen, können Sie sich schließlich auch Ihren eigenen Magic Pen herstellen. Die zugehörige Flüssigkeit lässt sich ebenfalls leicht aus Haushaltsprodukten zusammenmischen. Hauptzutat ist der Power-Entfärber »intensiv« von Heitmann, der Natriumcarbonat sowie Natriumdithionit enthält. Natriumsulfit kommt zwar nicht darin vor, aber darauf verzichten wir einfach. Lösen Sie 0,2 Gramm von dem Pulver in zwei Milliliter Wasser und rühren Sie einen Milliliter Glycerin aus dem Baumarkt hinein. Obwohl der Power-Entfärber schon Natriumcarbonat enthält, sollten Sie noch 0,3 Gramm (Haushalts-)Soda zufügen, damit die Lösung alkalisch genug ist. Glycerin verhindert als Feuchthaltemittel ein schnelles Eintrocknen der Tinte im Stift. ◀

auf das andere Ende können Sie den Füllstand weiter erhöhen. Stecken Sie den Stift anschließend wieder zusammen. Zum Schluss drücken Sie die Spitze auf das Haushaltspapier, bis die Tinte aus der Mine bei ihr angelangt ist.

Der Stift malt lilafarben. Wenn man die Striche mit einem Tintenkiller nachzieht, werden sie hellrot. Der Grund ist, dass blaue Tinten Triphenylmethanfarbstoffe enthalten, von denen wir schon wissen, dass sie durch Reaktion mit Sulfit in den farblosen Zustand übergehen. Dies gilt jedoch nicht für die rote Tinte. Sie enthält gewöhnlich Eosin Y (Dinatriumsalz von 2,4,5,7-Tetrabromofluorescein). Dieses gehört zur Gruppe der Xanthenfarbstoffe und ist immun gegen Tintenkiller.

Auch eine weitere Zaubertinte können Sie selbst zusammenmischen. Dazu benötigen Sie einen gelben Textmarker, der den Fluoreszenzfarbstoff Pyranin enthält, zum Beispiel von den Firmen Herlitz, Pelikan oder Faber Castell. Öffnen Sie mit einer Zange das hintere Ende und entnehmen Sie mit einer Pinzette die Mine. Aus ihr drücken Sie 0,5 Milliliter der gelben Farbstofflösung heraus (am besten tragen Sie dabei Haushaltshandschuhe) und versetzen sie mit zwei Milliliter blauer Tinte. Das Gemisch ist grün. Bei Zusatz von 0,1 Gramm Zitronensäure – erhältlich als Entkalker in Drogerien – nimmt es wieder eine tiefblaue Farbe an.

Striche eines mit dieser Tinte gefüllten Stifts erscheinen nach dem Übermalen mit einem Tintenkiller gelb fluoreszierend. Wie oben beschrieben, lagert sich das Sulfit-Ion an das zentrale Kohlenstoffatom des Triphenylmethanfarbstoffs an und löscht die blaue Farbe. Gleichzeitig spalten die Hydroxid-Ionen im Tintenkiller ein Wasserstoff-Ion vom Pyranin ab, das daraufhin gelb fluoresziert.

#### QUELLEN

**Ducci, M. et al.:** Magic Colours: Die Chemie der Zaubermaler – Ein Laborkurs im Rahmen des Projekts »Make Science«. In: Chemie in Labor und Biotechnik 62, S. 480–486, 2011

**Ducci, M. et al.:** Magische Stifte. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 59, S. 20–24, 2010

**Ducci, M. et al.:** Herstellung von Zaubermalern. In: CHEMKON 17, S. 83–84, 2010

**Ducci, M. et al.:** Color Changing Markers – Ein spannendes Thema für den forschend-entwickelnden naturwissenschaftlichen Unterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 58, S. 44–48, 2009

Großer Auftritt kostet Geld.



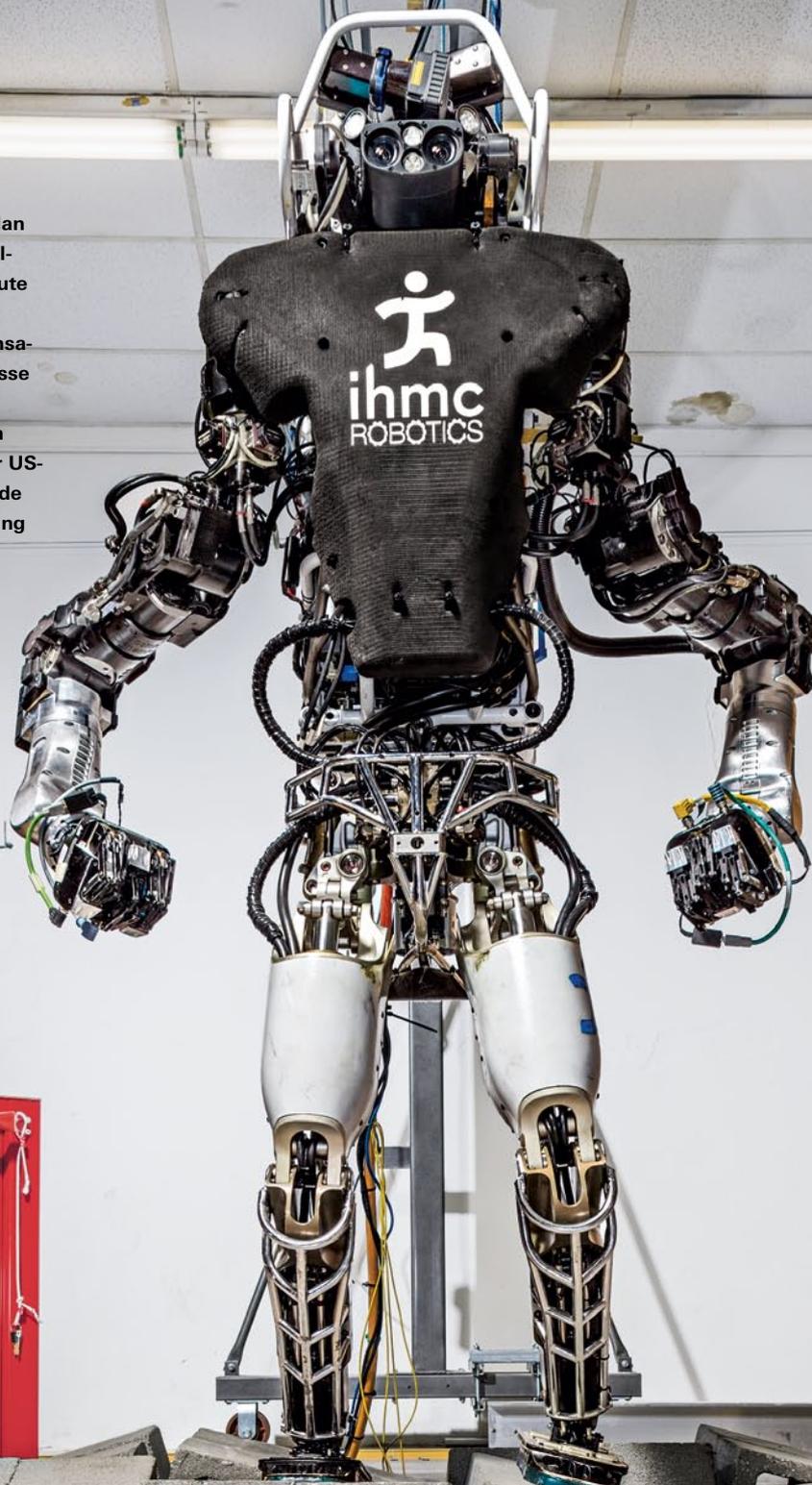
Wissen ist Geld.

 Solider als Deutschland: Die sichersten Aktien aus der Schweiz, Dänemark und Schweden

 Kursziel 100 Prozent! Blackberry-Aktien kaufen!

 **FOCUS MONEY** DAS MODERNE WIRTSCHAFTSMAGAZIN [www.focus-money.de](http://www.focus-money.de)

Der Roboter Running Man posiert auf einem Ziegelhaufen im Florida Institute for Human & Machine Cognition (IHMC) in Pensacola. Ähnliche Hindernisse mussten er und seine Konkurrenten bei einem Roboterwettbewerb der US-Militärforschungsbehörde DARPA meistern; Running Man wurde Zweiter.



JEFF WILSON

# ROBOTIK MASCHINEN AUF ZWEI BEINEN

**Längst gibt es eine Vielzahl rollender, krabbelnder, fliegender Automaten. Warum ist es dann so mühsam, einen Roboter zu bauen, der gehen kann?**



**John Pavlus** ist Schriftsteller und Filmmacher. Er hat sich auf naturwissenschaftlich-technische Themen spezialisiert.

► [spektrum.de/artikel/1420990](https://spektrum.de/artikel/1420990)

Als Jerry Pratt auf dem Bildschirm nur noch blauen Himmel sah, wusste er, dass er verloren hatte. Es gab nur einen Grund, warum die Kamera am Kopfende der sehr kostspieligen, äußerst raffinierten humanoiden Maschine den wolkenlosen Sommerhimmel Südkaliforniens zeigte: Statt flink auf einen kleinen Ziegelhaufen zu steigen, war der Roboter »Running Man« platt aufs Kreuz gefallen.

Pratt und seine Mitarbeiter vom Florida Institute for Human & Machine Cognition (IHMC) konkurrierten mit zwölf anderen Teams um den mit zwei Millionen Dollar dotierten Sieg bei der 2015 DARPA Robotics Challenge (DRC). Den Roboterwettbewerb veranstaltete die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), die Forschungsbehörde des US-Militärs. Die Teilnehmer, darunter die führenden Roboterschmieden der Carnegie Mellon University in Pittsburgh (Pennsylvania) und des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, sollten ihre Prototypen Aufgaben bewältigen lassen, die für Menschen selbstverständlich sind: Im Verlauf einer knappen Stunde musste jeder Apparat ein Fahrzeug besteigen, es steuern und wieder verlassen, eine geschlossene Tür öffnen und ein Gebäude betreten, einen Flur von Schutt säubern oder über lose Ziegel klettern, ein Werkzeug ergreifen und damit eine Gipswand durchstoßen, ein großes Metallventil drehen und

eine kurze Treppe hinaufsteigen. Die meisten Roboter brachten zumindest einiges davon zu Wege, fielen aber auch immer wieder um wie Betrunkene. Ein Zusammenschnitt der oft komisch wirkenden Stürze wurde auf Youtube rund zwei Millionen Mal angeklickt.

## **Aller Anfang ist schwer: Statt lässigen Schreitens nur tastendes Stolpern**

Gehen ist nicht einfach – das demonstriert jedes Kleinkind, das erste Schritte wagt. Dennoch bewegt sich unsere Spezies seit hunderttausenden Jahren auf zwei Beinen voran, der Vogel Strauß und einige andere Tiere sogar seit Jahrmillionen. Was Kinder beim Gehen mühsam lernen, lässt sich mit dem Begriff Agilität (Gewandtheit, Wendigkeit) zusammenfassen. Einen Schritt machen, balancieren, in Bewegung bleiben, Fehler korrigieren, Unebenheiten bewältigen – all diese komplexen Verhaltensweisen sind notwendig, aber nicht hinreichend für zweibeinige Fortbewegung. Wenn auch nur eine der Komponenten nicht so richtig funktioniert, wird aus lässigem Schreiten sofort tastendes Stolpern.

Biologische Agilität hat drei Eigenschaften. Sie ist erstens kontrolliert: Wir nutzen unsere Sinne, um selbstsicher und zuverlässig Schritte zu setzen. Zweitens ist sie robust: In der

Regel können wir uns an Überraschungen anpassen und Fehler kompensieren. Und drittens ist sie effizient: Gehen erfordert nicht unnötig viel Zeit, Energie oder Aufmerksamkeit. Bekanntlich kann ein Mensch problemlos zugleich gehen und sein Smartphone checken.

Erwachsene sind agil mit einer scheinbaren Selbstverständlichkeit, die jedoch auf Jahrtausenden biologischer Evolution beruht – ganz zu schweigen von den vielen Übungsjahren in früher Kindheit. Wir lernen, mittels Sehsinn, Tastsinn und Propriozeption (Eigenwahrnehmung des Körpers) zu balancieren und unsere Schritte zu lenken. Reflexe sorgen dafür, dass wir nicht jedes Mal gleich im Dreck landen, wenn wir auf einen unerwarteten Kieselstein stoßen;

## AUF EINEN BLICK ZAGHAFT GEHVERSUCHE

- 1 Was ein Kleinkind von selbst lernt, bleibt für Roboter bis heute unerreichbar: Keine Maschine kann so Energie sparend und zuverlässig Schritte machen wie Menschen oder tierische Zweibeiner.
- 2 Forscher arbeiten weltweit intensiv an gehfähigen Apparaten. Sie sollen beim Einsatz in Katastrophengebieten zum Beispiel Stiegen erklimmen, Türen öffnen und über Schutt klettern.
- 3 Bei Wettbewerben wie der DARPA Robotic Challenge erproben Ingenieure viel versprechende Ansätze für zweibeinige Roboter.

kräftige, mit weichem Gewebe umhüllte Knochen bewahren vor den meisten Sturzverletzungen. Jeder Schritt ist eine Symphonie mechanischer und rechnerischer Effizienz: Unsere Muskeln und Sehnen können im einen Moment Stöße passiv absorbieren und im nächsten aktiv Antrieb produzieren; das Rückenmark erzeugt periodische Bewegungsmuster, die unsere Beine in die richtige Richtung führen, während sich das Gehirn wichtigeren Aufgaben widmet.

