

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

JUNI 2016

6/16 Spektrum
DER WISSENSCHAFT

ANTHROPOLOGIE

Der Siegeszug des *Homo sapiens*

TECHNIK

Batterie der Zukunft

MEDIZIN

Heilen mit kaltem Plasma



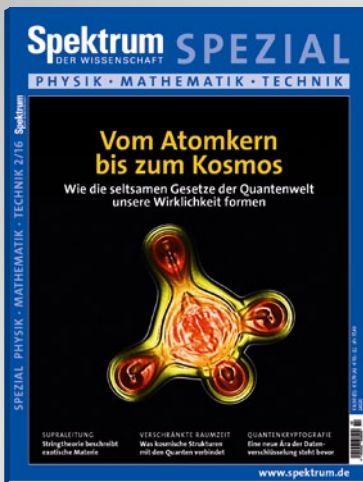
Warum wir träumen

So simuliert das Gehirn künftige Herausforderungen

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



Unsere Neuerscheinungen



Die Wirklichkeit der Natur • Verschränkung: Das Ende des lokalen Realismus • Teilchenphysik: Stringtheorie für Festkörper • Atomkerne: Zwischen Flüssigkeit und Kristall • € 8,90



Impfen mit Zucker • Maßgeschneiderte Radionuklide gegen Krebs • Parabiose: Verjüngendes Blut • Ethik: Lebende Ersatzteillager für menschliche Organe • Depression an der Wurzel packen • € 8,90



Megasites: Ahnenkult in den Großdörfern der Steinzeit • Megatempel: Angkor Wat und die Hauptstadt des Khmer-Reichs • Megacities: Worauf uns die Evolution nicht vorbereitet hat • € 8,90



Das entfremdete Selbst • Sind glückliche Menschen gesünder? • Wenn Stress unter die Haut geht • Die Angst vor dem Teller • Den eigenen Witz neu entdecken • € 8,90



Alkohol und Zigaretten • Heroin vom Staat: Ein Modellprojekt für Junkies • Exzessives Kiffen • Frust und Völlerei • Facebook, Sport und Glücksspiele: Wann es zu viel wird • € 8,90 (2. Auflage)



Cappuccino-Effekt: Klänge aus dem Milchschaum • Heiz-Paradoxon: Rätselhafte Temperaturzunahme • Bermuda-Dreieck: Lassen gigantische Gasblasen Schiffe sinken? • € 8,90

Alle Hefte auch im Handel erhältlich!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

E-Mail: service@spektrum.de



Hier QR-Code per Smartphone scannen!



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Cherchez les femmes!

Mit Ausgabe 9/2016 werden wir »Spektrum der Wissenschaft« ein neues Layout verpassen und dabei vielleicht auch kleinere neue redaktionelle Akzente setzen. Um die Vorlieben unserer Leserinnen und Leser genauer zu erfassen, haben wir vorab einen Teil der Abonnenten zur diesjährigen Aprilausgabe detailliert befragt. Wir wollten dabei unter anderem erfahren, welche Artikel ihnen besonders gut gefallen haben und für welche Themengebiete sie sich ganz allgemein interessieren.

Die für uns erfreuliche zentrale Nachricht war, dass unsere Leser überwiegend sehr zufrieden mit »Spektrum« sind! Gleichzeitig lieferten die insgesamt über 400 ausgefüllten Antwortbögen aber auch einige Anregungen zu Verbesserungen und Veränderungen. Jetzt sind wir daran zu überlegen, inwieweit sich diese ab der Septemбераusgabe im Heft niederschlagen werden. Lassen Sie sich überraschen!

Auch wir waren überrascht, und zwar von einem speziellen Ergebnis der Befragung: Demnach sind gerade einmal knapp zehn Prozent unserer Abonnenten Frauen – noch weniger, als wir gedacht hatten. Das hat sofort lebhafte Diskussionen in der Redaktion ausgelöst: Was sind die Ursachen dafür, und können wir daran vielleicht etwas ändern? Die Frage ist hochkomplex und birgt reichlich Sprengstoff – denn sollte man wirklich davon ausgehen müssen, dass sich Frauen im Durchschnitt nicht für eine anspruchsvolle Darstellung naturwissenschaftlicher Forschung interessieren? Wohl kaum! Schon der Anteil der Studentinnen entsprechender Fächer spricht hier eine deutlich andere Sprache.

Woran liegt es also, dass wir vergleichsweise wenige Leserinnen finden? Hat es mit dem Themenmix zu tun oder eher mit der Gestaltung unserer Titelseite? Hier könnte man einen möglichen Grund in einer gewissen Dominanz »harter« physikalischer Themen verorten – die aber andererseits bei Umfragen wie auch der eingangs genannten regelmäßig den Spitzenplatz der Interessensgebiete einnehmen. Könnten wir Frauen pauschal durch ein verändertes Erscheinungsbild stärker ansprechen, oder bedient eine solche Diskussion doch nur wieder alte, längst überwunden geglaubte Stereotype? Es kristallisiert sich ein kaum aufzulösender Widerspruch zweier Betrachtungsweisen heraus: Kann man einerseits überhaupt von typisch weiblichen und männlichen Präferenzen sprechen? Aber wie lässt sich andererseits unser eindeutiges Befragungsergebnis erklären?

Ich persönlich sehe jedenfalls keinen Grund, warum ein Heft wie das vorliegende fast nur Männer interessieren sollte. Mit der wichtigen Funktion unserer Träume (S. 20), den Gründen für den Siegeszug des *Homo sapiens* (S. 48), den faszinierenden Bestattungsriten im alten Rom (S. 56) und der bedrohlichen Bevölkerungsentwicklung in Afrika (S. 66) bietet es ein breites Themenspektrum, in dem sicher jeder – und jede – etwas für sich finden kann.

Viel Vergnügen beim Entdecken wünscht Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die Schlaf- und Traumforscherin **Isabelle Arnulf** untersucht mit modernsten neurowissenschaftlichen Methoden die Ursachen schwerer Schlafstörungen sowie mögliche Funktionen des Träumens (S. 20).



Der Chirurg **Hans-Robert Metelmann** (links) war von 2002 bis 2006 Kultusminister von Mecklenburg-Vorpommern. Zusammen mit **Thomas von Woedtke** vom Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie stellt er ab S. 30 die junge Disziplin der Plasmamedizin vor.



Florian Rodler erkundet am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg die Möglichkeiten zur Beobachtung von Exoplanetenatmosphären (S. 36). Zu diesem Zweck ist er ständig weltweit unterwegs – von Teleskop zu Teleskop.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Riesenhai widerstand Klimakapriolen • Quantenspinflüssigkeit in 2-D-Material • Bewohnbarer Ballon im All • Nerven-Bypass überwindet Lähmung • Der Vorteil von Paarbeziehungen • Stopptaste im Gehirn

9 Bild des Monats

Vom Kiemenbogen zum menschlichen Finger

10 Forschung aktuell

Bartagamen

Eine Echse mit verblüffender Geschlechtsregelung

Forschung in Zahlen

So viel investieren Megastädte in Klimaschutz

Aufstieg vom Erdkernrand

Erste scharfe Abbildung von Säulen im Erdmantel

Riechen per Molekülschwingung

Reagieren Geruchsrezeptoren auf Molekülvibrationen?

SPRINGER'S EINWÜRFE

Die Erbmasse wird Rohstoff

Stehen wir an der Schwelle zum postgenomischen Zeitalter?

30



INP GREIFSWALD

36



ESO / LUIS CALCADA (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/IMAGES/ESO0915A1) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

56



AKG IMAGES / GLASSHOUSE IMAGES

BIOLOGIE & MEDIZIN

► 30 Heilen mit dem vierten Aggregatzustand

Physikalisches Plasma desinfiziert Wunden, beschleunigt deren Heilung und kann vielleicht Tumoren bekämpfen.

Thomas von Woedtke und Hans-Robert Metelmann

PHYSIK & ASTRONOMIE

SERIE: »GROSSFAHNDUNG NACH EXOPLANETEN« TEIL 3

36 Spurensuche im All

Leben auf fernen Planeten sollte Fingerabdrücke im Spektrum der Atmosphären hinterlassen.

Florian Rodler

SCHLICHTING!

44 Himmlische Sphären

Wölbt ein Luftstrom einen Flüssigkeitsfilm genügend stark ein, schnüren sich kugelförmige Teile ab – Seifenblasen!

H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

► 48 Der Siegeszug des *Homo sapiens*

Seine hohe Kooperationsfähigkeit und seine Projektilwaffen machten den modernen Menschen so überlegen.

Curtis W. Marean

SPEZIAL: TOTENKULT IM ALTEN ROM

56 »Möge dir die Erde leicht sein«

Ihre Bestattungsriten verraten: Noch mehr als das Sterben fürchteten die Römer, vergessen zu werden.

Annika Domainko

63 Hauptstadt der Seuchen

Immer wieder forderten Epidemien tausende Tote, wie Massengräber den Archäologen verraten.

Dominique Castex und Sacha Kacki

► TITELTHEMA

NEUROWISSENSCHAFT

20 Warum träumen wir?

Isabelle Arnulf

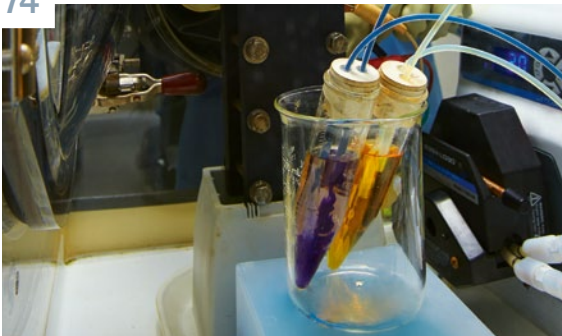
Gut ein Viertel unseres Lebens verbringen wir im Traum. Haben die flüchtigen Bilder und Szenen eine Funktion? Oder sind es nur Leerlaufprodukte des schlafenden Gehirns? Neue Forschungsergebnisse weisen auf wichtige Aufgaben des nächtlichen Kopfkinos hin.

66



JONATHAN TORGOVNIK / GETTY IMAGES REPORTAGE

74



PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY (PNNL)

ERDE & UMWELT

66 Afrikas bedrohliche Bevölkerungsexplosion

Bis 2100 könnten sich mehr als sechs Milliarden Menschen in Afrika drängen. Dagegen helfen allein die Emanzipation der Frauen und freier Zugang zu Verhütungsmitteln.

Robert Engelman

TECHNIK & COMPUTER

► 74 Die Batterie der Zukunft

Der Ausbau von Wind- und Solarkraft birgt ein Problem: Der unregelmäßig erzeugte Strom muss zwischengespeichert werden. Flussbatterien könnten die Lösung bieten.

Neil Savage

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

78 Alice und Bob im Geheimraum

Kann man mit Zahlen rechnen, die man nur in verschlüsselter Form zu sehen bekommt? Ja – aber noch ist es äußerst mühsam.

Brian Hayes

19 Impressum

84 Wissenschaft im Rückblick

Vom Urmenschfossil zum Großrechner

86 Rezensionen

Margot und Roland Spohn: Bäume und ihre Bewohner • Val McDermid: Anatomie des Verbrechens • Norbert Hermann Hinterberger: Die Fälschung des Realismus u. a.

95 Leserbrief

96 Futur III

S.R. Algernon: Der Geisterfänger

98 Vorschau

Titelmotiv: Getty Images / George Peters
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

PALÄONTOLOGIE

Riesenhai widerstand Klimakapriolen

C*archarocles megalodon*, der wohl größte Hai, der je gelebt hat, verschwand vor 2,6 Millionen Jahren. Vermutlich wurde ihm keine Klimaänderung, sondern Nahrungsmangel zum Verhängnis, wie Forscher um Catalina Pimiento von der Universität Zürich herausgefunden haben.