Darum ist Gehen für Roboter schwierig: Bisher kann keine zweibeinige Maschine Kontrolle, Robustheit und Effizienz so gut kombinieren wie ein Mensch – oder sogar ein Huhn. Hondas berühmter ASIMO berechnet bei jedem Schritt akribisch Kraft, Richtung und Impuls; im Vordergrund steht die Kontrolle. Der avancierte Atlas-Humanoid von Boston Dynamics, der durch einen verschneiten Wald stapft und sich nach einem Sturz wieder aufrichtet, betont dagegen Robustheit; Schnelligkeit und Balance sind ihm wichtiger als Planung und Präzision. Aaron D. Ames, Robotikforscher am Georgia Institute of Technology in Atlanta, arbeitet wiederum an einem kopf- und armlösen Zweifüßler namens DURUS, bei dem jeder mögliche Freiheitsgrad durch mathematische Gleichungen spezifiziert wird, die ausgeschriebene hunderte Seiten füllen würden. Und Jona-

than Hurst, ein Maschinenbauingenieur an der Oregon State University in Corvallis, hat seinen relativ simplen Roboter ATRIAS mit einem von Laufvögeln abgeschauten Bewegungsprogramm ausgestattet. Trotz des unterschiedlichen Ansatzes verfolgen Ames und Hurst dabei das gleiche Ziel: Effizienz.

Es gibt auch gemischte Strategien. Pratts Running Man, der bei der DRC den zweiten Platz belegte, vereint beispielsweise die Kontrolle eines ASIMO mit Robustheit à la Boston Dynamics. Jeder Ansatz hat seine Vorteile, keiner kann jedoch mit der Effizienz, Flexibilität, Schnelligkeit und Präzision eines erwachsenen Menschen mithalten.

Aber ist das überhaupt nötig? Jun Ho Oh, ein führender Robotiker am KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology), gewann bei der DRC den ersten Preis nicht etwa durch bessere Lauftechnik, sondern indem er das Schreiten möglichst vermied. Sein Roboter trug Räder an Knien und Füßen und legte die Prüfstrecke größtenteils auf den Knien zurück. Auch die Gebrüder Wright erfanden das Flugzeug nicht, indem sie sklavisch das Flattern von Vögeln kopierten.

Dennoch gibt es gute Gründe, gehende Roboter zu entwickeln. Die offensichtlichste Anwendung ist so alt wie die Legende vom Golem: Eine kräftigere Version des menschlichen Körpers könnte Aufgaben ausführen, die für Menschen allzu schwierig, riskant oder mühsam sind. Anlass für den anfangs erwähnten DARPA-Wettbewerb war die nukleare Katastrophe von Fukushima 2011. Sie wäre vielleicht glimpflicher verlaufen, wenn Roboter damals fähig gewesen wären, das Kernkraftwerk zu betreten, einige Treppen oder halbverschüttete Korridore zu überwinden, Ventile zu schließen oder Schalter umzulegen.

Katastrophen sind aber nur die extremste Einsatzmöglichkeit. Auch Telearbeit im Büro, Hilfe im Haushalt, Paketzustellung, Kontrollgänge und Sicherheitsdienste, Rohstoff- erkundung und -förderung lassen sich durch humanoide Roboter unterstützen oder automatisieren. Der zweibeinige Humanoid verspricht – ähnlich wie die künstliche Intelligenz – grenzenlose Vielseitigkeit. Er könnte als allgemein einsetzbares Werkzeug in unvorhersehbaren Umgebungen agieren und sich dabei selbst all der nützlichen Geräte bedienen, die wir schon erfunden haben.

»Ich kenne keine biologische oder mechanische Form, die sich zur Fortbewegung im Gelände besser eignet als ein Humanoid«, meint Pratt. Umgekehrt werden wir Ames zufolge unsere eigene Fortbewegung umso besser verstehen, je gehfähigere Maschinen wir bauen – und können mit dem Wissen vielen behinderten Menschen helfen.

### Imposant und unsicher

Pratts IHMC-Robotiklabor gleicht einer Kreuzung von Hightech-Bastelwerkstatt und Softwareschmiede. Zwei junge Forscher flitzen auf Skateboards zwischen Stehpulten umher und beschießen einander mit Spielzeugpistolen. Ein vollgeräumter Arbeitsraum beherbergt eine Kopie der DRC-Prüfstrecke und ein großes Metallgerüst, an dem Running Man über dem Boden baumelt.

John Carff, der erfahrenste Roboterlenker des Labors, aktiviert die Maschine, und Running Man streckt wie ein

Hampelmann Arme und Beine weit von sich. An einem Pfeiler lehnt ein langes Rohr, auf dessen Ende ein kleiner Boxhandschuh steckt; es zeigt den Sicherheitsabstand an, den man zu Running Man halten soll, sobald er aktiv ist. Ein motorisierter Flaschenzug senkt die Füße des fast 200 Kilogramm schweren Roboters auf den Boden. Ein dickes Stromkabel versorgt die hydraulischen Bewegungselemente mit zehn Kilowatt Leistung. »Das entspricht der Kraft von zwölf Pferden«, betont Pratt. »Wenn etwas schiefeht und er einen im Gesicht trifft, könnte man tot sein.«

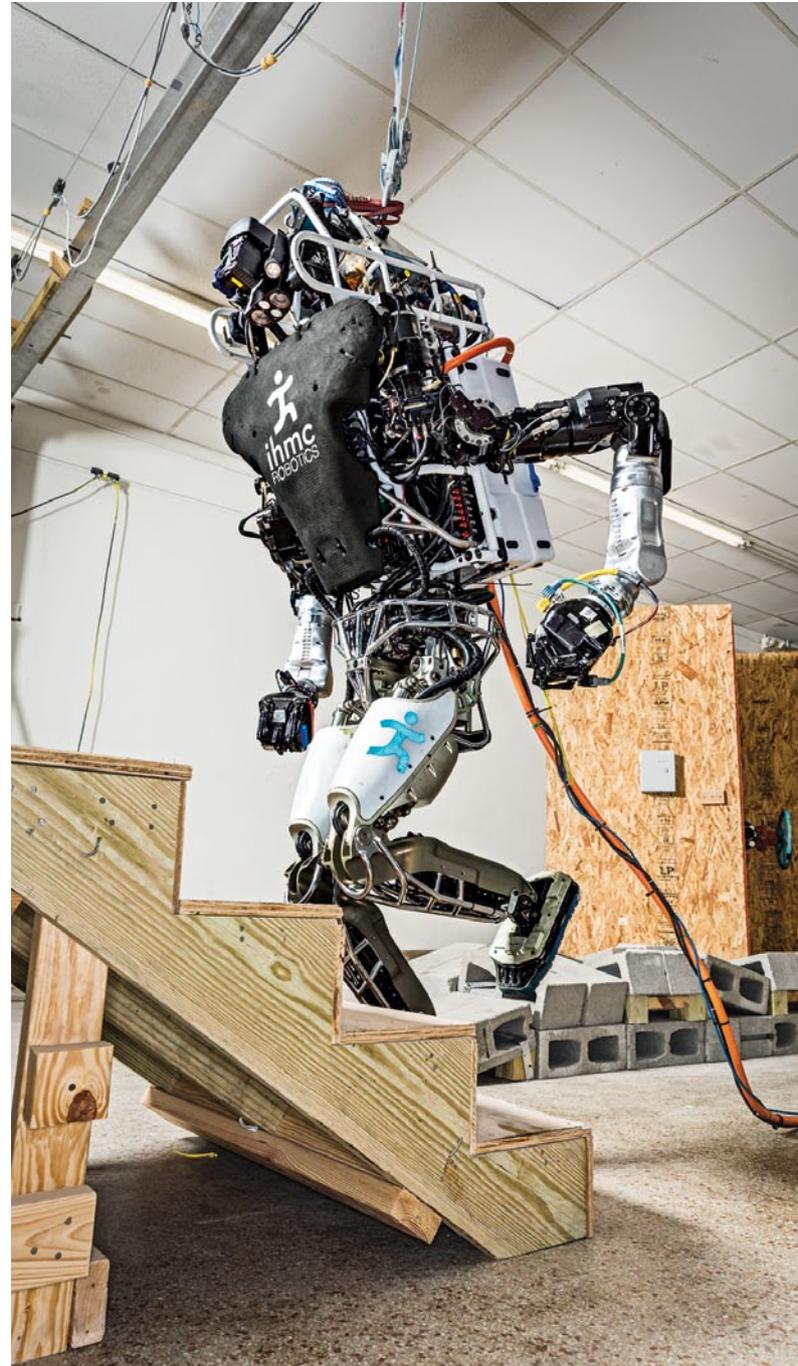
Stellen Pratt und Carff dem Roboter scheinbar simple Aufgaben – auf einem Bein stehen, auf einen Ziegelhaufen

hinauf- und wieder heruntersteigen –, wirkt er zugleich imposant und jämmerlich unsicher. Sein bulliger, in einen gepolsterten Schutzpanzer gehüllter Rumpf balanciert in halber Hocke auf dünnen Beinen, was ihm ein schwerfälliges, wackliges Aussehen verleiht. Da die Software für den Stoßausgleich gerade nicht installiert ist, würde ein fester Schubs den Roboter umwerfen, wenn er nicht zur Sicherheit am Gerüst hinge. Er schlurft zögernd dahin wie ein alter Mann an einer belebten Straßenkreuzung. Dennoch ist jeder Schritt fest und sicher: Die Aufhängung entspannt sich merklich, während Running Man seinen schweren Körper auf den Ziegelhaufen stemmt.

FOTOS: JEFF WILSON



Im Roboterlabor des Florida Institute for Human & Machine Cognition (IHMC) öffnet Running Man eine Tür und erklimmt eine Stiege (oben und rechts). Ingenieur John Carff steuert Running Man von seiner Konsole aus (unten).



Die Methode, mit der Pratt die Schritte berechnen lässt, nennt er Capture Point (Auffangpunkt): Der Fuß eines Zweibeiners muss eine ganz bestimmte Stelle am Boden erreichen, damit der Körper nicht umfällt. Solange jemand schnell geht oder läuft, muss der Auffangpunkt jedes Schritts nicht besonders exakt vorausberechnet werden, denn der Zweibeiner balanciert nur relativ kurze Zeit, bevor er den nächsten Schritt tut. Doch sobald jemand langsam geht oder über unebenes Terrain stakst, kommt es auf jeden Schritt an, erklärt Pratt: »Wenn man nur ein paar Zentimeter daneben tritt, beginnt man wild umherzutorkeln.«

Den Unterschied kennt jeder, der über Steine balancierend einen Bach überqueren möchte. Dabei kann er entweder rasch von Stein zu Stein »vorwärtsfallen« und dabei Balance und Richtung ungefähr beibehalten. Oder er setzt

seine Schritte langsam und vorsichtig, um auf jedem Stein das Gewicht erneut auszutariieren.

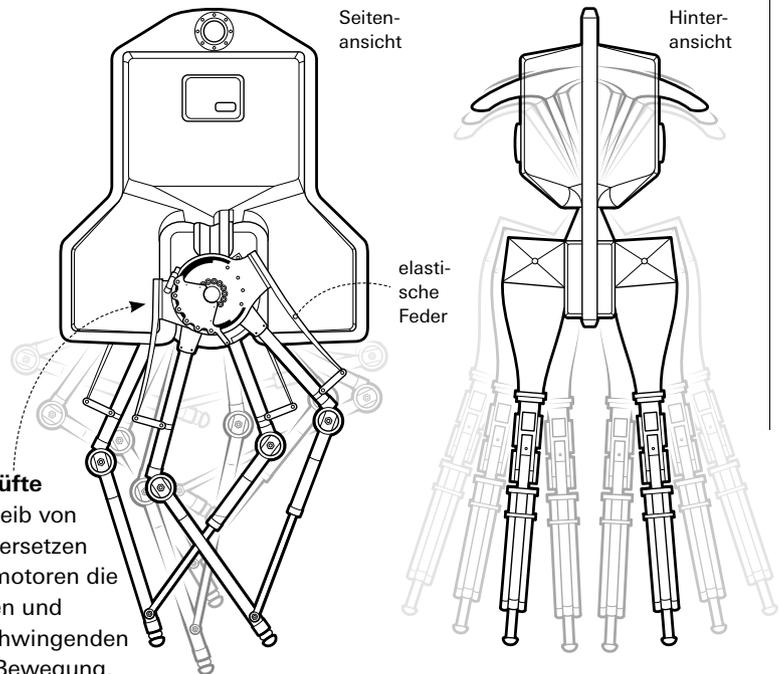
Running Man ermittelt seine räumliche Position mit Hilfe eines Trägheitsmessgeräts im Becken und einer Software, die tausendmal pro Sekunde Balance und Richtung berechnet, viel präziser als jeder Mensch. Doch was der Maschine fehlt, sind leichte, flexible Gliedmaßen, die Fehler oder Störungen flink korrigieren. Außerdem können Menschen nach einem Sturz wieder aufstehen, statt zu zerbrechen. »Der Roboter landet auf großen, schweren Metallgliedern«, sagt Pratt. »Es ist schwierig, ihn so zu bauen, dass er einen Sturz übersteht.«

Das Problem beim Bau zweibeiniger Roboter ist gar nicht die Programmierung, meint Pratt, sondern die Hardware: »Wenn wir den Roboter mit etwas Ähnlichem wie Muskeln

## Der Springstockansatz

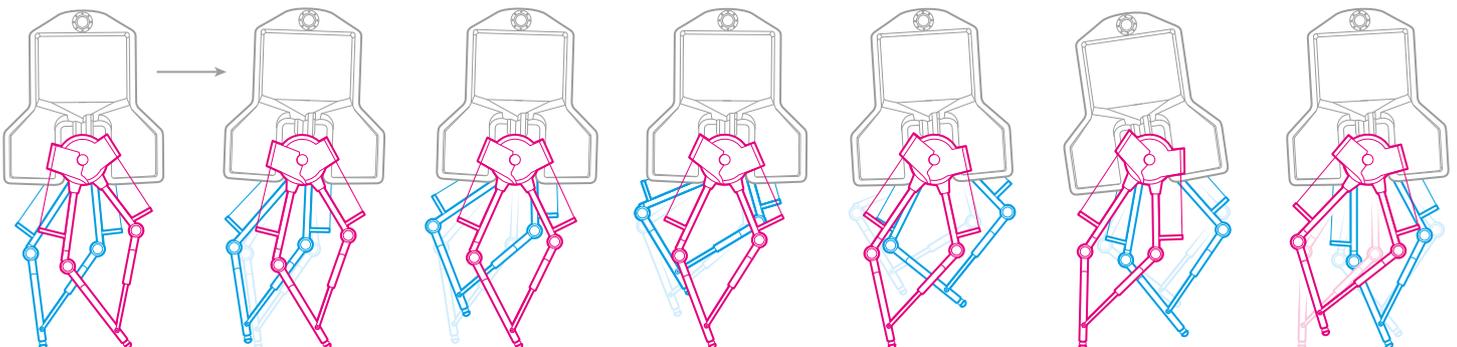
Jonathan Hurst und seine Studenten an der Oregon State University in Corvallis bauten ATRIAS – abgekürzt für »Assume The Robot Is A Sphere« –, um die Grundlagen der zweibeinigen Fortbewegung von Menschen und Robotern zu erforschen. Der Roboter verhält sich gemäß dem Feder-Masse-Modell, bei dem das gesamte Körpergewicht auf einem masselosen elastischen Beim balanciert. ATRIAS ist vergleichsweise agil: Er kann mehr als zwei Meter pro Sekunde schnell laufen und fängt sich leicht wieder, wenn er unterwegs geschubst wird.