Die Wissenschaftler analysierten rund 200 Funde von Megalodon-Fossilien, die in Museumssammlungen und Datenbanken weltweit dokumentiert sind und einen Zeitabschnitt von etwa 20 Millionen Jahren überdecken. Über die Fundorte und Datierungen rekonstruierte das Team, wie weit verbreitet die Räuber zu verschiedenen Zeitpunkten waren und welche Populationsgrößen sie jeweils erreichten. Demnach jagten die Riesenhaie im frühen Miozän, bis vor etwa 16 Millionen Jahren, vorwiegend in warmen Gewässern vor Nordamerika, Europa und im

Indischen Ozean. Später breiteten sie sich bis vor die Küsten Asiens, Australiens und Südamerikas aus.

Vor etwa 5 Millionen Jahren begann laut Fossilbefund der kontinuierliche Niedergang des Megalodon. Bislang hatten Forscher dies mit klimatischen Veränderungen in Zusammenhang gebracht. Die neuen Ergebnisse stellen das in Frage: Die Bestände des Riesenhais scheinen weder in kälteren Perioden ab- noch in wärmeren zugenom-

men zu haben. Vielmehr war offenbar Nahrungsmangel der ausschlaggebende Faktor. Das allmähliche Verschwinden des Megalodons geht zeitlich einher mit einem Rückgang seiner Beutetiere (hauptsächlich Wale) sowie dem Aufkommen neuer Konkurrenten. Insbesondere der Weiße Hai und Schwertwale drängten in seine ökologische Nische.

J. Biogeogr. 10.1111/jbi.12754, 2016

Der Megalodon (rot: konservative, grau: maximale Längenschätzung) stellte sowohl den Weißen Hai (grün) als auch den Walhai (violett) in den Schatten.

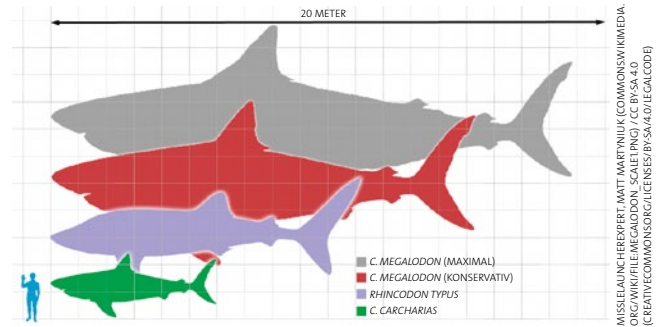


ILLUSTRATION: LIEBERT MIT MATERIALIEN VON SCIENCE/SHUTTERSTOCK/GETTY IMAGES (CREDIT: SCIENCE SOURCE/GETTY IMAGES/SHUTTERSTOCK)



Mehr Aktualität!

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

PHYSIK

Quantenspinflüssigkeit in 2-D-Material

Physiker um Arnab Banerjee vom Oak Ridge National Laboratory (Tennessee, USA) haben einen Hinweis auf eine so genannte Quantenspinflüssigkeit gefunden – ein ungeordnetes System aus Quantenspins, die miteinander in Wechselwirkung stehen. Die Forscher arbeiteten mit alpha-Ruthenium(III)-chlorid, das eine kristalline Schichtstruktur ähnlich dem Graphen aufweist. Darin sollte unter bestimmten Bedingungen eine Quantenspinflüssigkeit entstehen. Sie zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass die Elektronen mitsamt ihrer Spins selbst am absoluten Nullpunkt ein verschränktes Ensemble bilden, das Quantenfluktuationen zeigt – während sich in einem »normalen« ferromagnetischen Material die Elektronenspins bei tiefen Temperaturen alle gleich ausrichten.

Laut theoretischen Annahmen können in Quantenspinflüssigkeiten so genannte Majorana-Fermionen in Form von »Quasiteilchen« (Anregungen eines Vielteilchensystems) entstehen, indem Elektronen zerfallen. Majorana-Fermionen sind hypothetische Teilchen mit halbzahligen Spin, die gleichzeitig ihre eigenen Antiteilchen sind.

Streuexperimente mit Neutronen deuten darauf hin, dass dies in alpha-Ruthenium(III)-chlorid tatsächlich geschieht, und bestätigen insofern die theoretischen Erwartungen. Sollten sich die Ergebnisse auch von anderen Wissenschaftlerteams reproduzieren lassen, wären sie der erste direkte Nachweis einer Quantenspinflüssigkeit in einem zweidimensional strukturierten Material.

Nat. Mater., 10.1038/nmat4604, 2016

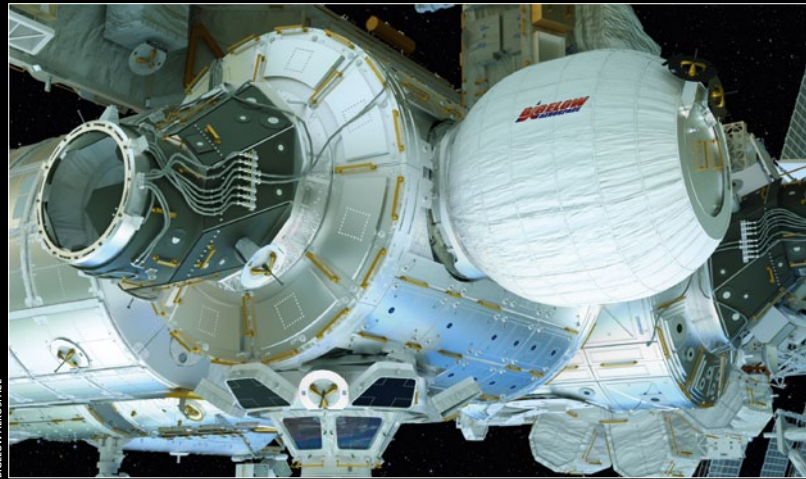
RAUMFAHRT

Bewohnbarer Ballon im All

Die Internationale Raumstation ISS ist erstmals um ein aufblasbares Modul erweitert worden. Am 16. April koppelten NASA-Mitarbeiter die Baueinheit mit einem ferngesteuerten Roboterarm an die Station an. Dort soll sie in den kommenden beiden Jahren getestet werden.

Das 1,4 Tonnen schwere Modul mit der Bezeichnung Beam (Bigelow Expandable Activity Module) wird mit Luft auf die Größe eines kleinen Schlafzimmers aufgeblasen. Es besteht zum großen Teil aus Aramiden, besser bekannt unter dem Handelsnamen Kevlar. Diese Substanzen bewähren sich als hochfeste, schlagzähe, bruchresistente, hitze- und feuerbeständige Faserverbundstoffe. Üblicherweise stellt man aus ihnen Schuss- und Splitter-schutzwesten, Helme und Panzerungen sowie Leichtflugzeuge her. Im »Beam«-Modul sorgen die Aramide für einen Schutz vor einschlagenden Mikrometeoroiden und für eine Toleranz gegenüber den extremen Temperaturschwankungen im All.

An aufblasbaren Erweiterungen für Raumschiffe und Bodenstationen haben Weltraumorganisationen großes Interesse. Da sie erst im Weltraum auf ihre endgültige Größe expandieren, nehmen sie weniger Nutzlastvolumen auf den Raketen in Anspruch, was die Startkosten beträchtlich senken hilft. Besonders interessant ist das im Hinblick



BIGELOW AEROSPACE

Zwei Jahre lang soll das aufblasbare Modul Beam an der Internationalen Raumstation verbleiben (künstlerische Grafik).

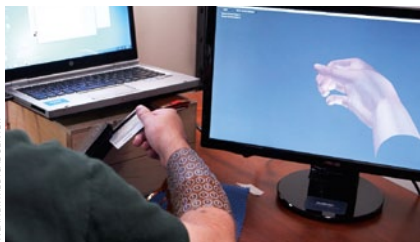
auf künftige bemannte Marsmissionen. Bei diesen müssen die Astronauten mehrere Jahre im Raumschiff verbringen, weshalb sie dort möglichst viel Platz zur Verfügung haben sollten.

NASA, 16. 4. 2016

PROTHESENTECHNIK

Nerven-Bypass überwindet Lähmung

Forscher um Chad E. Bouton von der Ohio State University (USA) haben einen Patienten, dessen Gliedmaßen fast vollständig gelähmt waren, mit einem »Nerven-Bypass« am rechten Unterarm ausgestattet. Der Mann kann seine rechte Hand nun wieder weitgehend normal bewegen.



OHIO STATE UNIVERSITY
WEXNER MEDICAL CENTER

Eine Elektrodenmanschette erlaubt es Ian Burkhart, seine Hand zu bewegen.

Das Team implantierte Mikroelektroden in den motorischen Kortex des Amerikaners Ian Burkhart, dessen Gliedmaßen seit einem Unfall fast vollständig gelähmt sind. Die Elektroden zeichnen die Hirnsignale auf, wenn der Mann sich bestimmte Handbewegungen vorstellt. Ein externer Computer übersetzt die Signale in elektrische Impulse und sendet diese an eine Manschette um Burkharts Unterarm, welche mit 130 Elektroden die Muskeln der Hände und Finger stimuliert.

Zuvor hatten die Wissenschaftler per Kernspintomografie jene Areale in der Hirnrinde des Patienten identifiziert, die für die Hand- und Fingerbe-

wegungen zuständig sind. Über mehrere Monate hinweg hatte der Proband verschiedene Bewegungsabläufe am Computer beobachtet und diese gedanklich nachvollzogen. Ein Algorithmus zeichnete unterdessen seine Hirnsignale auf und lernte, sie einzelnen Bewegungen zuzuordnen.

Mit Hilfe des Nerven-Bypasses beherrscht Burkhart mehrere Handbewegungen und kann jeden einzelnen Finger regen. Alltagsauglich ist die Technik aber noch nicht. Die Forscher arbeiten unter anderem daran, eine drahtlose Methode zu entwickeln, die eine mobile Nutzung des Bypasses erlaubt.

Nature 10.1038/nature17435, 2016

ANTHROPOLOGIE

Der Vorteil von Paarbeziehungen

In heutigen Massengesellschaften ist Monogamie die Regel – möglicherweise, weil sie Geschlechtskrankheiten eindämmen hilft. Das berichten Chris Bauch von der University of Waterloo (Kanada) und sein Kollege Richard McElreath. Mit Hilfe von Computermodellen fanden sie heraus: Wenn Menschen in Gruppen von wenigen dutzend Individuen zusammenleben, ebbent spontane Ausbrüche von Geschlechtskrankheiten wieder ab, auch wenn die Männer mehr als eine Frau haben. Ab einer Gruppengröße von einigen Hundert jedoch führt eine solche »Polygynie« (Vielweiberei) dazu, dass Geschlechtskrankheiten zum Dauerproblem werden.

Bauch und McElreath untersuchten in ihrem Modell die Wechselwirkungen zwischen Gruppengröße, Häufigkeit von Geschlechtskrankheiten und sozialen Normen. Dabei ließen sie empirische Daten von etwa 200 Kulturen einfließen – Jäger und Sammler ebenso wie Sesshafte. In Simulationen verfolgten sie, wie sich über mehrere Jahrtausende hinweg der Anteil von polygynen beziehungsweise monogamen Männern in bestimmten Gruppen verändert.

Demnach bleibt der Anteil Polygynen in kleinen Kollektiven über die Zeit praktisch gleich. In großen hingegen fällt er nach mehreren Jahrhunderten auf ein Wert von nahezu null, denn dort leidet ihr Fortpflanzungserfolg unter der Dauerpräsenz von Geschlechtskrankheiten, weshalb Monogamie zunehmend dominieren. Dies stimmt mit ethnologischen Beobachtungen überein, denen zufolge Vielweiberei in kleinen Gruppen recht häufig vorkommt, in großen Gesellschaften hingegen selten. Religiöse Einflüsse erfasste das Modell allerdings nicht.

Bisher hatten Anthropologen angenommen, Monogamie sei verbreitet, weil sie eine intensivere Kinderbetreuung seitens der Väter erlaube, was dem Nachwuchs zugutekomme. Eine andere Erklärung lautete, Männer schirmten wegen der Konkurrenz untereinander ihre Partnerin gegen Nebenbuhler ab. In beiden Fällen bezahlt die Gruppe allerdings mit einer niedrigeren Geburtenrate. Deshalb ließ sich bislang schwer erklären, warum Monogamie offenbar ein evolutionäres Erfolgsmodell ist.

Nat. Comm. 7, 11219, 2016

GEDÄCHTNIS

Stopptaste im Gehirn

Gerade noch war der Gedanke da, dann kam die Ablenkung, jetzt ist er weg. An diesem »Verlieren des Fadens« ist offenbar dasselbe Hirnareal beteiligt, das in überraschenden Momenten unsere Körperbewegungen stoppt, wenn wir beispielsweise den Fahrstuhl verlassen und uns abrupt jemand entgegentritt. Es handelt sich

um den Nucleus subthalamicus im Zwischenhirn.

Neurowissenschaftler um Jan Wessel von der University of Iowa (USA) zeichneten während eines Gedächtnistests die Hirnströme von 20 gesunden Probanden und sieben Parkinsonpatienten auf. Bei den Ersten taten sie das per Elektroenzephalografie (EEG) – bei den Zweiten hingegen über Elektroden, die zu therapeutischen Zwecken ins Gehirn eingesetzt worden waren, was eine Zuordnung der gemessenen Signale zu Hirnarealen erlaubte. Alle Teilnehmer mussten Buchstabenfolgen aus dem Gedächtnis heraus vergleichen. Dabei bekamen sie mitun-

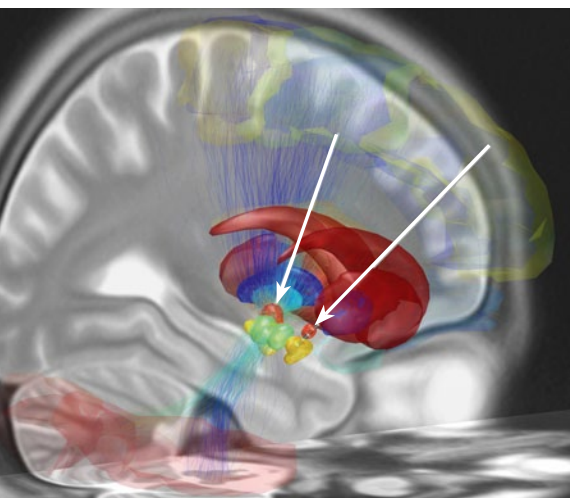
ter einen ablenkenden Reiz in Form überraschenden Vogelgezwitschers vorgespielt.

Wie die Messungen belegten, lässt die Ablenkung den Nucleus subthalamicus aktiv werden. Je stärker der Effekt ausfällt, desto weniger können sich die entsprechenden Teilnehmer hinterher an die Buchstabenfolgen erinnern. Zudem ähneln die Hirnsignale, die als Reaktion auf den Ablenkungsreiz auftreten, jenen bei einem plötzlichen Bewegungsstopp. Demzufolge liegen dem »Verlieren des Fadens« die gleichen Hirnvorgänge zu Grunde wie dem motorischen Innehalten in überraschenden Situationen.

Bereits zuvor hatten die Wissenschaftler zeigen können, dass der Nucleus subthalamicus reflexartige Bewegungsstopps vermittelt. Symptome der Parkinsonkrankheit lassen sich lindern, indem man diese Hirnregion mit Elektroden stimuliert.

Nat. Comm. 7, 11195, 2016

Die Symptome der Parkinsonkrankheit lassen sich unter anderem per elektrischer Hirnstimulation behandeln. Dabei führen Ärzte Elektroden (weiß) in den Nucleus subthalamicus (orange) ein. Dieser fungiert als Stopptaste des Gehirns.



ANDREASHORN (COMMONSWIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:DEEP_BRAIN_STIMULATION_ELECTRODE_PLACEMENT_RECONSTRUCTION.PNG) / CC BY-SA 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/4.0/LEGALCODE)



VOM KIEMEN- BOGEN ZUM MENSCHLICHEN FINGER

Forscher um den Zoologen Andrew Gillis von der Cambridge University schalteten bei Rochenembryos (hier ein eingefärbtes Bild eines bereits weit entwickelten Exemplars) ein Gen namens *sonic hedgehog* aus, das beim Menschen das Wachstum der Finger steuert. Ergebnis: Es spielt eine ähnliche Rolle bei den Kiemenbögen der Knorpelfische. Das deutet darauf hin, dass sich seitliche Flossenpaare – die Vorläufer unserer Gliedmaßen – aus den Kiemenbögen urtümlicher Knorpelfische entwickelt haben könnten. Für die bereits im 19. Jahrhundert formulierte These fehlen bislang fossile Beweise.

Development 143: S. 1313–1317, 2016

EVOLUTION

Männchen oder Weibchen?

Bei einer australischen Echse richtet sich das Geschlecht nicht immer nach den Chromosomen: Dann gibt die Bruttemperatur den Ausschlag. Damit fordert diese Bartagame Evolutionsforscher heraus.

VON JAMES J. BULL

Die Regeln, nach denen sich entscheidet, ob ein Nachkomme Männchen und Weibchen wird, variieren zwischen Wirbeltieren offenbar noch stärker als bislang angenommen. Die Streifenköpfige Bartagame – *Pogona vitticeps* – nutzt dafür gleichzeitig zwei völlig verschiedene Mechanismen, die eigentlich nicht zusammenzupassen scheinen. Das entdeckte eine Forschergruppe um Clare E. Holleley von der University of Canberra (*Nature* 523, S. 79–82, 2015). In ihren langjährigen Feld- und Laborstudien zeigte sich, dass dieses Eier legende Reptil aus dem Inneren Australiens zwar zwei verschiedene Geschlechtschromosomen besitzt, sich daran während der Reifung im Ei aber nur bedingt orientiert. Denn manchmal gibt trotzdem, wie bei einer Reihe anderer Reptilien, die Außentemperatur den Ausschlag dafür, welches Geschlecht das Tier im Ei entwickelt – allerdings nur bei den Weibchen.

Bis vor 50 Jahren galt als Lehrmeinung, dass im Lauf der Evolution der Wirbeltiere der genetische Einfluss auf die Geschlechtsausprägung wuchs. Zuerst war diese demnach stark von äußeren Faktoren wie der relativen Körpergröße oder der Umgebungstemperatur abhängig. Solche Phänomene finden sich etwa bei Fischen. Erst mit der Zeit hätten sich zwei verschiedene für das Geschlecht maßgebliche Chromosomen herausgebildet, von denen eines zudem schrumpfte und dabei vorwiegend geschlechtsbestimmende Merkmale behielt. Bei Vögeln besitzen die Weibchen zwei ungleiche Chromosomen, bei den Säugetieren die Männchen. Nach jener alten Auffassung wurden die beiden Geschlechtschromosomen im Zuge der »Höherentwicklung« bei den jüngeren Wirbeltierklassen immer bestimmender und wichtiger:

Während die Fische noch recht flexible, eher umweltbedingte Mechanismen anwandten, verlegten sich die Säugetiere und die Vögel auf ziemlich starre genetische Regelungen. Und die Reptilien passten angeblich irgendwo dazwischen.

Aber in den folgenden Jahrzehnten stellte sich heraus, dass es viele Reptilien gibt, die streng auf Geschlechtschromosomen setzen – während sich andere Arten vollständig nach der Bruttemperatur richten, anscheinend ohne sich dabei im Mindesten um genetische Vorgaben zu kümmern. Wie wir damals staunend erkannten, erfüllen beide Ausprägungen grundlegende evolutionäre Anforderungen: Sie erlauben eine effiziente Anpassung an die Gegebenheiten. Es handelt sich also keineswegs um verschiedene Stufen einer fortschreitenden Entwicklung, sondern einfach um alternative Zustände. Aus beiden Systemen könnte im Verlauf der Evolution theoretisch die jeweils andere Form hervorgehen. Sie könnte sogar mehrmals dazwischen wechseln. Bislang kannten wir bei Reptilien allerdings nur Arten, die ausschließlich einem der beiden Mechanismus folgen. Es gab kein Beispiel für einen Wechsel oder einen Übergangszustand.

Zustand auf der Kippe

Die australische Bartagame aber vereint beide Systeme und könnte einen Zustand auf der Kippe zwischen den beiden Mechanismen repräsentieren. *Pogona vitticeps* besitzt äußerlich gut unterscheidbare Geschlechtschromosomen. Und zwar haben die meisten Weibchen verschiedene – Z und W genannt –, während alle Männchen zwei Z-Chromosomen aufweisen, ein ähnliches Muster wie bei Vögeln. Jedoch brachten die Feldforschungen zu Tage,

dass auch fast ein Fünftel der Tiere mit zwei Z-Chromosomen Weibchen sind. Genetisch wären diese eigentlich Männchen. Als die Forscher daraufhin Eier im Labor ausbrüteten, stellten sie fest: Unterhalb einer Bruttemperatur von etwa 28 Grad werden ZZ-Tiere Männchen; darüber entstehen aus ihnen auch Weibchen – und zwar zunehmend mehr mit steigender Wärme.

Wie aber sind die beiden Systeme miteinander vereinbar? Schließlich wären zwei schwer wiegende negative Folgen für die Population denkbar. Erstens: Würden sich auch ZW-Embryonen teils temperaturabhängig entwickeln und entstünden dadurch ZW-Männchen, dann gäbe es unter den Nachkommen von ZW-Männchen und ZW-Weibchen unfruchtbare oder nicht lebensfähige WW-Tiere, falls das W-Chromosom viele seiner Gene verloren hätte, wie es bei unserem Y-Chromosom der Fall ist. Das geschieht aber nicht; ZW-Echsen sind immer Weibchen.

Zweitens: Wie begegnen die Agamen einem hohen Weibchenüberschuss in der Population? Der Anteil des W-Chromosoms unter den Tieren würde bei vielen ZZ-Weibchen automatisch immer niedriger, weil nur die ZW-Weibchen es weitervererbten. Also gäbe es im Gegenzug immer weniger ZW-Weibchen. Dann würden sich die Verhältnisse allmählich hin zu einer rein wärmebedingten Geschlechtsbestimmung verlagern. Offenbar herrschen für *Pogona vitticeps* aber bislang Temperaturen, bei der beide Formen der Geschlechtsbestimmung nebeneinander zum Zuge kommen, so dass stets nur ein Teil der Weibchen zwei Z-Chromosomen aufweist. Vorausgesetzt, die Umweltbedingungen bleiben dafür weiter günstig, könnte sich das derzeitige Gleichgewicht beliebig lange erhal-



MITFOLGEN VON ARTHUR GEORGE, UNIVERSITY OF CANBERRA

Die gut einen halben Meter lange Streifenköpfige Bartagame (*Pogona vitticeps*) lebt in eher trockenen Gegenden im östlichen Zentralaustralien. Drohende Tiere spreizen ihren »Bart« ab, der dann schwarz wird.

ten. Wie die Forscher jedoch zeigten, steht die Balance zwischen den beiden Mechanismen auf einem sehr schmalen Grat, denn oberhalb von 32 Grad Celsius entwickeln sich bereits sehr viele ZZ-Tiere zu Weibchen.

Zu dieser Beobachtung passen weitere Daten derselben Forscher. Kinder von ZZ-Müttern, die alle zwangsläufig zwei Z-Chromosomen besitzen, werden bereits bei einer etwas niedrigeren Nesttemperatur vermehrt zu Weibchen als ZZ-Kinder von ZW-Müttern. Das könnte bedeuten: Die Empfänglichkeit für die Bruttemperatur variiert zwischen den Individuen. Wer genetisch eher dafür prädisponiert ist, ein ZZ-Weibchen zu werden, dessen ZZ-Kinder sind es ebenfalls. Und überraschenderweise haben ZZ-Weibchen deutlich mehr Nachkommen als ZW-Weibchen. Bislang können die Forscher dies nicht erklären. Sie müssen nun herausfinden,

wieso eine temperaturabhängige Geschlechtsbestimmung unter manchen Bedingungen anscheinend die günstigere Option darstellt.