**Starke Hüfte**  
Im Unterleib von ATRIAS versetzen Antriebsmotoren die gefederten und passiv schwingenden Beine in Bewegung.



### Elastischer Gang

Die Federn in den Beinen von ATRIAS speichern einen Teil der bei jedem Schritt umgesetzten Energie und treiben damit den nächsten Schritt an. Genauso funktionieren auch die elastischen Gelenke menschlicher Beine.



BROWN BIRD DESIGN, NACH HEREID, A. ET AL.: DYNAMIC MULTI-DOMAIN BIPEDAL WALKING WITH ATRIAS THROUGH SLIP-BASED HUMAN-INSPIRED CONTROL. IN: PROCEEDINGS OF THE 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYBRID SYSTEMS: COMPUTATION AND CONTROL, APRIL 2014, FIG. 9

bauen könnten – mit einem leichten, Energie sparenden Antrieb, der sich in einem Moment als kräftiger Motor und im nächsten Augenblick als elastische Feder verhält –, dann wären wir viel weiter.«

### Ein Roboter nach dem Feder-Masse-Modell tänzelt selbstsicher dahin

Hursts Roboter ATRIAS ist blind und dumm. Er hat nicht einmal einen Kopf, sondern nur eine Metallstange, an der Hurst und seine Studenten den Roboter durch die Graf Hall der Oregon State University führen wie ein kopfloses mechanisches Huhn. Doch trotz seiner scheinbaren Primitivität beherrscht ATRIAS ein überraschend menschenähnliches Kunststück, das ihm kein Konkurrent beim DARPA-Wettbewerb nachmachen konnte: Er steigt über ein unerwartetes Hindernis und geht unbeirrt weiter. Verglichen mit dem schwerfälligen Stampfen der meisten Gehroboter tänzelt ATRIAS nur so dahin.

»Dieser Roboter dient nur einem Zweck«, erklärt Hurst: »der wissenschaftlichen Erforschung des Gehens.« ATRIAS wird also nie in ein Katastrophengebiet stellen. Der Name ist ein Akronym für »Assume the robot is a sphere«, was im Grunde das Prinzip »so einfach wie möglich« umschreibt. Die Maschine beruht auf einer fast 30 Jahre alten Theorie, dem so genannten Feder-Masse-Modell. Nach diesem Ansatz lassen sich alle Variablen zum Beschreiben eines Zweibeiners aus Knochen, Muskeln und Sehnen auf nur zwei Elemente reduzieren: die Körpermasse, die über einem einzigen Punkt an einem praktisch masselosen, gefederten Bein befestigt ist.

Das Feder-Masse-Modell ist nicht viel mehr als ein computergesteuerter Springstock mit einem Gewicht am oberen Ende. Doch es hat seit Jahrzehnten der Erforschung gehender Roboter gedient, vor allem am MIT Leg Lab, dessen Gründer und Leiter Marc Raibert dort um 1990 bahnbrechende Studien hüpfender und laufender Maschinen durchführte, bis er in die Privatwirtschaft wechselte und Boston Dynamics gründete. Auch Hurst und Pratt arbeiteten am Leg Lab, bevor sie ihre eigenen Labors aufbauten.

Das Feder-Masse-Modell liefert eine wichtige Grundlage des Gehens, so genannte dynamische Stabilität. Ein dynamisch stabiler Gehroboter hält das Gleichgewicht genau wie ein Mensch, indem er sich bei jedem Schritt vor dem Fallen bewahrt. Wenn eine Störung oder ein Fehler sein Schreiten unterbricht und er seinen Schwerpunkt nicht rechtzeitig durch einen Schrittwechsel zu stützen vermag, fällt er hin. »Der Schwerpunkt eines Menschen liegt rund ein Meter über dem Boden«, sagt Pratt, »also muss er in weniger als einer Drittelsekunde das Bein in Position bringen, um einen Sturz zu vermeiden.«

Die statische Stabilität geht hingegen ganz anders vor: Statt einen Zustand kontrollierten Fallens aufrechtzuerhalten, behandelt sie das Gehen als eine Art Störung des Stillstehens. Richtung und Impuls jedes Schritts müssen von vornherein so präzise kalkuliert werden, dass der Schwerpunkt des Roboters jederzeit im Gleichgewicht bleibt. Die ersten zweibeinigen Humanoiden verwendeten das statisch stabile Schreiten, damit ihre starren Glieder sich leichter steuern ließen und sie – zumindest theoretisch – jederzeit



Doug Stephen (links) und Jerry Pratt sind die Entwickler von Running Man.

stillstehen konnten, ohne umzufallen. Moderne Roboter wie die Teilnehmer am DRC-Wettkampf verwenden eine Version dieses Ansatzes namens quasistatische Stabilität; sie erfordert plattfüßige Schritte, um das Gleichgewicht zu halten.

Ein quasistatischer Zweibeiner braucht viele energieaufwändige Antriebselemente und große Rechenleistung, um seinen knieweichen und doch steifen Gang zu steuern; trotzdem bleibt er extrem störanfällig. Dagegen überlässt ein dynamisch stabiler Zweibeiner, der wie ATRIAS auf dem Feder-Masse-Modell beruht, die meiste Arbeit den natürlichen Wechselwirkungen zwischen seinem Bein und dem Gelände. »Auf unebenem Terrain setzt man den Fuß einfach auf«, sagt Pratt, »und er passt sich automatisch der Unterlage an.«

### ATRIAS zeigt »tierähnliches Verhalten«

In Kombination mit starken Hüftmotoren und passiv schwingenden Beinen ohne eigenen Antrieb erzeugt das Feder-Masse-Modell einen Energie sparenden und erstaunlich sicheren Gang. Hurst spricht von »tierähnlichem Verhalten«. Tatsächlich ähnelt ein Bewegungsdiagramm von ATRIAS dem von Menschen und Laufvögeln. Daraus schließt Hurst, dass die Maschine, obwohl ihre Beine gar nichts mit denen von Hühnern oder Menschen gemein haben, gewisse Prinzipien der natürlichen Fortbewegung nutzt.

Dass Roboter Hubo seinem Erbauer Jun Ho Oh beim DARPA-Wettbewerb den ersten Preis bescherte, war kein Zufallstreffer. In Ohs HuboLab auf dem KAIST-Campus in Daejeon (Südkorea) hängen überall Humanoide, die Oh seit 15 Jahren zum Laufen zu bringen versucht.



**Doug Stephen (links) und John Carff bedienen zwei Steuerungskonsolen im IHMC-Labor. Carff lenkt Running Man, während Stephen die Bewegungsdaten auf mehreren Monitoren überprüft.**

Die ursprüngliche Hubo-Maschine war eine kleinwüchsige ASIMO-Kopie, die Oh 2004 mittels Resten von Forschungsgeldern seiner Kollegen zusammenbastelte, nachdem ihm die koreanische Regierung die Förderung verweigert hatte. Erst als er zeigen konnte, dass sein Gerät im Prinzip funktionierte, erhielt er Unterstützung für eine größere Version. Und das eigens für das DARPA-Katastrophenszenario konstruierte Gerät siegte nicht mit Grips oder Kraft, sondern weil es seine menschenähnliche Gestalt in überraschender Weise verwandeln konnte.

Trotz der Berühmtheit, die Hubos Sieg seinem Erbauer beschert hat, hält Oh nicht allzu viel von dessen Gehfähigkeit. Beim Üben war der Roboter immer wieder umgefallen, und um zu gewinnen, ließ ihn Oh möglichst wenig auf zwei Beinen gehen. »Selbst wenn das Gehen im Labor zu 99 Prozent funktioniert, ist das Problem das eine Prozent im Gelände«, meint Oh.

### Besser auf Knien und Rädern

Ursprünglich sollte Hubo wie Running Man aufrecht durch den DRC-Kurs spazieren. Doch schließlich ließ sich Oh durch unbefriedigende Testläufe überzeugen, lieber auf »multimodale Mobilität« zu setzen, mit anderen Worten: Jedes Mittel war ihm recht.

Auf ebenem Terrain kniet sein Roboter nieder und fährt auf Rädern umher, die an Knien und Füßen befestigt sind. Außerdem kann Hubo seinen Oberkörper frei drehen. Angesichts des schuttgefüllten Flurs der DRC-Prüfstrecke fiel Hubo auf die Knie, drehte den Oberkörper um 180 Grad und benutzte die flachen Fußsohlen, die nun nach vorn wiesen, als Rammbock, statt den Schutt umständlich aufrecht per Hand aus dem Weg zu räumen – und dabei das Gleichgewicht zu riskieren. »Wenn Gehen immer hundertprozentig perfekt wäre«, meint Oh, »dann brauchten wir keine multimodale Mobilität.«

Im Februar 2016 veröffentlichte Boston Dynamics ein Video seines neuen humanoiden Roboters, der fast alles kann, woran die Maschinen beim DRC-Wettbewerb gescheitert waren. Das neue Modell ist eine umgebaute Version des Atlas-Geräts, das mehrere DRC-Teams verwendet hatten. Wie das Video zeigt, kann der Roboter zu einer Tür gehen, sie öffnen und flink wie ein Mensch hindurchgehen; er schreitet eine Böschung hinunter und hält selbst auf rutschigem Schneematsch das Gleichgewicht; er hockt sich nieder und steht sicher wieder auf, während er ein 5-Kilo-Gewicht hält. Er fällt sogar aufs Gesicht, ohne Schaden zu nehmen, kommt allein auf die Füße und richtet sich gerade auf.

Das Video sorgte unter Robotikforschern für Furore. Pratt lobte die »phänomenale« Beweglichkeit des Prototyps, insbesondere »die Art, wie er sich ganz tief niederhocken kann«. Und fügte bewundernd hinzu: »Das kann nicht einmal ich.« Dennoch hält niemand das Problem des zweibeinigen Gehens damit für wirklich gelöst; außerdem weigert sich die Herstellerfirma Boston Dynamics, die Details dazu zu veröffentlichen.

Noch bleiben viele Fragen unbeantwortet: Wie können mechanische Elemente zugleich kräftigen Antrieb erzeugen und passive Dynamik nutzen? Wie kann ein Roboter mit denselben Steuerungsalgorithmen vorsichtig eine Treppe hinaufsteigen und zügig einen Geröllhaufen erklimmen? Hurst arbeitet inzwischen an einem Nachfolger von ATRIAS, der in Simulationen bereits laufen, gehen, sich orientieren und vom Boden aufrichten kann. Ames möchte DURUS bis 2017 vom Laborlaufband befreien und über den Campus des Georgia Institute of Technology spazieren lassen. Beide Forscher nehmen am Valkyrie-Projekt der US-Weltraumbehörde NASA teil, mit dem Ziel, dass humanoide Roboter Astronauten zum Mars begleiten sollen. Die Entwicklung zweibeiniger Maschinen steht erst am Anfang. Aber sie steuert wohl auf eine viel versprechende Zukunft zu. ◀

### QUELLEN

**Ames, A. D. et al.:** First Steps toward Formal Controller Synthesis for Bipedal Robots. In: Proceedings of the 18th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control, S. 209–218, 2015

**Pratt, J. et al.:** Capture Point: A Step toward Humanoid Push Recovery. Vortrag bei der 6. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Genua 2006; online unter [www.ihmc.us/users/jpratt/publications/2006\\_Humanoids\\_CapturePoint\\_Pratt.pdf](http://www.ihmc.us/users/jpratt/publications/2006_Humanoids_CapturePoint_Pratt.pdf)

**Vejdani, H. R. et al.:** Bio-Inspired Swing Leg Control for Spring-Mass Robots Running on Ground with Unexpected Height Disturbance. In: Bioinspiration & Biomimetics 8, 046006, 2013

### LITERATURTIPP

**Mombaur, K.:** Die Kunst, auf zwei Beinen zu laufen. In: Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 84  
*Die Autorin entwickelt mathematische Modelle für die Fortbewegung von Menschen und Maschinen.*

### WEBLINKS

[www.youtube.com/watch?v=g0TaYhjpOfo](http://www.youtube.com/watch?v=g0TaYhjpOfo)  
*Stürzende Roboter beim DARPA-Wettbewerb 2015*

[www.youtube.com/watch?v=2NVFymqa8qY](http://www.youtube.com/watch?v=2NVFymqa8qY)  
*Jonathan Hursts Seminar »Designing Robots to Walk and Run«*



SWINY KUJAWA & SUSANNE SCHULTE (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/BILDER.HTML) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSE/SBY/SA/0.0/LEGALCODE)

# FREISTETTERS FORMELWELT IM GLEICHGEWICHT DER KRÄFTE

**Die Funktion von Lagrange ist eine der wenigen Formeln, die einerseits kurz und simpel, aber andererseits vielfältig und für hochkomplexe Systeme anwendbar sind.**

**Florian Freistetter** ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

► [spektrum.de/artikel/1420980](http://spektrum.de/artikel/1420980)

**M**eine erste richtige wissenschaftliche Arbeit beschäftigte sich mit der Bewegung der Trojaner-Asteroiden des Jupiters. Sie betraf kein großes und brennendes Problem der Astronomie, war aber ein guter Anfang für mich, um während meines Diplomstudiums die Grundlagen des wissenschaftlichen Arbeitens zu lernen. Und es war mein erster Kontakt mit Joseph-Louis Lagrange (1736–1813). Der in Turin geborene Mathematiker ist in der Öffentlichkeit längst nicht so bekannt, wie er es angesichts seiner Leistungen eigentlich sein sollte. Die von ihm entwickelte »analytische Mechanik« ist heute noch die Grundlage der klassischen theoretischen Physik, und auch Relativitätstheorie und Quantenmechanik kommen ohne den »Lagrange-Formalismus« nicht aus.