Zukünftig sind ähnliche Untersuchungen an weiteren Reptilien zu erwarten. Insbesondere werden viele Wissenschaftler herausfinden wollen, wie derart verschiedene Formen der Geschlechtsbestimmung einander in der Evolution ablösen können. Vergleiche des Fortpflanzungserfolgs von ZZ- und ZW-Weibchen, die bei der gleichen Temperatur erbrütet wurden, dürften erhellend, welche Vorteile die beiden Systeme jeweils bieten. Sie könnten sogar verstehen helfen, welche Nachteile die Degeneration eines Geschlechtschromosoms möglicherweise verursacht.

Eine weitere Frage lautet: Wie reagieren die Tiere auf Klimaveränderungen? Eigentlich müsste sich dann ein etabliertes Gleichgewicht rasch verändern.

Die Zustände könnten sogar umschlagen. Denn wenn in warmen Jahren besonders viele ZZ-Weibchen heranwachsen, würden danach und in den Folgegenerationen umso weniger ZW-Weibchen schlüpfen. Holleley und ihre Kollegen fürchten in dem Zusammenhang die möglichen Folgen einer Klimaerwärmung. Im Extremfall würde die Art aussterben, wenn keine Männchen mehr aufträten. Doch berichten sie von einem ZZ-Weibchen, aus deren Eiern selbst bei hohen Nesttemperaturen ausschließlich Männchen schlüpfen. Die Forscher werten dies als Anzeichen dafür, dass auch die Empfänglichkeit der Brut für Wärme Evolutionseinflüssen unterliegt.

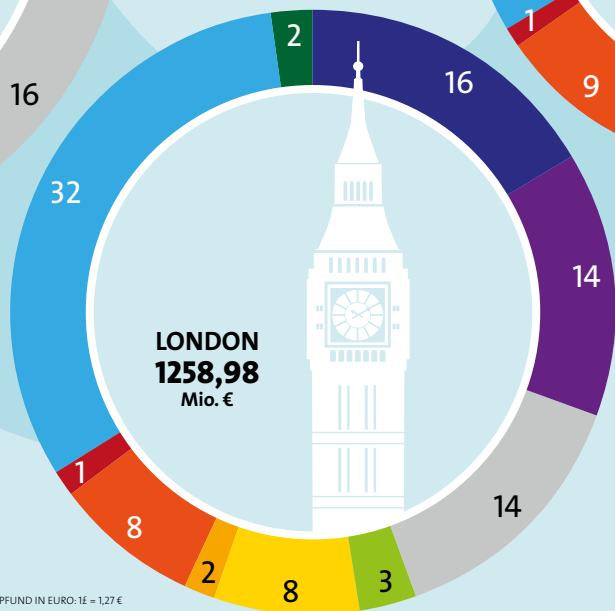
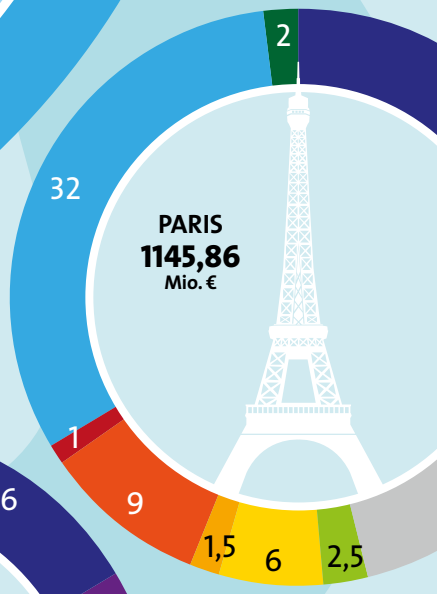
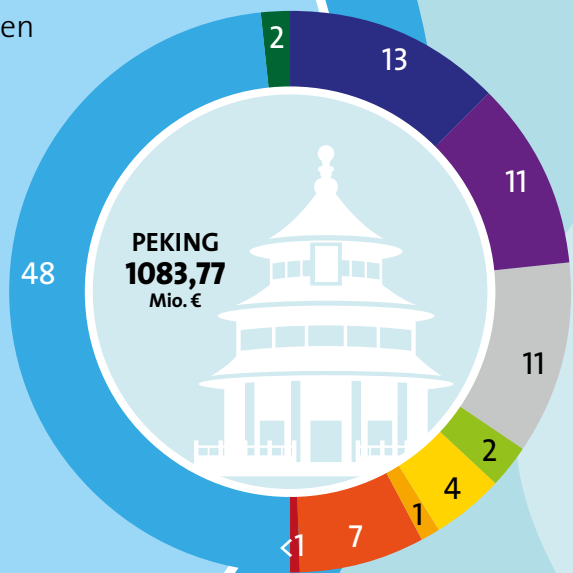
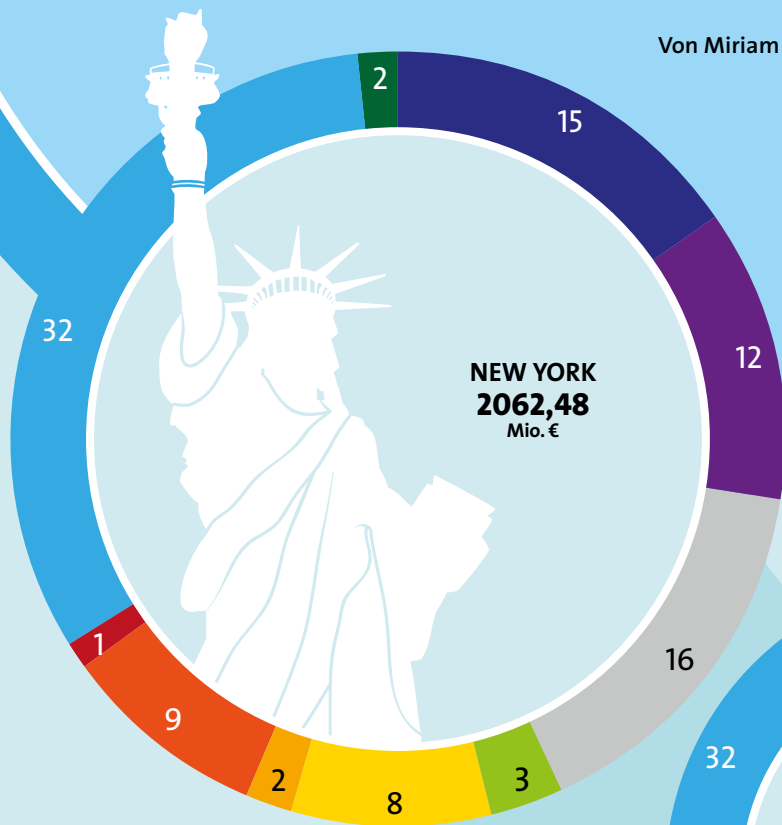
James J. Bull hat an der University of Texas in Austin die Johann-Friedrich-Miescher-Regents-Professur für Molekularbiologie inne. Schon 1983 verfasste er ein Werk über die Evolution von Geschlechtsbestimmungsmechanismen.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature 523, S. 43–44, 2. Juli 2015

Forschung in Zahlen: Klimaschutz in Megastädten

Wie bereiten sich die weltweit größten Städte auf die Folgen des Klimawandels vor, und wofür investieren sie dabei am meisten? Forscher um Lucien Georgeson vom University College London fassten zusammen, wie viel Geld zehn Megastädte in einzelne Wirtschaftszweige zur Anpassung an den Klimawandel und zum Schutz vor Klimakatastrophen 2014 und 2015 ausgaben (*Nat. Clim. Change* 10.1038/nclimate2944, 2016). Weltweit wurden dafür 283 Milliarden Euro aufgebracht; das entspricht 0,38 Prozent des globalen Bruttoinlandsprodukts. Die Forscher kritisieren, dass in Entwicklungsländern die Städte deutlich weniger Geld in Anpassungen stecken als in Industrieländern.

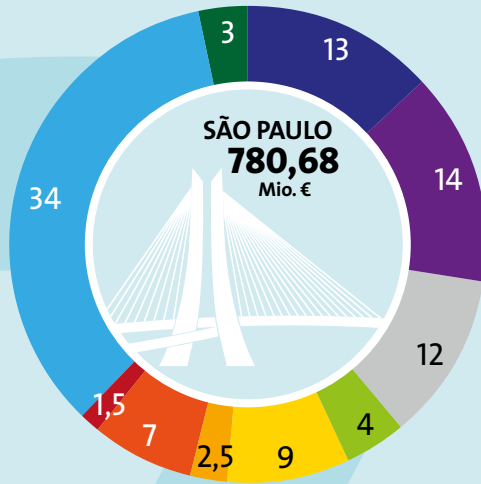
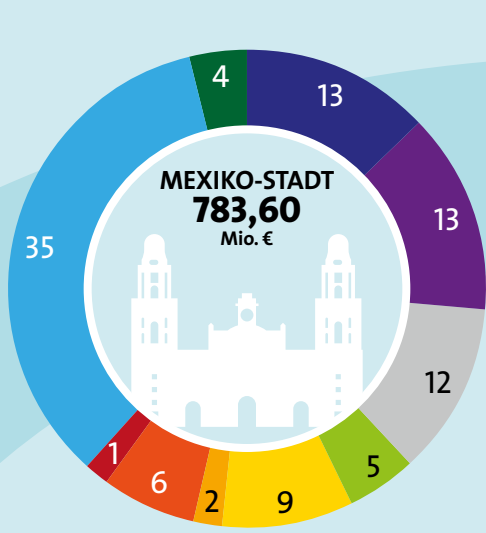
Von Miriam Plappert



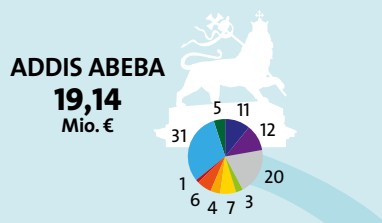
Ausgaben für den
Katastrophenschutz:
0,25 – 27,1 Mio. €

UMRECHNUNGSKURS PFUND IN EURO: 1£ = 1,27 €

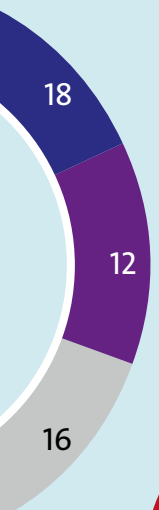
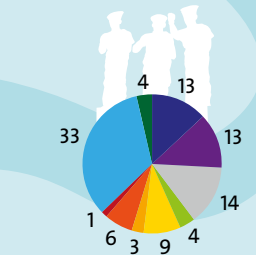
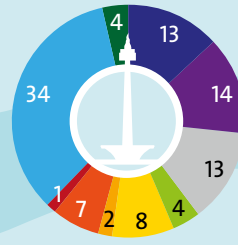
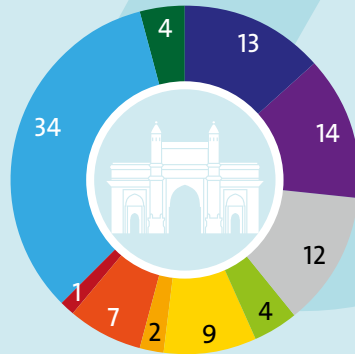
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ANKE HEINZELMANN UND MIRIAM PLAPPERT, NACH: GORGEON, L. ET AL.: ADAPTATION RESPONSES TO CLIMATE CHANGE DIFFER BETWEEN GLOBAL MEGACITIES. IN: NATURE CLIMATE. 2016. DOI: 10.1038/nclimate2944. FOTOLIA / BAHRAM



€
Peking gab zirka 0,33 % des Bruttoinlandsprodukts aus, Addis Abeba 0,14 %.



Pro Kopf investierte New York rund 245,6 €, Addis Abeba etwa 6 €.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ANNE HEINZELMANN UND MERIAM SIEBERG / DEUTSCHE WISSENSCHAFTS-ANSTALT LEIPZIG
CLIMATE CHANGE DIFFER BETWEEN GLOBAL MEGACITIES: IN: NATURE
BARRY: SÃO PAULO: FOTOLIA / LISAKOLPASA; MUMBAI: FOTOLIA / LAGOS: ADDIS ABEBA: FOTOLIA / JEFF BIRD

GEOPHYSIK

Aufstieg vom Rand des Erdkerns

Eine neue Methode zur Abbildung des Erdinnern zeigt erstmals, wie säulenartige Strömungen von heißem Gestein den gesamten Erdmantel durchziehen.

VON ERIC HAND

Schon seit Jahrzehnten wogt der Streit um den Ursprung der Hotspots. An diesen vulkanischen Regionen, von denen mehrere Dutzend über den Globus verteilt sind, ist die Erdkruste aufgewölbt, als würde glühendes Material unerbittlich von unten dagegen drücken. Als Ursache vermuten viele Geowissenschaftler so genannte Plumes: Ströme heißen Gesteins, das aus Tiefen von 3000 Kilometern säulenartig aufsteigt.

Für diese Vorstellung sprechen physikalische Modelle, wonach sich solche Plumes wie Blasen in einem Topf mit kochendem Wasser spontan im Erdmantel bilden sollten, wenn er vom Erdkern darunter aufgeheizt wird. Au-

ßerdem haben Seismologen, die anhand von Erdbebenwellen tomografische Aufnahmen des Erdinneren erstellen, in den oberen Mantelregionen Hinweise auf die heißen Gesteinssäulen gefunden. Doch solange nicht nachgewiesen war, wie tief sie hinabreichen, bezweifelten einige Geophysiker, dass sie wirklich an der Grenze zum Erdkern entstehen, und hielten einen Ursprung weiter oben für genauso denkbar, ja sogar wahrscheinlicher.

Klärung einer alten Streitfrage

Eine neue Untersuchung dürfte die alte Streitfrage nun endgültig entschieden haben. Mit einer raffinierten Methode,

die den seismografischen Aufzeichnungen bislang verborgene Details entlockt, fanden Forscher klare Hinweise auf 28 Plumes – die meisten unter vulkanischen Hotspots –, die sich ohne Unterbrechung senkrecht bis zum Erdkern erstrecken (Bild rechts unten). »Wenn sich unsere Ergebnisse als stichhaltig erweisen, setzen sie den Schlussstrich unter die Debatte«, erklärt Barbara Romanowicz, Geophysikerin an der University of California in Berkeley, welche die Untersuchung zusammen mit ihrem Kollegen Scott French veröffentlicht hat (*Nature* 525, S. 95, 2015).

Doch die Studie birgt auch Überraschungen. So sind die Plumes demnach

Röhrensystem in der Tiefe

So genannte Mantelplumes sind nach einer neuen Untersuchung unerwartet dick und entspringen direkt dem Erdkern. Folgendes wissen Geologen nun über diese Säulen aus aufsteigendem heißem Gestein im Erdmantel:

1. Abkühlung des Erdkerns

Weil die Plumes so breit sind und geradlinig vom Erdkern ausgehen, könnten sie mehr Wärme von dort abführen als Konvektionsströmungen, die bisher als wichtigste Wärmetransporter galten.

2. Quelle der Plumes

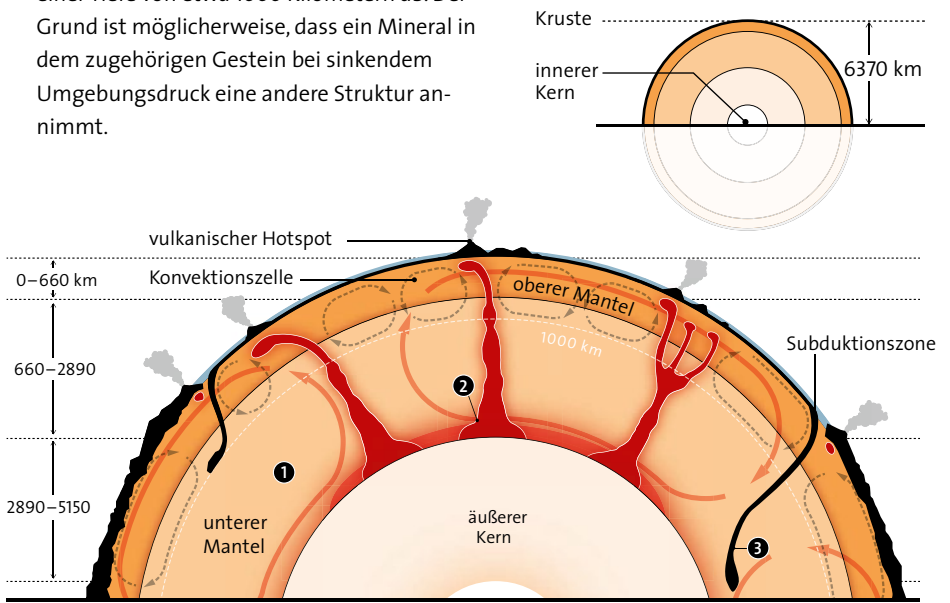
Viele Plumes entspringen in »ultra low velocity zones«, Bereichen mit sehr geringer seismischer Geschwindigkeit, in denen sich womöglich teilweise geschmolzenes Gestein mit hohem Eisenanteil befindet.

3. Tief gesunkene Krustenstücke

Teile ozeanischer Erdkruste, die an Subduktionszonen abgetaucht ist, könnten bis hinab an den Rand des Erdmantels gelangen, wo sie eventuell Material für die Mantelplumes liefern.

4. Abknickende Säulen

Einige Plumes wie der unter Hawaii knicken in einer Tiefe von etwa 1000 Kilometern ab. Der Grund ist möglicherweise, dass ein Mineral in dem zugehörigen Gestein bei sinkendem Umgebungsdruck eine andere Struktur annimmt.



ALBERTO CUADRA / SCIENCE; HAND, E.: MANTLE PLUMES SEEN RISING FROM EARTH'S CORE. IN: SCIENCE 349, S. 1032-1033, 2015; ABRUCK GENEHMIGT VON AAAS-SCIENCE / CCC

600 bis 800 Kilometer breit – mehr als das Dreifache des Werts, der sich aus einfachen Modellen ergibt. Das bedeutet, dass sie mehr Wärme vom Erdkern abführen können als bisher gedacht. Außerdem verlaufen auch ihre tiefsten Abschnitte schnurgerade, unbeeinflusst vom mutmaßlichen Zirkulieren des zähplastischen Gesteins im unteren Mantel. »Es sieht ganz danach aus, als müssten wir unsere Vorstellungen von den Vorgängen an der Grenze zum Erdkern überdenken«, meint Romanowicz.

Andere Forscher äußern sich anerkennend. »Die tomografische Analyse ist eine Glanzleistung«, lobt der Geodynamiker Peter van Keken von der University of Michigan in Ann Arbor. »Was zuvor noch recht verschwommen aussah, zeigt sich nun viel konturierter.« Allerdings wundert sich der Forscher, dass die Plumes oberhalb einer Tiefe von rund 1000 Kilometern teils nicht mehr gerade verlaufen, sondern abbiegen und seitlich versetzt ihren Aufstieg fortführen. Seiner Ansicht

nach könnte das eine Zustandsänderung des Materials widerspiegeln, die es bei abnehmendem Druck und sinkender Temperatur weniger steif werden lässt.

Schärfere »Aufnahme« des Erdmantels

Was die überraschende Dicke der Plumes betrifft, so passt sie laut van Keken zu den sich mehrenden Hinweisen, wonach die aufsteigenden heißen Gesteinssäulen eine andere Zusammensetzung haben als der umgebende Mantel. »Wenn sich in einem Plume an der Kern-Mantel-Grenze dichteres basaltisches Material ansammelt«, so der Wissenschaftler, »dann verringert das den Auftrieb und führt zu einer Verbreiterung.«

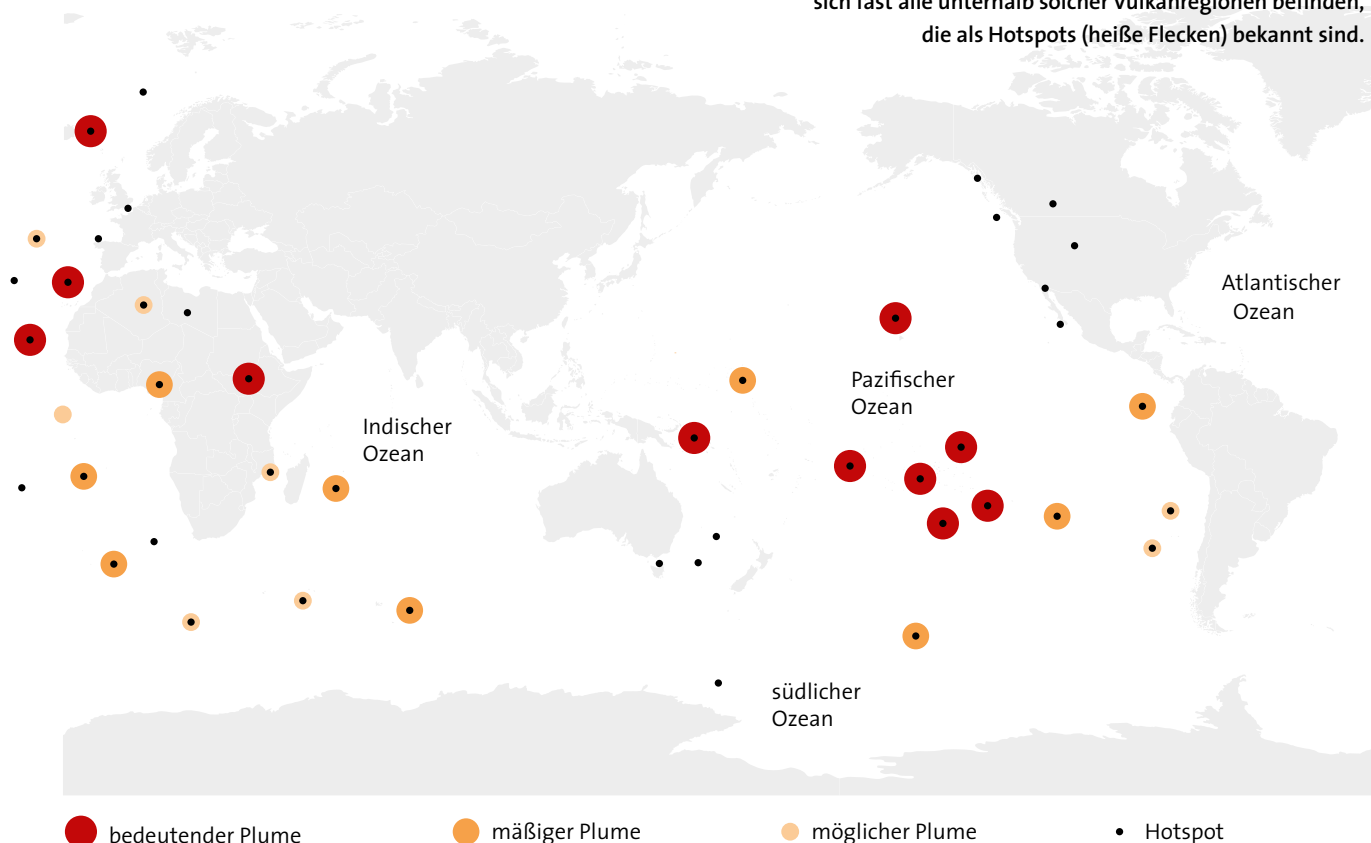
Nach Aussage von Guust Nolet, einem emeritierten Geophysiker von der Université Nice Sophia Antipolis (Frankreich), haben auch frühere Untersuchungen schon die Existenz von Plumes in großen Tiefen nahegelegt.

Die neue Studie liefere jedoch ein schärferes Bild. Das gelte vor allem für die obersten und untersten Bereiche des Erdmantels.