Diese Weiterentwicklung von Newtons Mechanik hat mich vor allem durch ihre Eleganz beeindruckt. Will man ein dynamisches System untersuchen wie eben zum Beispiel die Bewegung von Asteroiden, dann muss man dazu nur eine einzige Funktion kennen: die Lagrange-Funktion, die noch dazu äußerst simpel ist:

$$L = T - V$$

T steht dabei für die kinetische Energie des Systems und V für die potenzielle Energie. Im Detail kann es natürlich schon ein wenig kompliziert werden, die jeweiligen Ausdrücke für die Energien zu finden und in Form der Funktion zusammenzufassen. Aber hat man das erst einmal geschafft, kann man direkt aus dieser Funktion jene mathematische Gleichung finden, mit der sich die Dynamik des Systems beschreiben lässt.

In meinem Fall war das die Bewegung der Asteroiden unter dem Gravitationseinfluss von Jupiter und Sonne. Wie in jedem System aus zwei Himmelskörpern kann man hier fünf Orte im Weltall finden, an denen sich die auf kleine Objekte wie Asteroiden wirkenden Kräfte aufheben. Diese »Lagrange-Punkte« sind daher so etwas wie Sammelplätze für umherfliegende Felsbrocken.

Tatsächlich besitzt Jupiter eine große Anzahl so genannter »Trojaner-Asteroiden«, die zwei seiner fünf Lagrange-Punkte bevölkern. Wir Menschen nutzen übrigens die Lagrange-Punkte der Erde für die Raumfahrt und »parken« dort etwa Satelliten und Weltraumteleskope.

Der Lagrange-Formalismus kann aber noch viel mehr, als nur die Bewegung von Asteroiden und Raumfahrzeugen zu beschreiben. Mit der simplen Formel lässt sich so gut wie alles mathematisch analysieren, was in der modernen Physik interessant ist. Das Standardmodell der Teilchenphysik beispielsweise, das fast die komplette subatomare Welt zusammenfasst, wird ebenfalls durch eine Lagrange-Funktion definiert. Die sieht zugegebenermaßen etwas komplizierter aus als die Formel, mit der ich als junger Student gearbeitet habe, die zu Grunde liegenden Mechanismen sind jedoch dieselben.

**G**enauso gut lässt sich die Mechanik von Lagrange auf Albert Einsteins spezielle und allgemeine Relativitätstheorie anwenden – und überhaupt überall dort, wo man wissen will, wie sich ein System dynamisch verändert. Die Lagrange-Funktion ist in der modernen Physik von so fundamentaler Bedeutung, dass man meistens gar nicht mehr extra dazu sagen muss, dass es sich um eine Funktion handelt, sondern sie im Englischen einfach nur »Lagrangian« nennt.

Mir hat sie während meines Studiums und meiner Arbeit als Himmelsmechaniker mehr als nur einmal dabei geholfen, das Verhalten von Planeten, Kometen und Asteroiden zu verstehen. Lagrange selbst ermöglichte seine Leistungen immerhin, die Schreckensherrschaft im Gefolge der Französischen Revolution zu überstehen. Als ab 1793 alle Ausländer aus Frankreich verbannt wurden, erhielt er eine Ausnahmegenehmigung und durfte bleiben. Heute liegt Lagrange im Pariser Panthéon begraben, und er gehört zu jenen 72 Personen, deren Namen wegen ihrer wissenschaftlichen und technischen Leistungen auf dem Eiffelturm eingraviert sind.

# REZENSIONEN

---



ISTOCK / MAZEUS



Fritz Schade, Harald Jockusch  
**BETÖRENDE,  
 BERAUSCHEND, TÖDLICH**  
 Giftpflanzen in unserer Umgebung  
 Springer Spektrum,  
 Berlin, Heidelberg 2016  
 207 S., € 29,99

Das Tränende Herz  
 (*Lamprocapnos spectabilis*)  
 ist als Zierpflanze beliebt,  
 allerdings auch giftig.

ISTOCK/MARZELIS

## BOTANIK STREIFZUG DURCH DIE WELT DER GIFTIGEN PFLANZEN

**Aus einem Garten, in dem Kinder spielen, muss man nicht zwangsläufig alle toxischen Gewächse entfernen.**

Der ehemalige Biologieprofessor Harald Jockusch und der Künstler Fritz Schade porträtieren in Text und Bild 51 Giftpflanzen, auf die man in deutschen Gärten, Parks und Wäldern stoßen kann. Schades naturnahe, übersichtliche Zeichnungen füllen jeweils eine Buchseite und helfen dabei, sich typische Merkmale der Gewächse einzuprägen, so dass man sie in der Natur ohne große Schwierigkeiten wiedererkennen kann. Oft sind sowohl die blühende als auch die Früchte tragende Variante dargestellt.

Jockusch beschreibt Vergiftungssymptome, geht beispielhaft auf Verwechslungsgefahren ein und erklärt, welche Pflanzen man aus einem Garten verbannen sollte, in dem Kinder spielen. Dabei empfiehlt er keineswegs, auf alle giftigen Gewächse zu verzichten. Vielmehr erörtert er, welche Blüten, Blätter und Beeren für Kinder besonders attraktiv sind und somit häufig von diesen verschluckt werden. Bei beliebten Pflanzen wie dem hochgiftigen Mohngewächs Tränendes Herz (*Lamprocapnos spectabilis*) rät Jockusch lediglich dazu, darauf zu achten, dass die

Kleinen die Blüten nicht in den Mund nehmen – der giftigste Teil, die Wurzel, sei für sehr junge Entdecker ohnehin unzugänglich. Hier spricht der Autor aus eigener Erfahrung als Großvater und Hobbygärtner.

Trotz dieser Empfehlungen ist das Buch kein klassischer Ratgeber. Oft fehlen beispielsweise Angaben zu schädlichen Dosierungen sowie Hinweise auf mögliche Notfallmaßnahmen. Stattdessen gibt Jockusch diverse Hintergrundinformationen, von der Namensherkunft über historische Anekdoten bis hin zu botanischen Spitzfindigkeiten. Er ordnet alle Gewächse der jeweiligen Pflanzenfamilie zu, zeigt Zusammenhänge zu anderen Angehörigen dieser Familie und geht manchmal auch auf die chemische Struktur der Gifte und ihre physiologische Wirkung ein.

In erster Linie handelt es sich um ein Liebhaberbuch für Gartenfreunde. Deutlich merkt man, wie begeistert der frühere Biologieprofessor von vielen Pflanzen ist – etwa, wenn er auf beinahe poetische Weise ihre Schönheit rühmt und von der Pracht in seinem eigenen Garten schwärmt. Leider sind Text und Bilder ungünstig gesetzt: Stets muss man zwischen der Beschreibung einer Pflanze und ihrer Abbildung hin- und herblättern. Außerdem bleiben zahlreiche Seiten leer, was unschön wirkt. Gerade weil der Band mit seinen künstlerischen Zeichnungen auch ästhetische Ansprüche erfüllen möchte, ist das ärgerlich.

Elena Bernard ist Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.



Heather Couper, Nigel Henbest  
**SPACE**  
 Eine Entdeckungsgeschichte  
 des Weltalls  
 Aus dem Englischen  
 von Daniel Beskos  
 mairisch, Hamburg 2016  
 296 S., € 18,90

## ASTRONOMIE BILDERLOSE WOHLTAT

**Von der Astrobiologie  
 bis zum Zwergstern  
 führt dieses optisch  
 nüchterne Buch in die  
 Astronomie ein.**

Ein populärwissenschaftliches Astronomiebuch mit fast 300 Seiten ohne jede Abbildung – geht das? Da muss der Text schon außergewöhnlich sein: kompetent, inspirierend und unterhaltsam zugleich. Genau dieses Kunststück gelingt den britischen Autoren Heather Couper und Nigel Henbest in ihrem neuesten Buch »Space«. Die Astronomen, Wissenschaftsautoren und Fernsehmoderatoren sind keine Unbekannten und für ihre langjährige Arbeit bereits mehrfach gewürdigt worden – beispielsweise kreisen die Asteroiden »3922 Heather« und »3795 Nigel« um die Sonne.

Im Original erschien das Buch 2015 unter dem Titel »The Secret Life of Space«. Die deutsche Ausgabe macht einen guten Eindruck. Der kompakte Band passt in jede Handtasche und ist der ideale Reisebegleiter, in dem man prima schmökern kann. Geboten werden 18 in sich

abgeschlossene Kapitel – eine Mischung aus Geschichte und Fachwissen auf dem neuesten Stand. Die prägnanten Darstellungen sind überdies erstaunlich vollständig. Die Autoren kennen sich in der Szene gut aus, lassen Kollegen zu Wort kommen und glänzen mit so mancher Anekdote. Man kann die Kapitel zwar unabhängig voneinander lesen, es empfiehlt sich aber, dem roten Faden zu folgen, der in der interessanten Einleitung »Auf den Schultern von Riesen« vorgestellt wird. Die Anordnung orientiert sich mehr oder weniger an der historischen Entwicklung der Astronomie.

Die ersten beiden Kapitel behandeln Stonehenge und den bei Antikythera im Meer gefundenen »Computer« aus der griechischen Antike – jenes mechanische Wunderwerk, das seiner Zeit um ein Jahrtausend voraus war. Es zeigt die Bewegungen im Planetensystem sehr präzise und beweist, dass die alten

Griechen nicht nur Theoretiker waren.

Weiterhin widmen sich die Autoren der Erfindung des Kalenders und dem heliozentrischen Weltbild, spannen einen Bogen von den ersten holländischen Fernrohren bis zum Hubble-Weltraumteleskop und behandeln die Entdeckung von Uranus, Neptun und Pluto. Sonne und Sterne, Schwarze Löcher, Urknall und Dunkle Materie lassen sie ebenso wenig aus wie Kometen und Asteroiden – Letztere vor allem im Hinblick auf vergangene und zukünftige Katastrophen. Das Thema »Leben« bildet den Abschluss. Hier geht es um den Mars, um Exoplaneten und die Suche nach Außerirdischen. Einen Anhang mit Register beziehungsweise Literaturangaben sucht man leider vergebens.

»Space« ist eine runde Sache mit vielen Höhepunkten, getragen von einer überzeugenden Sprache, die zuweilen lyrisch klingt. So

## ZOOLOGIE BESSER ALS IHR RUF

**Eine TV-Dokumentation kämpft gegen  
 das schlechte Image der Haie an.**

Die Macher der vorliegenden Doku haben auf sieben Weltmeeren rund 2600 Filmstunden über Haie gesammelt. Sie tauchten in –2 Grad Celsius kaltes Wasser hinab zu Grönlandhaien; verfolgten spektakuläre Angriffe von Weißen Haien auf Robben; machten die Biofluoreszenz von Schwellhaien sichtbar. Vier Folgen von je 50 Minuten sortieren die enorme Materialfülle. Zu sehen sind mehr als 30 von insgesamt rund 500 Arten der Raubfische.



BBC Earth  
**DIE WELT DER HAIE**  
 Laufzeit ca. 200 Min.  
 Polyband, München 2016  
**DVDs € 16,99,**  
**Blu-Ray € 18,99**

Beeindruckende Bilder, teils in Zeitlupe, dokumentieren hervorschnellende Kiefer von zuschnappenden Koboldhaien oder saugende Mäuler von Walhaien, die Plankton und kleine Fische verschlucken.

Besonders überraschend sind die Einblicke in das (Sozial-)Verhalten und die Fortpflanzung der Tiere. Dazu gehört die Körpersprache Weißer Haie ebenso wie die Überlebensstrategie eines gestrandeten Epaulettenhais. Sensationelle Bilder zeigen Paarungstänze bei Bogenstirnhammerhaien. Am Schluss stehen die Erkenntnis, dass die Raubfische ihren schlechten Ruf nicht verdienen, sowie der Appell, ihnen respektvoller zu begegnen. »Die Welt der Haie« zieht alle Interessierten in den Bann. Kathrin Wittig

heißt es über die ersten Galaxien im frühen Kosmos: »Sie waren chaotisch, zerlumpt und ungeordnet, voller sengend heißer blauer Sterne, die sich gnadenlos gegenseitig blendeten.« Leider mangelte es beim Übersetzen und Korrekturlesen offenbar an Sorgfalt. So stößt man auf Begriffe wie »Fred Doyle« oder »Dänemakr«. Herschel, so erfahren wir, habe Uranus mit einem 2,13-Meter-Spiegel beobach-

tet – gemeint ist natürlich nicht der Durchmesser, sondern die Brennweite. Das optische Paar Mizar/Alkor im Großen Bären stellt der Band fälschlich als »Doppelsternsystem« vor. Und auf Seite 147 liest man: »Der Weiße Zwerg nimmt immer weiter ab, da er die letzten Reste seiner Hitze ans All abgibt.« Weiße Zwerge verglimmen im Lauf der Zeit zwar, ihre Masse und ihr Radius ändern sich dabei

aber kaum. Apropos Masse: Sie wird in dem Buch oft mit Gewicht verwechselt. Von solchen Patzern enthält das Buch noch mehr.

Diese kleinen Schwächen können das positive Fazit aber kaum trüben: Couper und Henbest haben ein großartiges Buch geschrieben. Es liefert ein prägnantes Bild der Astronomie und ihrer Geschichte. Wer mit dem Thema bisher kaum in Berührung gekommen ist,

wird hier wahrscheinlich Feuer fangen. Aber auch Profis lernen Neues, insbesondere wegen der informativen Hintergrundgeschichten. »Space« ist ein wohlthuendes Element im überquellenden Angebot populärwissenschaftlicher Bücher. Bilder habe ich zu keinem Zeitpunkt vermisst.

Wolfgang Steinicke ist Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e. V.

ANZEIGE

# Wissen, das gut für Sie ist!



Entdecken Sie die Vielfalt von ZEIT WISSEN! Erfahren Sie in jeder Ausgabe Neues aus Gesundheit, Psychologie, Forschung und Gesellschaft: faszinierend, lebendig und alltagsnah.

**Fordern Sie jetzt Ihre Gratisausgabe an!**

Jetzt gratis testen!

Einfach Code **ZW944SPEK** einlösen unter:

 [www.zeit.de/zw-gutschein](http://www.zeit.de/zw-gutschein)

ZEIT WISSEN

## MEDIZIN STRASSE INS VERHÄNGNIS

**Bösartige Tumorerkrankungen brechen nicht aus heiterem Himmel aus. Tatsächlich grenzt es an ein Wunder, dass sie überhaupt entstehen.**

► Krebs gehört zu den gefürchtetsten Erkrankungen. Verständlich, dass sich kaum jemand gern damit befasst. Doch früher oder später werden wir fast alle dazu gezwungen, denn jeder dritte Europäer bekommt irgendwann Krebs. Wir müssen deshalb damit rechnen, dass es eines Tages entweder uns selbst trifft – oder einen nahen Angehörigen.

Was ist Krebs? Wie entsteht er, und wie kann man ihn behandeln? Darauf gibt dieses Buch fundierte und verständliche Antworten. Die Autorin Anja Klußmeier ist promovierte Humanbiologin und seit Jahren in der Krebsforschung tätig, unter anderem an der Berliner Charité. Die Idee zu diesem Werk entstand während einer Infoveranstaltung für Patienten.

Publikationen über Krebs sind zwar Legion, zudem enthält Klußmeiers Buch kaum Neues. Trotzdem lohnt es sich, den Band zu lesen. Denn er zeichnet den kompletten Weg nach, den eine



gesunde Körperzelle nehmen muss, um zur Krebszelle zu werden. Heraus kommt ein straffer Abriss der Onkologie, den auch Laien nachvollziehen können – ein solides Fundament, um das Wesen von Tumorerkrankungen zu verstehen. Als kurz gefasstes Kompendium kann das Werk sogar Lesern nutzen, die umfangreiche Vorkenntnisse besitzen.

Klußmeier beginnt mit Aufbau, Funktionen und Teilungszyklus der Zelle. Dabei führt sie in Zytologie, Biochemie und Genetik ein. Sie erläutert die verschiedenen Arten der DNA-Mutationen samt deren Auswirkungen und beschreibt, welche Karzinogene es gibt und warum sie Mutationen verursachen.

Der folgende Teil ist besonders interessant. Hier erklärt Klußmeier die Transformation, also die Entwicklung einer normalen Körperzelle zur Krebszelle. Dabei wird klar: Krebs entsteht nicht aus heiterem Himmel. Eine Zelle muss sich acht Fähigkeiten aneignen, um einen bösartigen Tumor hervorzu- bringen. Sie muss ihre autarke Versorgung mit Wachstumsfaktoren sicherstellen, resistent werden gegenüber Wachstumshem- mern, den programmierten Zelltod vermeiden, das Vermögen zur unbegrenzten Teilung erlangen, sprossende Blutgefäße anlocken, ihren Stoffwechsel drastisch verändern, die Immunreaktion des Körpers unterdrücken und ins umgebende Gewebe eindringen sowie Metastasen (Tochertumoren) absondern.

Damit nicht genug. Die transformierende Zelle muss bei alldem auch noch diverse Sicherheitsvorkehrungen unterlaufen, mit denen der Körper die Tumorentstehung normalerweise verhindert.

Das ist fast unmöglich, und die allermeisten Zellen, die diesen Weg einschlagen, scheitern. Doch unser Körper enthält rund zehn Billionen Zellen (ohne Mikrobiom). Sie müssen sich ständig vervielfältigen, um die Abnutzung des Organismus zu kompensieren – in dem einen Gewebe mehr, im anderen weniger. Während des Lebens kommen so Aberbilliarden Zellteilungen zusammen. Obwohl es beinahe ausgeschlossen ist, dass eine Zelle bei einer solchen Spaltung ausge- rechnet jene Merkmale erwirbt, die sie in Richtung Tumor verändern: Wegen

der schieren Menge der Teilungen passiert es irgendwann. Mit jeder Zellteilung, die in unserem Körper abläuft, wird das Verhängnis ein klein wenig wahrscheinlicher.

Aus diesem Grund trifft Krebs vor allem Ältere. Auf einen unter 15-Jährigen, der eine entsprechende Diagnose erhält, kommen 200 bis 300 über 80-Jährige. Für unsere steinzeitlichen Vorfahren war Krebs wohl kaum ein Thema: Sie erlebten ihn nicht. Sie verhungerten, erfroren, starben an Erschöpfung und an Verletzungen, fielen Raubtieren und Infektionen zum Opfer, wurden von Feinden erschlagen, bevor sich ihre Tumorerkrankungen manifestierten.

Klußmeier legt dar, welche Einflüsse das Krebsrisiko erhöhen und wie sie das tun. Dabei geht sie auf Proteinkaskaden und Signalwege, Rezeptoren und Liganden, Onkogene und Tumorsuppressoren und vieles mehr ein. Auch erklärt sie, warum die Quantifizierung von Risikofaktoren so schwierig ist. Zwischen dem Kontakt mit einem Karzinogen und dem Ausbruch der Erkrankung liegen meist Jahre bis Jahrzehnte. In dieser Zeit lebt der Patient weiter, altert, kommt mit anderen Karzinogenen in Berührung. Wenn die Krankheit schließlich diagnostiziert wird, ist es unmöglich zu sagen, was sie verursacht hat. Bei einem einzelnen Krebspatienten lässt sich kein Kausalzusammenhang nachweisen zwischen einer bestimmten Einwirkung und seinem Leiden.

Um die Effekte von Karzi- nogenen am lebenden Menschen zu untersuchen,



**Mehr Wissen auf  
Spektrum.de**

Mehr Rezensionen finden Sie unter  
[spektrum.de/rezensionen](https://www.spektrum.de/rezensionen)

muss man riesige Studien auflegen, welche die Lebensumstände und Erkrankungen tausender Menschen über viele Jahre hinweg dokumentieren. Aus den Daten ermitteln Statistiker anschließend Gefährdungspotenziale, wobei sie den Einfluss bekannter Größen herausrechnen. Das ist enorm kompliziert, aufwändig und teuer. Und doch ist es möglich. Ein Beispiel: Millionen dokumentierter Fälle belegen, dass neun von zehn Lungenkrebskrankungen bei Männern auf die Einwirkung von Zigarettenrauch zurückgehen.

Im letzten Teil des Buchs befasst sich Klußmeier mit Krebstherapien. Hier bleibt sie sehr knapp, behandelt

dennoch wichtige Wirkstoffe und deren Funktionsweise. Krebsimmuntherapien, derzeit wohl das verheißungsvollste Feld der Onkologie, streift sie nur oberflächlich.

Was in dem Buch steht, kann man zwar auch im Internet zusammensuchen. Das dauert aber, und man muss die seriösen Quellen kennen, um nicht einem der zahlreichen Quacksalber auf den Leim zu gehen. »Transformation – eine Zelle wird zu Krebs« liefert gebündeltes, etabliertes, gut zusammengestelltes Wissen. Grafisch hat das Werk leider nur minimalistische Zeichnungen zu bieten.

Frank Schubert ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## PHILOSOPHIE FACETTEN DER ZEIT

**Was Physiker mit Uhren messen, erfasst nur einen Teilaspekt des ewigen Phänomens: dass nichts bleibt, wie es ist.**

Was die Zeit ist? Was soll die Frage, könnten Physiker antworten – ich schaue auf die Uhr und sage dir, wie spät es ist. Dann weißt du die Zeit.

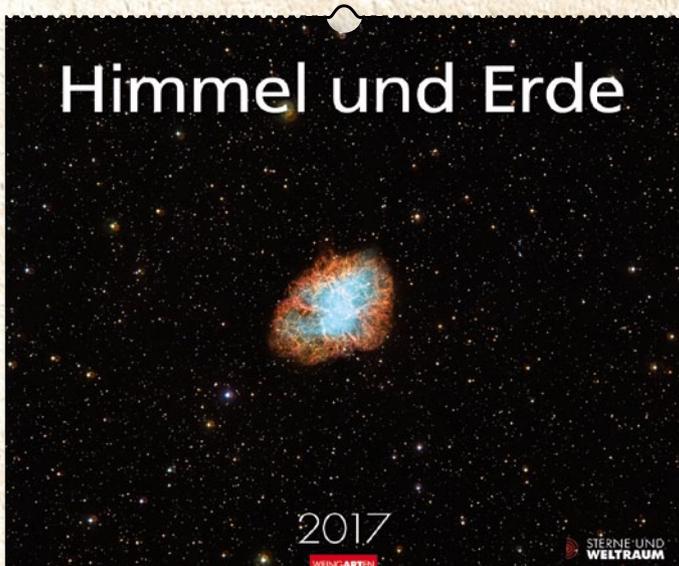
Aber so einfach wird man mit dem Problem nicht fertig. Wie Truls Wyller, Philosophieprofessor an der Universität Trondheim in Norwegen, in seinem ansprechenden kleinen Buch



Truls Wyller  
**WAS IST ZEIT?**

Ein Essay  
Aus dem Norwegischen  
von Gabriele Haefs  
Reclam, Ditzingen 2016  
137 S., € 14,95

demonstriert, hat der Zeitbegriff viele Aspekte. Wenn wir uns an frühere Phasen unseres Lebens



STERNE UND  
**WELTRAUM**

## DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2017

**Sterne und Weltraum** präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 fantastische Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich; darüber hinaus zum Teil vom Weltraumteleskop Hubble und der Raumsonde Rosetta. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2017 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.

14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

**So einfach erreichen Sie uns:**

Telefon: 06221 9126-743

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

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



MOTIVE  
VORAB ONLINE  
ANSCHAUEN!

## PHYSIK RÜHRBESENKURBEL AM AKKUSCHRAUBER

**Einfache Konstruktionen zum Nachbauen vermitteln ein besseres Gespür für Physik.**

► Physik ist unter Schülern oft als trocken und unverständlich verpönt. In diesem Buch präsentiert der Doktorand und Moderator Philip Häusser die Disziplin aus überraschender Perspektive. Unterhaltsam und ganz ohne Formeln erklärt er, wie man mit wenigen Materialien etwa einen Elektromotor baut, einen Beamer oder ein Nachtsichtgerät.

Die 20 geschilderten Versuche sind wegen der eingängigen Beschreibungen und Skizzen leicht nachvollziehbar und gliedern sich in drei Schwierigkeitsstufen von »easy« bis »anspruchsvoll«. Die jeweils relevanten physikalischen Phänomene erläutert der Autor im Anhang des Buchs.



Philip Häusser  
**PHIL'S PHYSICS**  
Geniale Erfindungen, die das Leben erleichtern  
Komplett-Media,  
Grünwald bei München 2016  
208 S., € 14,99

Außerdem kann man sich auf seiner Website sowie seinem Youtube-Kanal Unterstützung beim Basteln holen.

Häussers Anleitungen beruhen darauf, Alltagsgegenstände einmal anders anzuwenden, um so physikalische Prinzipien greifbar zu machen. Spaß am Tüfteln und der Aha-Effekt stehen dabei im Vordergrund. Dass die Versuche jedoch das Leben erleichtern, wie der Untertitel verspricht, ist etwas zu hoch gegriffen. Die Ergebnisse sind, selbst wenn sie funktionieren, nicht immer zweckmäßig. Ein Akkuschauber ohne Akku mit einem Rührbesen als Kurbel eignet sich nur eingeschränkt als Smartphone-Ladegerät – auch wenn es seinen Charme hat, dass die Konstruktion ohne Netzstrom auskommt. Anders als beim schlichten Ladekabel aus dem Elektrofachmarkt bekommt man beim Kurbeln jedoch ein

Gefühl dafür, wie effizient es ist, Bewegungs- in elektrische Energie umzuwandeln. Da wirkt Physik plötzlich gar nicht mehr abstrakt. Hanna Stern

erinnern, erfahren wir biografische Zeit. Historiker erforschen Zeugnisse früherer Menschheitsepochen – und finden in der Vergangenheit Indizien für eine Geschichte der Zeit selbst. Auch als es noch keine Uhren gab, zählten Ackerbauer und Viehzüchter die Tage und Nächte und verfolgten den Wandel der Jahreszeiten, woraus sie zyklische Zeitvorstellungen entwickelten. Erst seit präzise Geräte immer und überall Datum und Uhrzeit angeben, verschwindet die erlebte Zeit hinter der Auskunft, wie spät es ist.