Nolet glaubt, dass die größere Dicke der Plumes neue Einsichten in die Wärmeabgabe aus dem Erdinneren vermittelt, die auf etwa 44 Terawatt geschätzt wird. Die Hälfte davon stammt nach Lehrbuchmeinung aus dem Zerfall radioaktiver Elemente, während es sich bei der anderen Hälfte um noch im Kern gespeicherte Restwärme aus der Entstehungszeit unseres Planeten handelt. Bisher dachten die Geophysiker, dass diese Wärme hauptsächlich durch Konvektion abgeführt wird, also durch die walzenartige Zirkulation von Gestein. »Das müssen wir nun wohl revidieren und den Plumes eine viel wichtigere Rolle zuschreiben«, erklärt Nolet. »Vielleicht gibt es im unteren Mantel überhaupt keine Konvektion.«

Die neuen Ergebnisse beruhen auf einer weiterentwickelten Form der seismischen Tomografie. Bei starken Erdbe-

Weltweite Verteilung von Plumes und Hotspots



SCIENCE NACH: FRENCH, S.W. ET AL.: BROAD PLUMES ROOTED AT THE BASE OF THE EARTH'S MANTLE BENEATH MAJOR HOTSPOTS. IN: NATURE 525, S. 95-99, 2015. FIG. 4 | HAND. E.: MANTLE PLUMES SEEN RISING FROM EARTH'S CORE. IN: SCIENCE 349, S. 1032-1033, 2015; ABRUCK: GENE HINGT VON AAAS-SCIENCE / CCC

ben laufen vom Bebenherd aus seismische Wellen durch das Erdinnere, wo sie an Grenzflächen reflektiert werden und sich verlangsamen, wenn sie auf ungewöhnlich heiße Zonen geringer Dichte treffen, wie Plumes sie darstellen. Durch Vermessung vieler Erdbeben erhält man so ein Bild des Erdinneren.

Ein rechnerischer Kraftakt

Als Messgrößen dienen üblicherweise die Ankunftszeiten der Wellen. Das ist jeweils der Moment, an dem das Seismometer auszuschlagen beginnt. Das neue Verfahren wertet dagegen den gesamten Wellenzug aus, wie er im Seismogramm erscheint. Diese Gesamtwellenformtomografie (full waveform tomography) erfordert allerdings einen enormen Rechenaufwand. Für die Analyse von 273 starken Erdbeben benötigten Romanowicz und French das Äquivalent von drei Millionen Stunden auf einem Supercomputer namens Hopper am National Energy Research Scientific

Computing Center (NERSC) in Berkeley (Kalifornien).

Doch nicht alle sind vom Ergebnis dieses Kraftakts überzeugt. So erachtet die Geophysikerin Gillian Foulger von der University of Durham (England) ihre schon lange gehegten Zweifel an der Hypothese tief reichender Mantelplumes keineswegs für ausgeräumt. Zum einen hält sie die Methode der Gesamtwellenformtomografie noch für unausgereift. Zum anderen bemängelt sie, dass sich die meisten der von Romanowicz und French entdeckten Plumes unter Hotspots in der Tiefsee befinden, wo nur sehr wenige seismische Daten verfügbar sind. »Bei kümmerlicher Datenlage sieht man eine Menge Rauschen«, erklärt sie.

Van Keken hingegen sieht in der Studie einen starken Beleg für die Existenz tief reichender Mantelplumes. »Die Skeptiker sind deutlich in der Minderheit«, meint er. Auch er würde sich allerdings eine höhere Auflösung der

Computermodelle wünschen. Wenn Details mit Abmessungen von 100 Kilometern sichtbar wären, ließe sich zum Beispiel klären, was mit der ozeanischen Kruste geschieht, die an so genannten Subduktionszonen ins Erdinnere abtaucht. Bisher ist offen, ob sie irgendwo mitten im Erdmantel stecken bleibt oder bis hinunter an den Rand des Erdkerns vordringt. Aber eine derart hohe Auflösung lässt sich nur erreichen, wenn die Modelle auch die feinsten Ausschläge – also die hochfrequenten Anteile – in den Seismogrammen berücksichtigen. Das erfordert noch mehr Rechenleistung. »Da brauchen Sie eine Rakete von Computer, sonst kommt Ihr Doktorand nie zu seinem Titel«, beklagt van Keken.

Eric Hand ist Redakteur für Geowissenschaften bei »Science«.

© Science
Science 349, S.1032–1033, 4.9. 2015

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
KOMPAKT

THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Ob A wie Astronomie oder Z wie Zellbiologie: Unsere **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgesuchten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!



€ 4,99
je Ausgabe



Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:
www.spektrum.de/kompakt

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



Riechen per Molekülschwingung

Das Ohr registriert die Schwingungen des Luftdrucks, das Auge die des elektromagnetischen Felds – und die Nase möglicherweise die Schwingungen der Duftmoleküle!

VON MIRIAM PLAPPERT

Wir riechen etwas, wenn sich ein Molekül eines Geruchsstoffs an ein Rezeptorprotein in der Membran einer Riechsinneszelle bindet. Von diesen Geruchsrezeptorproteinen besitzen wir rund 350 verschiedene Sorten – genug, um mehr als eine Billion Gerüche unterscheiden zu können (*Science* 343, S. 1370–1372, 2014). Wieso jeder dieser Rezeptoren jedoch nur die für ihn spezifischen Moleküle andocken lässt und keine anderen, ist noch immer eine unbeantwortete Frage.

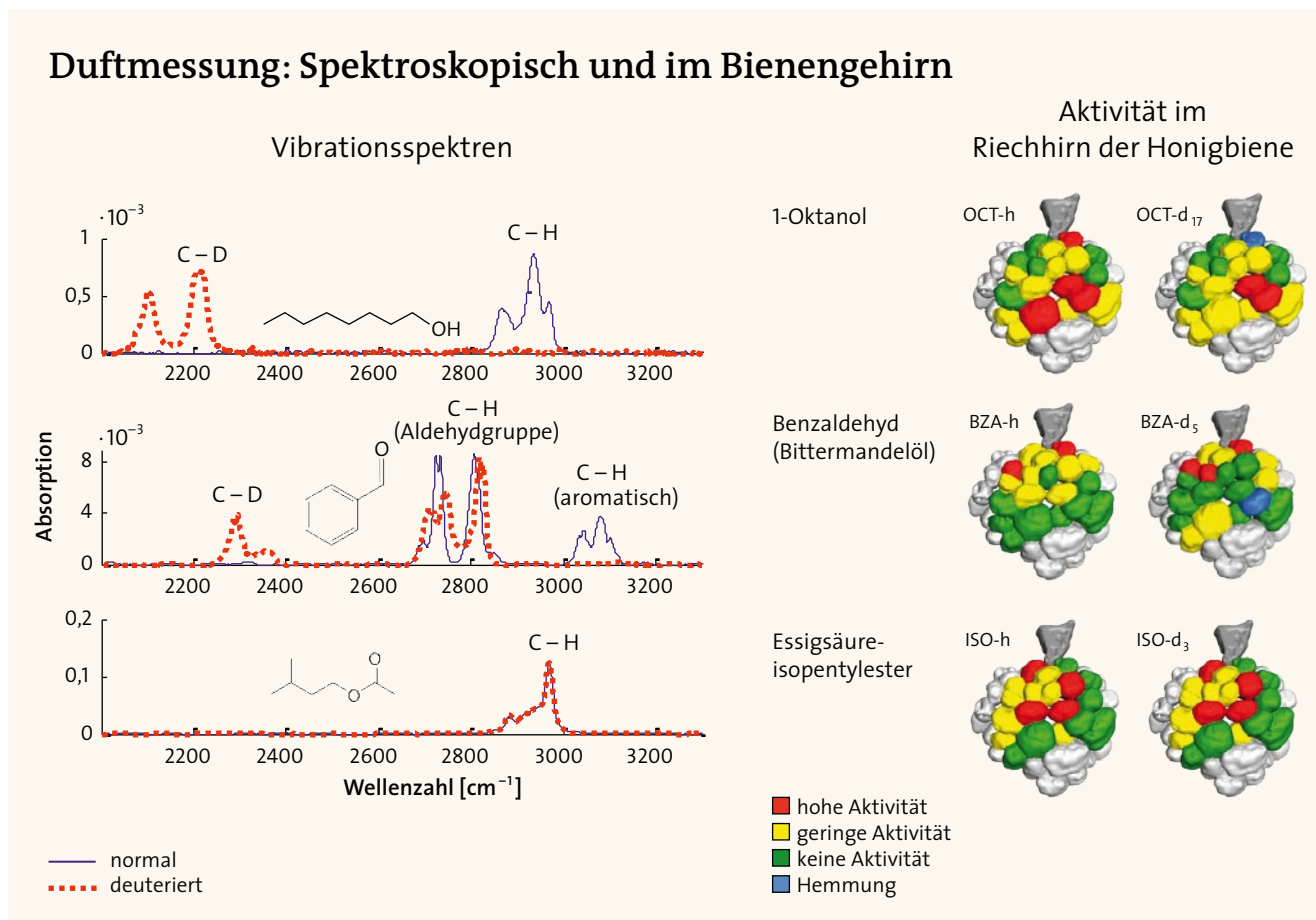
Die wohl gängigste Erklärung ist das Schlüssel-Schloss-Prinzip. Demnach müssen Rezeptor und Duftmole-

kül räumlich genau zusammenpassen. Zusätzlich spielen Ladungsschwerpunkte innerhalb der Atomgruppen und die Wasserlöslichkeit der Moleküle eine Rolle. Diese Theorie stößt jedoch an ihre Grenzen. Beispielsweise erklärt sie nicht, weshalb manche Verbindungen, deren Strukturmerkmale sich über-

haupt nicht ähneln, dennoch gleich riechen. Bislang ist es auch nicht gelungen, den Geruch eines Moleküls auf Grund seiner chemischen Eigenschaften zuverlässig vorherzusagen – ein noch unerfüllter Traum von Parfümherstellern.

Hier könnte eine alternative Theorie weiterhelfen, nach der Geruchsrezept-

Die gewöhnliche und die deuterierte Version von drei Geruchsstoffen unterscheiden sich in ihren Vibrationsspektren (Diagramme links). Zu jedem Stoff ist das Skelett seiner Strukturformel sowie im Einzelfall die vibrierende Bindung angegeben. Für dieselben Geruchsstoffe unterscheiden sich die geruchsinduzierten Erregungsmuster im Riechhirn der Honigbiene (rechts). h bezeichnet die gewöhnliche Version, d die deuterierte; die Zahl gibt die Anzahl der durch Deuterium ersetzt Wasserstoffatome an.



Die Erbmasse wird Rohstoff

Stehen wir an der Schwelle zum »postgenomischen Zeitalter«?

Liegen weiße Champignons längere Zeit im Supermarktregal, werden sie unansehnlich: Sie bekommen braune Flecken und überziehen sich mit unappetitlichem Schleim. Schuld daran ist das Enzym Polyphenoloxidase. Lässt sich seine Entstehung verhindern? Nichts leichter als das.

Mit einer kürzlich entwickelten Technik namens CRISPR-Cas9 gelang es dem Pflanzenforscher Yinong Yang an der Pennsylvania State University, gezielt ein für das unerwünschte Enzym kodierendes Gen auszuschalten. Seine Universität hat das gentechnische Verfahren zur Konservierung weißer Pilze bereits zum Patent angemeldet (*Nature* 532, S. 293, 2016).

Wie das Beispiel zeigt, lässt sich das Erbmaterial mit der CRISPR-Technik in zuvor ungeahnter Weise nach Wunsch manipulieren (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2015, S. 22). Forscher können nun ganz nach Belieben bestimmte DNA-Stücke präzise ausschneiden und durch andere ersetzen. Frühere gentechnische Verfahren brachten das nur eingeschränkt und viel umständlicher zu Wege.