Wyller interessiert vor allem die Frage: Wie hängen erlebte und gemessene Zeit zusammen? Der französische Philosoph Henri

Bergson (1859–1941) unterschied die Begriffe »temps« (Zeit als Uhrzeit) und »durée« (Dauer als Erlebniszeit). Der englische Denker John McTaggart Ellis McTaggart (1866–1925) traf eine ähnliche Unterscheidung, indem er zwei Betrachtungsweisen hervorhob: Einerseits bezeichnen wir ein Erlebnis von unserem subjektiven Standpunkt aus als vergangen, gegenwärtig oder zukünftig – andererseits klassifizieren wir Ereignisse relativ zu einem objektiven Zeitpunkt als »früher«, »gleichzeitig« oder »später«. McTaggart zog aus der vermeintlichen Unvereinbarkeit beider Sichtweisen die radikale Konsequenz, die Zeit sei eine Illusion. Ähnlich meinte

auch Albert Einstein, das Vergehen der Zeit erscheine uns nur als solches; in Wirklichkeit gebe es keinen Unterschied zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft – alles existiere einfach in der physikalischen Raumzeit.

Die Frage nach dem Doppelgesicht der Zeit erinnert an das so genannte Qualia-Problem in der Bewusstseinsforschung: Was hat das »qualitative« Erlebnis der Farbe Rot mit entsprechenden quantitativ messbaren Hirnvorgängen zu tun? Zugespitzt diskutieren Neurophilosophen diese Frage in Form eines Gedankenexperiments: Die fiktive Neurobiologin Mary lebt von Geburt an in einem fensterlosen, rein schwarz-

weißen Zimmer, wo sie das gesamte Wissen über Farbwahrnehmung nur aus Büchern kennen lernt. Wenn nun ein Fenster geöffnet wird und Mary erstmals Farben erlebt – erfährt sie dabei etwas Neues?

Wyller führt am Ende seines Essays ein ganz analoges Gedankenexperiment zum Zeitproblem ins Treffen: Ein Mann wird durch einen Schlag so verletzt, dass er sein Gedächtnis verliert, aber weiterhin logisch denken und Bücher lesen kann. Er besitzt kein Zeitbewusstsein, verschlingt aber ganze Bibliotheken über Naturforschung. Nun fragt Wyller: Was fehlt dem Mann eigentlich? Er weiß doch alles,

WILLKOMMEN AUF DER NEUEN WELT.

# MARS

DAS GLOBALE SERIEN-EVENT  
AB 13. NOVEMBER, SONNTAGS 21:00



Im TV empfangbar u.a. bei Sky, Vodafone, Unitymedia, M7 und der Deutschen Telekom.  
Alle Infos & faszinierende Facts zum Mars auf [f facebook.com/natgeotv.deutschland](https://www.facebook.com/natgeotv.deutschland)

was man über Raum, Zeit und Natur wissen kann. Er erlebt die Zeit nur nicht.

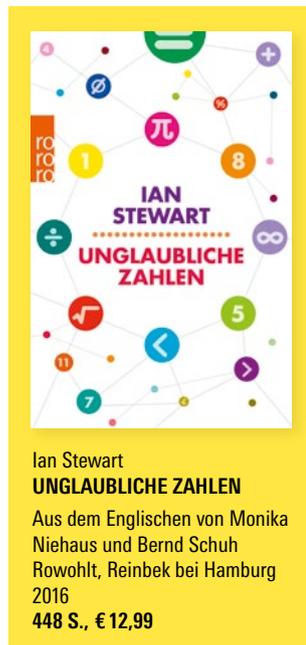
Die von Wyller schließlich skizzierte Lösung für das Qualia-Problem der Zeit empfinde ich als unverständlichen Wortsalat. Das liegt vielleicht daran, dass es sich um ein Scheinproblem handelt – wie der amerikanische Philosoph Daniel Dennett in Bezug auf das Qualia-Problem der Bewusstseinsforschung meinte. Mein höchstpersönliches Erleben von Gerüchen, Farben und dem Vergehen der Zeit bleibt genau so lange unaussprechlich, wie ich nicht mit anderen darüber kommuniziere. Doch sobald ich Worte dafür finde – ob mythisch, lyrisch, philosophisch oder naturwissenschaftlich –, ist es nicht mehr ausschließlich mein ureigenes Privaterebnis.

Michael Springer ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## MATHEMATIK SPANNENDES ZAHLEN- THEATER

**Ob reelle oder komplexe, Hoch- oder Primzahlen, Fraktale oder Logarithmen: Der Mathematiker Ian Stewart bringt sie dem Leser näher.**

Das neue Buch des Mathematikers Ian Stewart von der University of Warwick (England) ist auf den ersten Blick den Zahlen gewidmet. Es befasst sich mit kleinen und großen, negativen, irrationalen, komplexen, unendlichen Zahlen und vielen mehr.



Wenn man es genau nimmt, geht es in dem Werk aber eher um Strukturen und Muster, in deren Zusammenhang bestimmte Zahlen auftauchen. Stewart selbst formuliert es treffend: »Die Zahlen sind Schauspieler [...], und das eigentlich Wichtige ist das Schauspiel selbst.« Sein Ziel lautet, den Lesern solche spannenden Darbietungen näherzubringen.

Wenn es beispielsweise um gerade und ungerade Zahlen geht, bekommt der Leser die Aufgabe, die Summen von Quadratzahlen zu untersuchen. Schreibt man alle möglichen dieser Summen bis 100 hin, so fällt einem auf: Jede Summe, die einer Primzahl entspricht, ist um den Betrag 1 größer als ein Vielfaches von 4. Die Primzahl 29 etwa ist die Summe der Quadrate von 5 und 2 – und zugleich das Siebenfache von 4 plus 1. Diese Beobachtung verblüfft und führt einen unweigerlich an das Thema heran – so auch in den

anderen Buchabschnitten. In diesem Fall geht es um eine spezielle Variante des 2-Quadrate-Satzes des Mathematikers Pierre de Fermat (1607–1665), wonach jede Primzahl der Form  $4x + 1$  die Summe zweier Quadrate ist. Natürlich muss dies auch für große Zahlen stimmen. Finden Sie die Quadrate zur Primzahl  $4 \cdot 1000 + 1 = 4001$ ?

Stewart geht zudem auf den allgemeinen 2-Quadrate-Satz ein: »Die Zahlen ungleich null, die die Summe zweier Quadratzahlen sind, [sind] genau diejenigen, für die jeder Primfaktor der Form  $4x - 1$  in einer geraden Potenz auftritt.« Dieses Zitat macht deutlich, dass das Buch nicht immer leichte Kost ist und teilweise je nach mathematischer Vorbildung mehrfach »verdaut« werden muss. Allerdings liefert der Autor wichtiges Rüstzeug dafür immer mit. Begriffe wie »Primfaktor« (eine Primzahl, die ein Teiler einer Zahl ist) oder »Zweierpotenz« (eine Zahl wie 2, 4, 8, 16 und so weiter, die durch Multiplikation von 2 mit sich selbst entsteht), führt Stewart durchweg sorgfältig ein und bespricht sie.

Den 2-Quadrate-Satz begründet der Autor jedoch nicht weiter. Auch anderswo im Buch bleiben immer wieder Fragen offen. Und so läuft Stewart Gefahr, dass den mathematisch Vorgebildeten unter seinen Lesern der Tiefgang fehlt – während Laien rasch an ihre Grenzen kommen dürften. Für alle interessant sind jedoch die historischen Exkurse, etwa zur Zahl Null oder zu Cäsars Geheimschrift, sowie die mathematisch-philosophischen Reflexionen zum Zahlbegriff.

Die Frage, was eigentlich eine Zahl ist, lässt sich gar nicht so einfach beantworten. Stewart erklärt den Vorschlag des deutschen Mathematikers Gottlob Frege (1848–1925), eine Zahl als eine bestimmte Menge von Mengen aufzufassen. Die Idee: Eine Menge mit sieben Tassen oder sieben Untertassen, die Menge der Wochentage oder die Menge der Zeichen 1 bis 7 – sie alle korrespondieren miteinander. Das heißt, man kann bei ihnen eine vollständige 1:1-Zuordnung angeben. Dem folgend würde man die Zahl Sieben als die Menge aller Mengen definieren, die etwa mit der Menge der Wochentage korrespondiert. Der Autor erläutert, warum diese Idee als gescheitert angesehen werden muss, und zeigt auf, wie endliche Zahlen mit Hilfe der so genannten Leeren Menge »aus dem Nichts« konstruiert werden können.

Das Buch wagt einen Spagat zwischen leichten und komplexen, bekannten und weniger bekannten Themen. Der gelingt nicht immer. Die Übersetzung beispielsweise ist nur teilweise geglückt. Neben kleineren Tippfehlern stößt man auf Wortverwechslungen, etwa der Begriffe »Klasse« und »Menge«, was das Verständnis erschweren kann. Da der Band aber sehr gut strukturiert ist, kann man bequem zwischen den Abschnitten hin und her springen und etwas für sich Passendes herausuchen. Am Ende ist für jeden etwas Spannendes dabei.

Roland Pilous arbeitet als Dozent für Mathematik und ihre Didaktik an der Pädagogischen Hochschule Nordwestschweiz.

# 1916

## APPELL IN KRIEGSZEITEN

»Die Wandgemälde Wilhelm von Kaulbachs haben von jeher einen Hauptanziehungspunkt für Museumsbesucher gebildet. Über diesen farbenreichen Gemälden beachtet der flüchtige Beschauer gewöhnlich nicht die Fülle kleiner Darstellungen, die über und zwischen den Hauptbil-



FRIES DER KAULBACHSCHEN WANDGEMÄLDE, NEUES MUSEUM, BERLIN

dern verteilt sind, und von denen besonders der lange Fries jedermann Freude machen wird. In ihm hat der Künstler noch einmal das Leben und Treiben des Menschen von der Urzeit an geschildert. Von größerem Interesse ist sicher eine treffende Illustration der fettarmen Zeit: Dem eifrig malenden Kinde, dessen natürliche Malerei der Kornähren sogar zwei Vögel herbeilockt, leckt ein Hund die Ölfarben der Palette ab. Freuen wir uns, daß es uns trotz des jetzt etwas hochhängenden Brotkorbes noch besser geht, daß wir uns nicht mit gemaltem Getreide begnügen müssen, und daß wir noch Fett erhalten!« *Die Welt der Technik 22, S. 8*

## RÖNTGENBILDER VOR GERICHT

»Röntgenaufnahmen können in einem gerichtlichen Verfahren als Beweisgegenstände eine wichtige Rolle spielen. Ihrer Bedeutung hat die Gesetzgebung in vielen Staaten Nordamerikas dadurch Rechnung getragen, daß sie nur Platten anerkennt, auf denen Angaben röntgenographisch aufgenommen worden sind. Recht aussichtsreich scheint ein neueres Verfahren zu sein. Es beruht darauf, daß ein Stannioblatt an Stellen, an denen es Druck erfahren hat, für die Röntgenstrahlen durchlässiger wird. Der Erfinder des Verfahrens schreibt den erforderlichen Text mittels eines Achatstiftes oder einer Schreibmaschine ohne Farbband auf ein dünnes Stannioblatt. Das wird dann bei der Aufnahme auf die Platte gelegt.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik 32, S. 448*

# 1966



Schiffshebebühne »Syncrolift« im Hafen von Ostende.

## EIN AUFZUG FÜR SCHIFFE

»Ein mehr im Ausland eingesetztes Schiffshebewerk ist der »Syncrolift«. Er hat einige wesentliche Vorteile, die man heute wegen des Personalmangels und der damit verbundenen Automatisierung gern anwendet. Die Schiffshebebühne gleicht einem Aufzug, mit dem das Schiff aus dem Wasser gehoben wird. Die Plattform des »Syncrolifts« wird so weit in das Wasser herabgelassen, daß das Schiff darüberfahren kann. Nach dem Wiederanheben der Bühne setzt sich das Schiff auf die vorbereiteten Pallen und wird dann so weit angehoben, daß Schiff und Plattform oberhalb der Wasserlinie stehen. Die Kosten dieser modernen Anlage liegen etwas unter dem Herstellungspreis eines Schwimmdocks.« *Die Umschau 21, S. 715*

## KANN GIRAFFEN SCHWINDELIG WERDEN?

»Es gelang vor kurzem, Giraffen in freier Wildbahn zu untersuchen. Zu diesem Zweck bauten Wissenschaftler in die Halsschlagader zweier großer Tiere ein Meßgerät ein, das mit einem Transistorfunkgerät gekoppelt war. Hiernach scheinen Herzschlag und Blutdruck einer Giraffe bemerkenswert stark zu schwanken. Offenbar erhöht und senkt er sich mit dem Heben und Senken der »Blutsäule« im Hals. Im Gehirn wurden jedoch Verhältnisse festgestellt, die für einen ausgleichenden Regulationsmechanismus sprechen.« *Kosmos 11, S. \*416*

## ERDBEBENVORHERSAGE MIT LICHT

»Terrainverschiebungen, die als Vorzeichen für Erdbeben gewertet werden könnten, gehen oft so langsam vor sich und sind so minimal, daß sie herkömmlich kaum zu erfassen sind. Mit Laserstrahlen dagegen können Strecken exakt vermessen werden. Für die Messungen werden zwei Meßstrahlen im sichtbaren und im Infrarotbereich verwendet. Damit ist es möglich, daß die Anlage bei Tag und Nacht in Betrieb gehalten werden kann. Man hofft, ein Modell für den Aufbau und Abbau von Zug- und Druckspannungen in der Erdkrinde entwickeln zu können.« *Elektronik 11, S. E 173*

# SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT IM NEUEN GEWAND

Seit der Septemberausgabe 2016 erscheint **Spektrum** in einem neuen Layout. Hier haben wir eine Auswahl der Reaktionen aus unserer Leserschaft zusammengestellt.

**Kristian Remes, Bonn:** Ich bin seit 1996 treuer Leser von **Spektrum** und war auf die jüngste Überarbeitung des Layouts sehr gespannt. Mittlerweile habe ich das neue Heft durchgelesen und möchte Ihnen meine Gedanken hierzu nicht vorenthalten.

Der erste, äußere Eindruck ist sehr positiv. Die kräftige Farbe auf dem Titel erzeugt Aufmerksamkeit und weckt sicher auch im Bahnhofskiosk die Neugierde, das Heft einmal näher anzuschauen, selbst wenn man/frau **Spektrum** bislang nicht kennt. Auch im Inneren wirkt das Gesamtbild modern und aufgelockert.

Gefallen hat mir die Heraushebung des Titelthemas durch dessen Platzierung am Anfang des Hefts sowie die Vorstel-

## Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an [leserbriefe@spektrum.de](mailto:leserbriefe@spektrum.de). Oder kommentieren Sie im Internet auf [Spektrum.de](http://Spektrum.de) direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht.

lung der Autoren gleich zu Beginn der jeweiligen Artikel. Die Grafiken und Fotos sind weiterhin von hervorragender Qualität. Inhaltlich kann auch das jüngste Heft überzeugen, als Neuigkeit habe ich hier das ausführliche Porträt von Professor Charpentier wahrgenommen.

Gelegentliche Porträts (in Ergänzung zu Interviews) von bedeutenden Köpfen der Wissenschaft können **Spektrum** sicherlich bereichern, wobei jedoch auch darauf geachtet werden sollte, den Kern von **Spektrum** – die Vermittlung wissenschaftlicher Erkenntnis – nicht zu Gunsten von anderen, eher im erweiterten Sinn wissenschaftsbezogenen Artikeln zu sehr zu beschneiden.

Etwas weniger gefallen haben mir die Vierspaltigkeit des Spektrogramms und der Rezensionen sowie die dortigen vertikalen Trennlinien zwischen den Spalten. Gänzlich unpassend fand ich Letztere dann allerdings im Abschnitt Forschung aktuell / Springers Einwürfe: Wenn die Linien zum Trennen einzelner Artikel Verwendung fänden, würde sich mir ihr Zweck erschließen, in der gegenwärtigen Form stören sie dagegen.

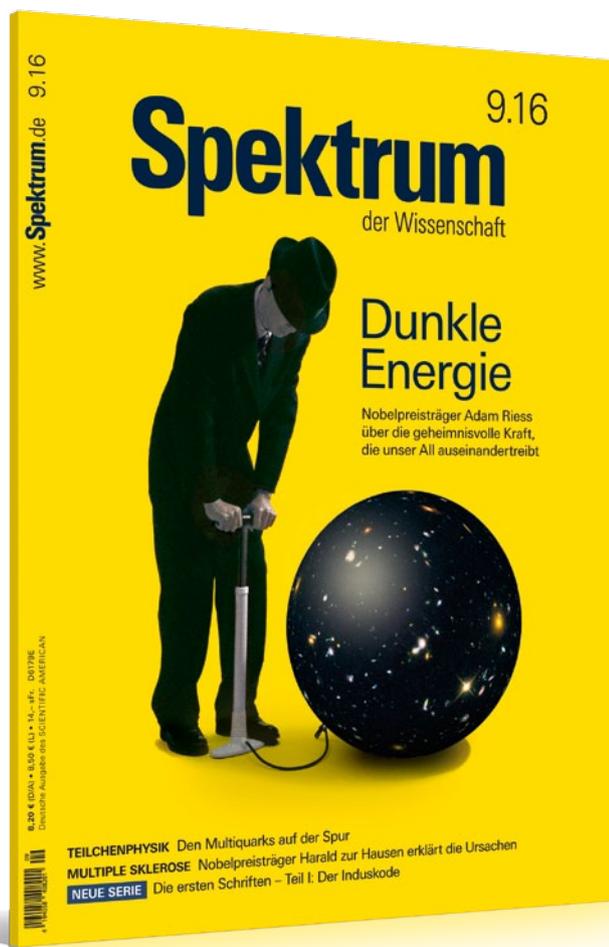
Das größte Manko des neuen Layouts ist aus meiner Sicht aber die Wahl des Schriftbilds. Die kleine, enge und serifenlose Schrift in Kombination mit der Linksbündigkeit erschwert die Lesbarkeit und erfordert erheblich mehr Konzentration. Sie vermittelt mir dabei zudem ein Gefühl der Oberflächlichkeit, die Seriosität (wie ich sie im Bereich der Wissensvermittlung mit klassischen Serifenschriften verbinde) zu Gunsten des Designs opfert.

Das finde ich sehr schade, denn auf diese Weise steht das Schriftbild zwischen der hohen inhaltlichen Qualität der Artikel und dem Leser. In allen Überschriften, Kästen und sonstigen Nebentexten stört eine serifenlose Schrift nicht, im Haupttext aber schmälert sie für mich den Genuss von **Spektrum** leider deutlich.

**Marcel Bartz, Hattingen:** Zunächst erst einmal ein dickes Lob für das neue frische Design! Meiner Meinung nach erfüllen alle Neuerungen ihren Zweck, und es ist ein großer Schritt nach vorne. Ich bin gespannt auf die nächsten Ausgaben!

Ich freue mich auch sehr über die neue Kategorie »Chemische Unterhaltungen«, da ich es wichtig finde, neben Artikeln, die von renommierten Forschern geschrieben werden, auch welche zu lesen, die von Wissenschaftlern geschrieben sind, die in der Didaktik tätig sind. Die Artikel von Herrn Schlichting sind dort ebenso miteinander geschlossen wie die neuen Formelwelt-Artikel von Herrn Freistetter. Eine gute Ergänzung zu dem bisherigen **Spektrum** des Hefts.

**Marc Schneider, Karben:** Das neue Layout ist wie gewohnt typografisch ohne Fehl und Tadel, einzelne Details (Flutter-



satz, Spaltenanzahl) sind sicherlich Geschmackssache. Im Vergleich zum alten Heft musste ich jedoch mit Bedauern feststellen, dass auch Sie dem aktuellen Trend zur serifenlosen Schrift als Standard erlegen sind, obwohl die bisherige Antiqua eindeutig besser lesbar war und sich gut von den Nebentexten abgesetzt hat.

Auch der Sinn der Umpositionierung von »Forschung Aktuell« hat sich mir nicht erschlossen. Ein wenig erstaunt war ich schon über das Redesign; nach zahlreichen kleineren und größeren Änderungen im Lauf der letzten Jahre hatte ich eigentlich nicht das Gefühl, dass das bisherige **Spektrum**-Layout irgendwie veraltet oder dringend verbesserungswürdig wäre. Insbesondere das schwarze Titelblatt war ein Markenzeichen.

**Gerold Stein, Weinheim:** Leider muss ich Ihnen mitteilen, dass mich das neue Layout sehr enttäuscht. Zum einen hat es große Ähnlichkeit mit dem Layout der 1990er Jahre, zum anderen hat es an Übersichtlichkeit verloren. Sehr gut gefällt mir dagegen inhaltlich die neue Rubrik »Freistatters Formelwelt«.

**René de la Chaux, Berlin:** Zunächst einmal bin ich begeistert von der neuen **Spektrum**-Ausgabe, die moderner wirkt, aber gleichzeitig die klassische, schnörkellose Form einer wissenschaftlichen Zeitschrift wieder aufgenommen hat. Mir ergab sich schon beim Anblick das Gefühl, dass die Information deutlicher in den Mittelpunkt gerückt wird und gleichzeitig ästhetisch ist, was sich mir beim Lesen dann bestätigte.

Nachdem ich in den letzten Jahren etwas die Befürchtung hatte, dass **Spektrum** eher zu einer Zeitschrift wird, die nur über Wissenschaft und das Drumherum berichtet, bin ich froh, dass die neue Ausgabe ganz klar wieder eine explizite, wissenschaftsvermittelnde Zeitschrift geworden ist!

**Thomas Reinhardt, München:** Das neue Layout wirkt billig und unprofessionell. Der fehlende Blocksatz ist nicht nur hässlich, er erschwert auch das Lesen. Die geänderte Schriftart gefällt mir persönlich nicht, ist aber wahrscheinlich Gewöhnungssache. Was mir gefallen hat, ist der Inhalt der Ausgabe: Die Artikel und Themen waren gut.

Mit Blocksatz wäre es wahrscheinlich eine subtile Modernisierung, die niemanden stört. Etwas mehr Farbe ist an sich auch okay, hat aber einen Nachteil am Kiosk: Man kann nicht gezielt suchen, weil ja jedes Heft immer eine neue Farbe hat.

**Rainer Specker, Tettngang:** Mit Genuss habe ich Ihr gelungenes Heft komplett gelesen, es ist wie gewohnt äußerst interessant! Schade finde ich nur, dass keine Cartoons von Oswald Huber mehr im Heft zu finden sind. Waren sie doch stets das Erste, wonach ich in jedem Heft suchte. Herrn Hubers Cartoons sind so herrlich treffend. Wissenschaft sollte nicht todernst betrieben werden – ein Lächeln oder herzhaftes Lachen lockert auf und kann auch die Fantasie beflügeln.

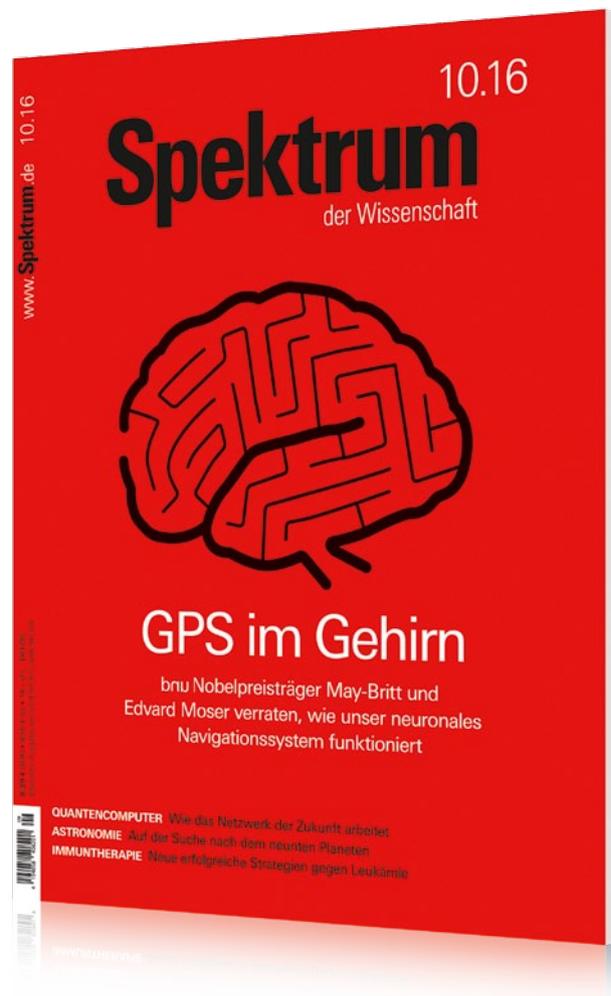
**Hellmut Thomke, Bern (Schweiz):** Das neue **Spektrum** gefällt mir als altem Leser (seit 1985) in mancher Hinsicht nicht. Die Seitengestaltung von Text und Bild ist unruhiger geworden. Die serifenlose Schrift mag hingehen. Schnörkellos und nüchtern zu sein, passt gut zu den Naturwissenschaften; aber manchmal führt das auch zur Fantasielosigkeit. Am meisten stört mich der Flattersatz in den Spalten. Er erschwert ruhiges Lesen, aber auch rasches Überfliegen. Keineswegs leserfreundlich ist die sehr kleine Schrift in den Glossaren.

## ERRATUM

### »Ein Diamant ist unvergänglich?«

Chemische Unterhaltungen, **Spektrum** September 2016, S. 48

In der rechten Spalte S. 52 oben ist uns leider ein Fehler unterlaufen: Statt »acht bis zehn Megapascal« muss es »acht bis zehn Gigapascal« heißen. Wir bitten das Versehen zu entschuldigen.



# futur III

## Krieg und Frieden im Multiversum

Ein Spiel mit Extradimensionen. **Eine Kurzgeschichte von Brian Trent**

Es war ein Lenkflugkörper«, erklärte sie.

Die Admiräle, die rundum im Krisenraum des Hellwelt-Imperiums saßen, blinzelten erstaunt. »Was soll das heißen?«, fragte einer schließlich. »Eine Rakete? Von wo? Von wem?«

Dr. Harshadi Hennig stand im Mittelpunkt der Runde und fühlte sich wie so oft nicht als vortragende Wissenschaftlerin, sondern eher wie eine Gefangene beim Verhör. Sie hob die Holohandschuhe und erzeugte ein Bild der Eris-Station auf der Umlaufbahn um den Planeten Neptun.