Die nobelpreisverdächtige Entdeckung macht das Erbmaterial vollends zum technischen Rohstoff. Der Gentechniker nimmt da und dort etwas DNA heraus, kombiniert Genabschnitte neu und beobachtet, welche Folgen das hat. Im Prinzip wird es sogar möglich, völlig neuartige Wesen zu kreieren. Die synthetische Biologie verfügt mit CRISPR-Cas9 über ein neues, mächtiges Werkzeug, das sie ihrem Ziel näherbringt, künstliche Lebewesen zu erschaffen.

Schon erheben besorgte Ethikkommissionen moralische Einwände gegen die neue Zaubertechnik, doch angesichts der völlig unabsehbaren Folgen drohen die gängigen Kriterien für Chancen und Risiken zu verschwimmen. Da die Methode in ihrer einfachsten Form – in der sie nur dazu dient, gezielt Gene auszuschalten – ohne den Einbau fremden Erbmaterials auskommt, hat Yinong Yangs Champignon-Bräunungsschutz in den USA vom Department of Agriculture sofort grünes Licht bekommen: Die Behörde stellte die genmanipulierten Pilze einem natürlichen Produkt gleich und sah keinerlei Regulierungsbedarf. Paradoxe Weise wird damit ein methodisch besonders radikaler Eingriff in die Keimbahn genauso behandelt wie eine natürliche Mutation oder ein herkömmliches Züchtungsergebnis.

Vor der Entwicklung der CRISPR-Technik sah der Wissenschaftshistoriker Hans-Jörg Rheinberger ein »postgenomisches Zeitalter« heraufziehen, in dem der vermeintlich naturgegebene Zusammenhang zwischen Erbgut und Organismus Gegenstand genetischer und epigenetischer Manipulation wird. Ein tendenziell völlig disponibles Genom eröffnet tatsächlich fantastische Möglichkeiten für Biologie, Landwirtschaft und Medizin.

Andererseits zeigen Genterapien bisher bestenfalls zwiespältige Resultate. Genveränderte Organismen entwickeln oft Tumoren, genterapierte Versuchspersonen erkranken plötzlich und sterben. Man greift immerhin in ein hochkomplexes System ein, das sich im Lauf der Evolution über geologische Zeiträume hinweg optimiert hat. Die Entfernung eines unerwünschten Genabschnitts stört vielleicht andere, überlebenswichtige Komponenten der Erbmasse.

Warum verfärbt sich eigentlich der weiße Champignon mit der Zeit? Die dafür verantwortliche Polyphenoloxidase erzeugt Substanzen, die für schädliche Mikroorganismen giftig sind. Das heißt, der optisch unschöne Vorgang ist eine Verteidigungsmaßnahme des Pilzes. Wer sie ausschaltet, bekommt zwar appetitlich wirkende Champignons – doch ob die Ware frisch ist oder vergammelt, lässt sich nicht mehr erkennen.



Michael Springer

toren Duftmoleküle an den Schwingungen ihrer Atome erkennen. Seit diese Überlegung in den 1930er Jahren angestellt wurde, beschäftigte sie, trotz einiger Ungereimtheiten, immer wieder die Forscher.

Angedickte Moleküle

Wie könnte ein Rezeptor überhaupt in der Lage sein, die Vibrationen eines Duftmoleküls zu messen? Luca Turin, damals im Fachbereich Anatomie und Entwicklungsbiologie des University College London tätig, hat dazu bereits 1996 einen denkbaren Mechanismus ausgearbeitet. Vereinfacht dargestellt läuft er folgendermaßen ab: Der Rezeptor verfügt über eine taschenartige Bindungsstelle, in die das Geruchsmolekül hineinpasst. Wenn der richtige Duftstoff dort andockt, kann ein vom Rezeptor aufgenommenes Elektron die Eigenschwingung dieses Moleküls anregen. Dabei gibt es überschüssige Energie ab; nur weil es sich daraufhin in einem Zustand niedrigerer Energie befindet, kann es eine Erregungskaskade auslösen, an deren Ende der Nervenimpuls steht. Steckt das falsche Molekül oder gar keines in der Tasche, bleibt dem Elektron dieser Weg versperrt.

Um seine Schwingungstheorie zu überprüfen, ersetzte Turin bei Geruchsmolekülen Wasserstoff durch Deuterium (schweren Wasserstoff). Während der gewöhnliche Wasserstoffkern nur aus einem Proton besteht, enthält der Deuteriumkern zusätzlich ein Neutron. Die durch den Austausch entstandenen »deuterierten Geruchsstoffe« sind chemisch identisch mit dem Original. Ihre Moleküle haben noch immer die gleiche Größe, Form und Oberflächenladung, sind allerdings etwas schwerer und haben dadurch eine deutlich andere molekulare Vibrationsfrequenz. Nach Turins Theorie müssten die deuterierten Varianten also anders riechen. Erkennen die Rezeptoren die Geruchsstoffe hingegen nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip nur an ihrer chemischen Struktur, sollten sie die beiden Versionen nicht unterscheiden können.

Mit Verhaltensstudien an Menschen, Taufliegen und Bienen fanden

Luca Turin und seine Mitstreiter Bestätigungen für ihre Theorie. Andere Wissenschaftler kamen zu gegenteiligen Ergebnissen. Eine heftige Debatte dauert bis heute an und bleibt unauflöst, da Verhaltensversuche oft schwer zu deuten sind.

Jetzt haben Forscher um Marco Paoli von der Universität Trient (Italien) den Sachverhalt erstmals neurophysiologisch untersucht. Die Wissenschaftler untersuchten, was im Gehirn von Honigbienen passiert, wenn man diesen entweder die gewöhnlichen oder die deuterierten Duftmoleküle vorsetzt (*Scientific Reports* 6, 21893 10.1038/srep21893, 2016).

Das Riechhirn der Insekten besteht aus 160 kugeligen Strukturen, den olfaktorischen Glomeruli, die eine erste Verarbeitung der Geruchsinformation vornehmen. Wird ein Glomerulus erregt, steigt die Kalziumkonzentration in seinem Inneren an. Paoli und seine Kollegen stellten fest, dass sich bei drei der vier getesteten Duftstoffe die Erregungsmuster im Riechhirn zwischen der normalen und der deuterierten Variante messbar unterschieden. So reagierten zum Beispiel einzelne Glome-

ruli auf die unveränderte Substanz mit stark ansteigender Kalziumkonzentration, nicht aber auf die Version mit Deuterium. Also können die Geruchsrezeptoren letztere vom Original unterscheiden, schlussfolgern die Forscher.

Duftschwingungen

Zusätzlich ermittelten Paoli und seine Kollegen das Vibrationspektrum der Geruchsstoffe. Ergebnis: Genau die drei deuterierten Moleküle, auf die schon das Riechhirn der Insekten mit unterschiedlichen Erregungsmustern reagiert hatte, schwangen auch anders als ihr Original (siehe »Duftmessung: Spektroskopisch und im Bienenhirn«, S. 17; die Grafik zeigt zwei der drei Stoffe). Auf den vierten Stoff Essigsäureisopentylester, der als künstliches Bananenaroma verwendet wird, antwortete nicht nur das Riechhirn, mit Ausnahme eines einzelnen Glomerulus, bei beiden Varianten gleich, auch die Vibrationsmuster unterschieden sich nicht messbar. Bei dieser Verbindung waren nur drei Wasserstoffatome durch Deuterium ersetzt worden, was die Eigenfrequenz des Moleküls offenbar zu geringfügig veränderte.

Ist also die Vibrationsfrequenz eines Geruchsmoleküls die entscheidende Eigenschaft, auf die ein Rezeptor anspricht? Es sieht zwar so aus, aber Paoli und seine Kollegen wollen einen so weitgehenden Schluss nicht ziehen. Es könnten neben der Vibration auch andere biophysikalische Eigenschaften beteiligt sein. Und selbst dann wäre das Schlüssel-Schloss-Prinzip nicht überholt. Denkbar sei vielmehr, dass zunächst die räumliche Form des Moleküls entscheidet, ob es zu einer Bindung kommt, und erst dann die biophysikalischen Eigenschaften ihre Wirkung entfalten.

Das ließe sich möglicherweise klären, wenn die räumliche Struktur der Rezeptorproteine besser bekannt wäre. Allerdings haben Strukturbiologen Schwierigkeiten damit, die Geruchsrezeptormoleküle so aus der Zellmembran zu isolieren, dass ihre Form erhalten bleibt. Gelänge dies, wäre es möglich zu überprüfen, ob der von Luca Turin vorgeschlagene Mechanismus zutreffen könnte.

Miriam Plappert ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Tübingen.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (vi.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

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer, Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistenz: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Hanna Hillert

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax: -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer,

Andrea Jungbauer, Dr. Andreas Nestke, Christine Kemmet,

Dr. Gerhard Trageser.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

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

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

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

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist

Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschafts-

kommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-;

im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten

(gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland:

€ 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement

(Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank

Stuttgart, IBAN: 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

SdW 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 Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 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.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven

Inchcombe, Executive Vice President: Michael Florek



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



Warum träumen wir?

Gut ein Viertel unseres Lebens verbringen wir im Traum. Haben die flüchtigen Bilder und Szenen eine Funktion, oder sind es nur Leerlaufprodukte des Gehirns? Neue Forschungsergebnisse weisen auf wichtige Aufgaben des nächtlichen Kopfkinos hin.

Von Isabelle Arnulf

Viele Träume wirken wie ein buntes Sammelsurium von zusammenhanglosen Szenen – eine sinnlose Abfolge von Erlebnissen, Eindrücken und Gefühlen. Seit über 100 Jahren möchten Psychologen und Neurowissenschaftler die Gedankenwelt im Schlaf ergründen. Doch nach wie vor ist das schwierig, und zwar nicht nur wegen der oft mangelnden Logik von Träumen, sondern vor allem auch deswegen, weil es meistens nicht möglich ist, mit dem Schlafenden zu kommunizieren.

Um doch Blicke hinter diesen Vorhang zu erhaschen, kombinieren Forscher verschiedenste Messungen. Während einer solchen Polysomnografie werden zugleich mit einem EEG – den am Schädel abgegriffenen Hirnströmen – eine Reihe anderer Verhaltens- und physiologischer Parameter aufgezeichnet, darunter Augenbewegungen, Muskeltonus, Herzrhythmus und Atemvolumen sowie Bewegungen der Finger und Gliedmaßen. Bereits vor über 50 Jahren stellte sich hierdurch heraus, dass die einzelnen Schlafzyklen grob aus zwei verschiedenen Phasen bestehen: aus Abschnitten mit eher langsamen, großen Hirnwellen, die sich ihrerseits in mehrere Leicht- und Tiefschlafstadien gliedern; und Episoden des so genannten paradoxen Schlafs mit schnellen, niedrigen Wellen, der wegen der dabei auftretenden raschen Augenbewegungen (englisch: rapid eye movements) auch REM-

Schlaf heißt. Die Abschnitte mit langsamen Wellen werden demgegenüber NichtREM-, NREM- oder orthodoxer Schlaf genannt. Zunächst hieß es, Träume würden nur während des paradoxen Schlafs auftreten. Das ist längst widerlegt.

Bei der ältesten und einfachsten Methode der Traumforschung wacht die Person von selbst auf und erzählt gleich ihren Traum, bevor er verblasst. Oder sie führt Tagebuch, beziehungsweise malt die erinnerten Szenen, alles sofort nach dem Aufwachen. Heutzutage benutzen Menschen dazu auch gern Smartphones. Solche Berichte werden in umfangreichen Traumdatenbanken gesammelt und sortiert, wie in der von William Domhoff von der University of California in Santa Cruz mit über 20 000 Einträgen in verschiedenen Sprachen. Ein Ordner enthält zum Beispiel die Träume von 120 Grundschulkindern einer Schule in San Francisco an einem bestimmten Tag. Ein anderer umfasst über 4000 Träume einer Frau namens Barbara aus 30 Jahren.