»Ein Shuttle hat die Szene beim Anflug aufgezeichnet«, erläuterte Dr. Hennig.

Die Neptun-Station erschien als graues Rad vor schwarzem Hintergrund. Die Zeitanzeige in der Bildecke tickte vor sich hin, bis bei 18:43:30 ein grünliches Licht das Dunkel zerriss – als öffne sich ein schwerer Vorhang und enthülle im kalten All einen Smaragd-himmelspalt. Etwas wie ein kolossaler Turm erschien darin. Dann verschwand das Licht und mit ihm die seltsame Form. Die Shuttlekamera erbebt. Und die Raumstation war ...

»Weg«, blaffte einer der Admiräle ungeduldig; in diesem Ton pflegten sie mit dem gemeinen Volk des Imperiums umzugehen. »Ja, Hennig, das wissen wir. Sagen Sie uns, was zum Teufel mit der Eris-Station geschehen ist!«

Sie verbeugte sich unterwürfig. »Gewiss, Admiral. Die Station wurde Opfer einer Rakete, die aus einer anderen Dimension stammt.«

»Sie ... was?«

»Die Rakete wurde nicht von Aufständischen oder Terroristen abgefeuert, sondern aus einem Universum in der Nachbarschaft.«

Sie schuf mit ihren Handschuhen ein Standfoto des grünlichen Risses.

»Wie es scheint«, fuhr sie fort, »ist die Multiversumtheorie korrekt. Das Video zeigt die Aufspaltung einer Dimensionsmembran und die kurze Materialisation des, wie wir vermuten, außerirdischen Äquivalents einer Interkontinentalrakete.«

Die versammelte Admiralität steckte die Köpfe zusammen. »Wollen Sie sagen«, bellte einer, »dass uns multidimensionale Aliens attackieren?«

»Nun ... nicht direkt.« Sie klatschte in die Hände, und das Hologramm verschwand. »Ohne die zufällige Aufzeichnung hätten wir nie etwas bemerkt. Verstehen Sie, das war kein Angriff. Unsere außerirdischen Nachbarn hatten keine Ahnung, dass es auf dieser Seite der Membran überhaupt Leben gibt.«

»Hennig, Sie reden wirres Zeug ...«

»Was wir sahen«, unterbrach die Wissenschaftlerin kühn, »war ein interdimensionaler Waffentest.«

Totenstille erfüllte den Krisenraum. »Erklären!«, befahl jemand mühsam.

»Ich bin nicht sicher, ob ich das erklären kann. Wie bei uns herrscht bei diesen Aliens ein Wettrüsten. Wie wir experimentieren sie unentwegt mit größerer und besserer Waffentechnik. Baust du eine Bombe, so baut dein Feind ein Schutzschild. Also baust du eine bessere Bombe. Was wir eben erlebten ...«

»Ja?«

»... war der Test einer extradimensionalen Rakete. Vereinfacht gesagt steigt die Waffe in eine höhere Dimension auf – in unsere – und wird dann wieder zurück in die Dimension der Außerirdischen gelenkt, um extremste Hypergeschwindigkeiten zu erreichen. Angenommen, Sie müssen knapp unter Wasser einen Faustkampf bestehen. Die Wucht Ihrer Boxhiebe wird stark gehemmt. Doch wenn Sie sich strecken und über Wasser ausholen ...«

Dr. Hennig krümmte die behandschuhten Finger und spielte das Hologramm extrem verlangsamt ab. Die außerirdische Rakete tauchte auf und verschwand blitzartig wieder. Die Eris-Station folgte ihrem Sog.

»Das geschah mit der Station«, sprach Hennig selbstsicher. »Sie wurde zusammen mit der Rakete in eine Nachbardimension gezogen.«

Sie bemerkte, dass sich in den Gesichtern der Admiralität ein neuer Ausdruck breitmachte: Erregung.

»Sprechen Sie weiter«, befahl einer und leckte sich die Lippen.

»Gewiss, Sir. Der Test führte zum Tod von Millionen unserer außerirdischen Nachbarn.«

»Zweifellos. Sieht mir nach einer verflucht effektiven Waffe aus.«

»Nein, Sir, Sie verstehen das falsch. Die Explosion der Rakete war heftig, blieb aber ein lokales Ereignis. Der außerirdische Test verursachte unbeabsichtigt eine Epidemie, die einen halben Kontinent entvölkerte.« Sie musterte die ratlosen Gesichter ihrer Zuhörer. »Als die menschliche Besatzung der Eris-Station ins interdimensionale Kielwasser gesaugt wurde, löste ihr organisches Material im benachbarten Universum eine tödliche Seuche aus. Einfach gesagt, die Aliens wollten eine schnelle Rakete und gewannen eine Biowaffe.«

»Wird das ... wieder geschehen?«

»Es geschieht bereits im ganzen Sonnensystem. Kurze Lichtblitze. Berichte über seltsame, flüchtige Formen im Weltraum. Doch die Aliens können die ursprünglichen Resultate nicht wiederholen, weil sie mit ihren Tests jetzt nicht mehr zufällig Menschen erwischen. Leider sind sie fest entschlossen, den Effekt zu erzielen, und intensivieren darum die Tests. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis eine

dimensional beschleunigte Rakete sich am Ort eines Planeten materialisiert.«

Die Admiräle schauten betroffen.

»Keine Sorge«, sagte Hennig.

»Wie bitte?«, höhnte ein Admiral.

»Dieses blöde Volk hat eine Bedrohung des Imperiums entdeckt, und sie sagt, wir sollen uns keine Sorgen machen!«

»Vielleicht hat sie eine Idee, wie man die Bedrohung neutralisieren kann?«, meinte ein anderer.

»Neutralisieren?« Hennig kratzte sich am Kopf. »Nicht genau. Aber in den letzten Wochen ist es mir gelungen, mit unseren interdimensionalen Nachbarn Kontakt aufzunehmen. Das hat sich schon gelohnt, in gewisser Hinsicht.«

»Moment, Sie kontaktierten eine ausländische Macht ...«

»Wir trafen ein Abkommen«, unterbrach Hennig den Admiral. »Die Aliens erklärten sich bereit, ihre Raketen nicht mehr blindlings in unserer Dimension zu testen. Im Gegenzug ...« Sie lächelte. »Wir liefern ihnen Koordinaten, wo sie Tests durchführen sollen.«

Sie sah, wie in den Augen der Admiräle die Erkenntnis aufblitzte. Oder vielleicht war das nur der Widerschein des grünlichen Lichts, das plötzlich die Uniformen umspielte.

Die versammelte Admiralität sprang auf wie ein Mann.

»Wir, das Volk, haben es satt, Sklaven des Imperiums zu sein.« Hennig musste schreien, um den steigenden Lärm zu übertönen. »Darum gaben wir den Außerirdischen die Koordinaten eurer Militärbasen. Die Aliens bekommen ihre Biowaffen, und wir bekommen die Freiheit. Jeder gewinnt!«

Ein Admiral schrie: »Du wirst auch sterben!«

Hennig sah überrascht drein. »Ich? Aber ich bin doch gar nicht da.«

Sie klatschte in ihre Handschuhe, und ihr Hologramm verschwand.

DER AUTOR

**Brian Trent** veröffentlicht regelmäßig in »ANALOG«, »Fantasy & Science Fiction«, »COSMOS«, »Galaxy's Edge« und Anthologien. Seine Website: [www.briantrent.com](http://www.briantrent.com)

© Nature Publishing Group; [www.nature.com](http://www.nature.com); Nature 536, S. 584, 25. August 2016

## Spektrum der Wissenschaft

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

**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser

**Redaktion:** Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke

**E-Mail:** [redaktion@spektrum.de](mailto:redaktion@spektrum.de)

**Ständige Mitarbeiter:** Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

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

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

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

**Redaktionsassistent:** Barbara Kuhn

**Assistenz des Chefredakteurs:** Hanna Hillert

**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

**Hausanschrift:** Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Redaktionsanschrift:** Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

**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](mailto:service@spektrum.de)

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

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer.

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabina Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.de](mailto:service@spektrum.de)

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: [spektrum@zenit-presse.de](mailto:spektrum@zenit-presse.de)

**Vertretungsberechtigter:** Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,50 (D/A/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: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 37 vom 1. 1. 2016.

**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 Zugangsmachung, 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:

© 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**

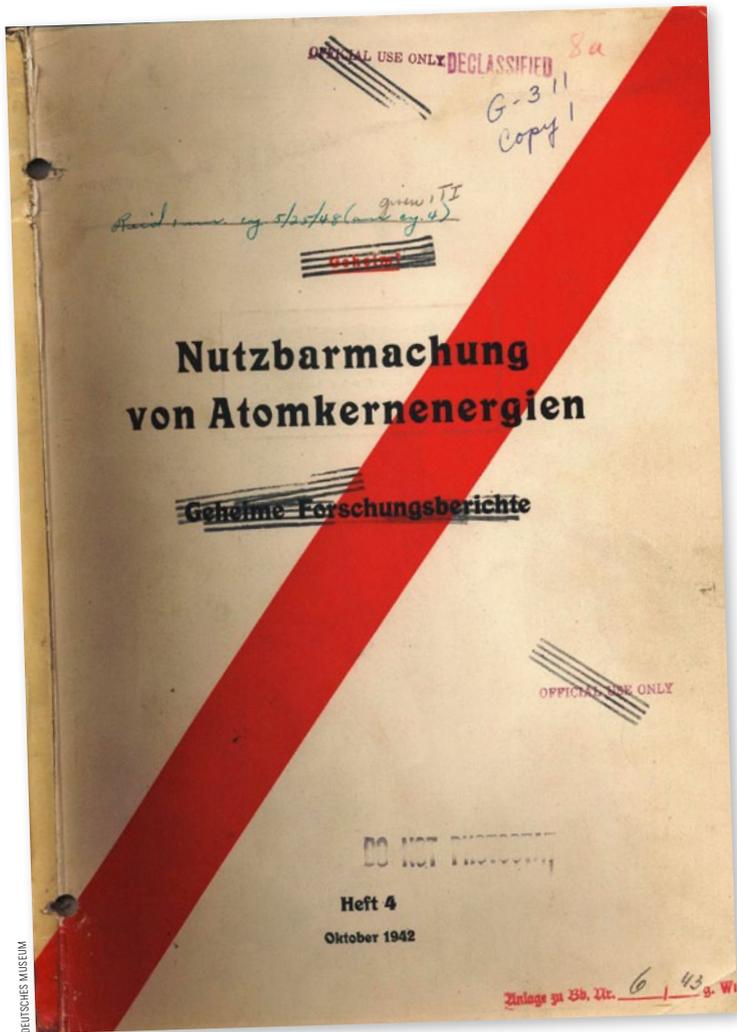
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,  
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe,  
Executive Vice President: Michael Florek



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



# VORSCHAU



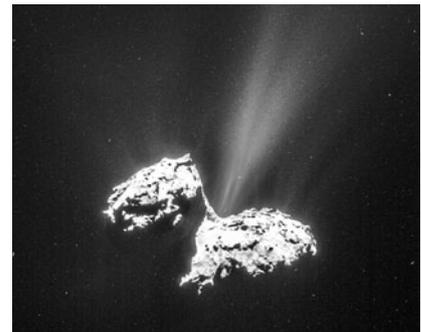
## TITELTHEMA: WARUM DIE NAZIS KEINE ATOMBOMBE ENTWICKELTEN

Obwohl in Deutschland der 1930er und 1940er Jahre wesentliche Grundlagen für die Nutzung von Kernenergie geschaffen wurden, haben die Nazis keine Nuklearwaffen entwickelt. Bisher glaubten die meisten Historiker: Das Wissen war vorhanden, allein die Mittel fehlten. Ein führender Kernphysiker kommt jetzt anhand der Originalquellen zu einem anderen Schluss.



## EINE NEUE BASIS FÜR DIE MATHEMATIK

Vladimir Voevodsky hat den Traum von der Maschine, die unfehlbar mathematische Wahrheiten produziert, der Realität ein Stück näher gebracht. Aber das erfordert eine Neuformulierung der Grundlagen: Die klassische Mengenlehre reicht nicht mehr aus.



## RÜCKBLICK AUF ROSETTA

Bevor die Sonde Rosetta am 30. 9. ihre letzte Ruhestätte auf dem Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko fand, funkte sie letzte Bilder aus nächster Nähe zur Erde. Projektleiter Gerhard Schwehm zieht ein Fazit der Mission.



## DER TROJANISCHE KRIEG – FIKTION ODER REALITÄT?

25 Jahre lang haben Archäologen den Ruinenhügel Hisarlik und seine Umgebung erforscht; ihre Befunde sind nun ausgewertet. Lag dort einst Homers Troja? Und tobte am Ende der Bronzezeit ein Krieg um diese Festung?

## NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:  
[spektrum.de/newsletter](http://spektrum.de/newsletter)

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

# DIE WOCHE

DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

IM HERBST SCHON AN  
WEIHNACHTEN DENKEN  
UND **DIE WOCHE** IM  
KOMBIPAKET ALS APP UND  
PDF VERSCHENKEN!

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im (Geschenk-)Abonnement nur € 48,- für 52 Ausgaben im Jahr.



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

# Sichert guter CONTENT ein GUTES LEBEN?



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Digitalisierung birgt Chancen und Herausforderungen für das Lernen und Lehren. Um neue Bildungschancen für alle nutzbar zu machen, arbeitet das Bundesbildungsministerium mit zahlreichen Partnern an Lösungen von morgen. Erfahren Sie hier mehr:

[www.bildung-forschung.digital](http://www.bildung-forschung.digital)

Digitale  
**Bildung\_**  
Für das Leben lernen.