Indianer sind nicht besonders aggressiv

Analysen solcher Datenbanken ergaben einige aufschlussreiche Muster (siehe »Statistik von Traumgehalten«, S. 24). Demnach enthalten Träume etwa doppelt so viel negative wie positive Gefühle, also mehr Angst, Wut oder Scham als Freude, Glück und Lust. Sexuelle Empfindungen sind wider Erwarten selten. Anhand der Datenbanken lassen sich auch Träume von Kindern und Erwachsenen, von Blinden und Sehenden oder von gelähmten und bewegungsfähigen Personen vergleichen. So wies Domhoff 2008 nach, dass Indianer vom Stamm der Navajo im Traum entgegen der Erwartung keine ausgeprägtere Aggressivität erleben als Schweizer, dass sie dabei jedoch stärker den Körper einsetzen und die Schweizer mehr Worte. Eher zu unserer Vorstellung passt ein Befund der dänischen Neurobiologin Amani Meaidi von 2014, wonach die Träume Blinder mehr Hör- und taktile Eindrücke enthalten als die Sehender.

Leider hat die Methode, Träume nach dem Aufwachen aufzuzeichnen, ihre Grenzen. Das Erinnerungsvermögen und auch die Genauigkeit sind naturgemäß eingeschränkt und überdies individuell sehr verschieden. Männer erinnern sich im Schnitt weniger als Frauen, und kreative Personen

AUF EINEN BLICK

SCHULUNG IM SCHLAF

1 Traumforscher erkunden Schlaferlebnisse mit modernsten Techniken und vielerlei Tricks. Zum Beispiel beobachten sie **Hirnaktivitäten** bezüglich Intelligenzaufgaben oder kommunizieren mit **Klarträumern** über deren Zeitempfinden.

2 Entgegen früheren Beobachtungen träumen Menschen in allen Phasen des Schlafs. Typischerweise begegnet man im **Tiefschlaf** Situationen, vor denen man fliehen möchte, während man sich im **paradoxen Schlaf** gegen Angriffe wehrt.

3 Träume trainieren so den Umgang mit Gefahren, negativen **Emotionen** – und soziale Begegnungen. Sie bereiten uns auf **zukünftige Herausforderungen** vor.

Nicht nur bei Schlafstörungen, auch zu Forschungszwecken werden so genannte Polysomnografien durchgeführt. Der Patient oder Proband wird an eine Anzahl Messgeräte angeschlossen, die ein EEG der Hirnströme aufzeichnen oder wie hier sogar Magnetresonanzaufnahmen der Hirnaktivität des Schlafenden erstellen. Zusätzlich erfassen Forscher Gesichtsmimik und Augenbewegungen sowie je nach Bedarf verschiedenste weitere Körperfunktionen und Bewegungen.

MIT FRDL. GEN. VON MARCELLO MASSIMINI, UNIVERSITÄT MAILAND



mehr als andere. Allerdings lässt sich dies durch Training verbessern. Dennoch ist die Traumaubeute lange nicht so gut, als wenn man jemanden aus dem Schlaf reißt und direkt befragt.

Zum Glück für die Traumforschung bleiben Schlafende nicht völlig bewegungs- und ausdruckslos. Mindestens 70 Prozent reden manchmal, wenn auch höchstens einer von hundert jede Nacht. Damit ist der Mensch übrigens nicht allein. Hunde geben kurze Laute von sich, die an Bellen oder Jagen erinnern, Pferde wiehern leise, manche Sittiche zwitschern ganz zart. Bereits der französische Naturforscher Georges-Louis Leclerc de Buffon (1707–1788) wusste, dass Nachtigallen im Traum gedämpft singen. 2011 zeigten Dorothee Kremers und ihre Kollegen von der Université de Rennes, dass schlafende Delfine, die im Zoo lebten, Walgesang wiedergaben, den sie in ihrer Umgebung gehört hatten.

Was Menschen im Schlaf sagen, pflegt recht gut zu dem zu passen, was sie nach dem Aufwachen erzählen, und entspricht offenbar ihren eigenen Äußerungen im Traum. Die folgende Aufzeichnung von einem Mann in unserem Schlaflabor zeigt, wie er in einer geträumten Unterhaltung nur sei-

Die Mär vom speziellen Traumschlaf

Ein weit verbreiteter Irrtum besagt, wir träumten nur während des paradoxen oder REM-Schlafs. Dieser zeichnet sich aus durch typische rasche Augenbewegungen, die den Eindruck erwecken, als würde man einen inneren Film ansehen. Zwar berichten Menschen, die in dieser Phase geweckt werden, in 80 Prozent der Fälle, sie hätten gerade geträumt. Aber auch beim langsamwelligen NichtREM-Schlaf sind es immerhin 50 Prozent. Der amerikanische Psychologe David Foulkes zeigte schon Anfang der 1960er Jahre, dass auch im NichtREM-Schlaf lange Träume mit komplexen Szenarien auftreten. Das gilt sogar für ein kurzes Nickerchen, bei dem normalerweise kein REM-Stadium vorkommt. Auch wenn man den REM-Schlaf medikamentös während der ganzen Nacht unterdrückt, haben die Menschen Träume, wie wir 2012 nachwiesen.

Anscheinend steht die geistige Aktivität im Schlaf niemals still. Doch offenbar bleibt sie verschieden gut im Gedächtnis. Einer Arbeit von Luigi De Gennaro von der Sapienza – Università di Roma von 2011 zufolge erinnert man sich besser, wenn bestimmte Hirnwellen kurz vor dem Aufwachen sehr intensiv sind. Die gleichen Wellen begünstigen das Lernen im Wachzustand.

Die Traumhalte während der verschiedenen Schlafzustände unterscheiden sich allerdings qualitativ, sicherlich wegen der anderen Hirnaktivität. So treten im paradoxen Schlaf stärkere Gefühle auf. Die Amygdala, ein Emotionszentrum, ist in diesem Zustand oft auffallend aktiv.

nen eigenen Part äußert: »Mit deinen Problemen hab ich ein Problem, das ist dein Problem, das musst du selbst packen ... (Pause) ... Wenn es dir nicht passt, dann geh! ... (Pause) ... Du hast mich fast angegriffen ... (Pause) ... Das darfst du nie wieder machen, bei mir bin ich der Chef.«

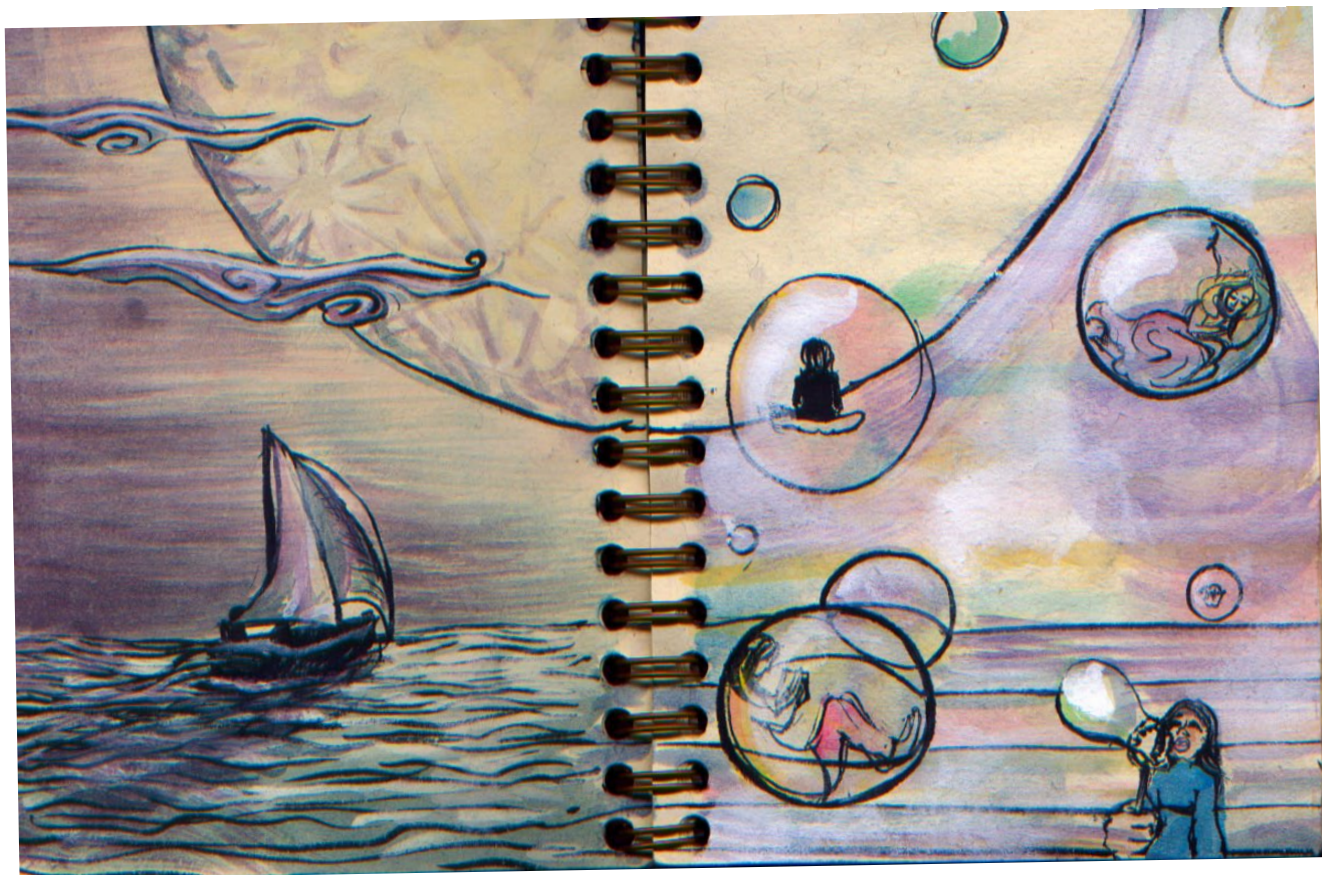
Wenn die Augen im Traum so tun, als hätten sie wirklich etwas zu betrachten

Typisch sind teilweise auch bestimmte kleine Bewegungen: Unter den geschlossenen Lidern gehen die Augäpfel hin und her; die Trommelfelle zucken wie beim Hören; der Penis erfährt eine leichte Erektion; die Finger regen sich; diverse Gesichtsmimik tritt auf. Nicht alles davon passt zum Trauminhalt. So ist die Erektion einfach ein Automatismus ohne Bezug zum Traumgeschehen. Man weiß beispielsweise, dass Zuckungen von schlafenden Neugeborenen vom Hirnstamm ausgehen. Das Minenspiel insbesondere kann jedoch den erlebten Gefühlen entsprechen. Ein Lächeln mag also tatsächlich ein Glücksgefühl im Traum spiegeln, ein Runzeln der Brauen Verärgerung. Diese Zusammenhänge sind bisher allerdings wenig erforscht. Immerhin haben Thomas Andrillon vom französischen Forschungszentrum CNRS in Paris und seine Kollegen 2015 nachweisen können, dass bei Augenbewegungen im Schlaf das Gehirn genauso aktiv ist, als würde eine reelle Szene betrachtet.

Bestehen keine krankhaften Störungen, beschränkt sich das sicht- und hörbare Verhalten im Schlaf auf Mimik, Sprechen und leichte Bewegungen. Anders ist das beim Schlafwandeln, das besonders im Kindesalter auftritt, aber auch noch bei Erwachsenen vorkommen kann. Typischerweise richtet sich die Person mit offenen Augen auf oder verlässt sogar das Bett, redet konfus, oft ängstlich, und tut scheinbar irgendetwas Bestimmtes. Sie macht zum Beispiel Bewegungen, als würde sie ein Auto reparieren. Eine heftige Form ist der Pavor nocturnus, auch Nachtschreck oder Nachtangst genannt: Betreffende schrecken hoch, häufig schreiend, und versuchen, aus dem Bett zu entkommen. Wachen sie auf, sind sie meist minutenlang nicht ansprechbar. Schlafwandeln betrifft den NichtREM-Schlaf. Ihm können Stress, aber auch genetische Besonderheiten zu Grunde liegen.

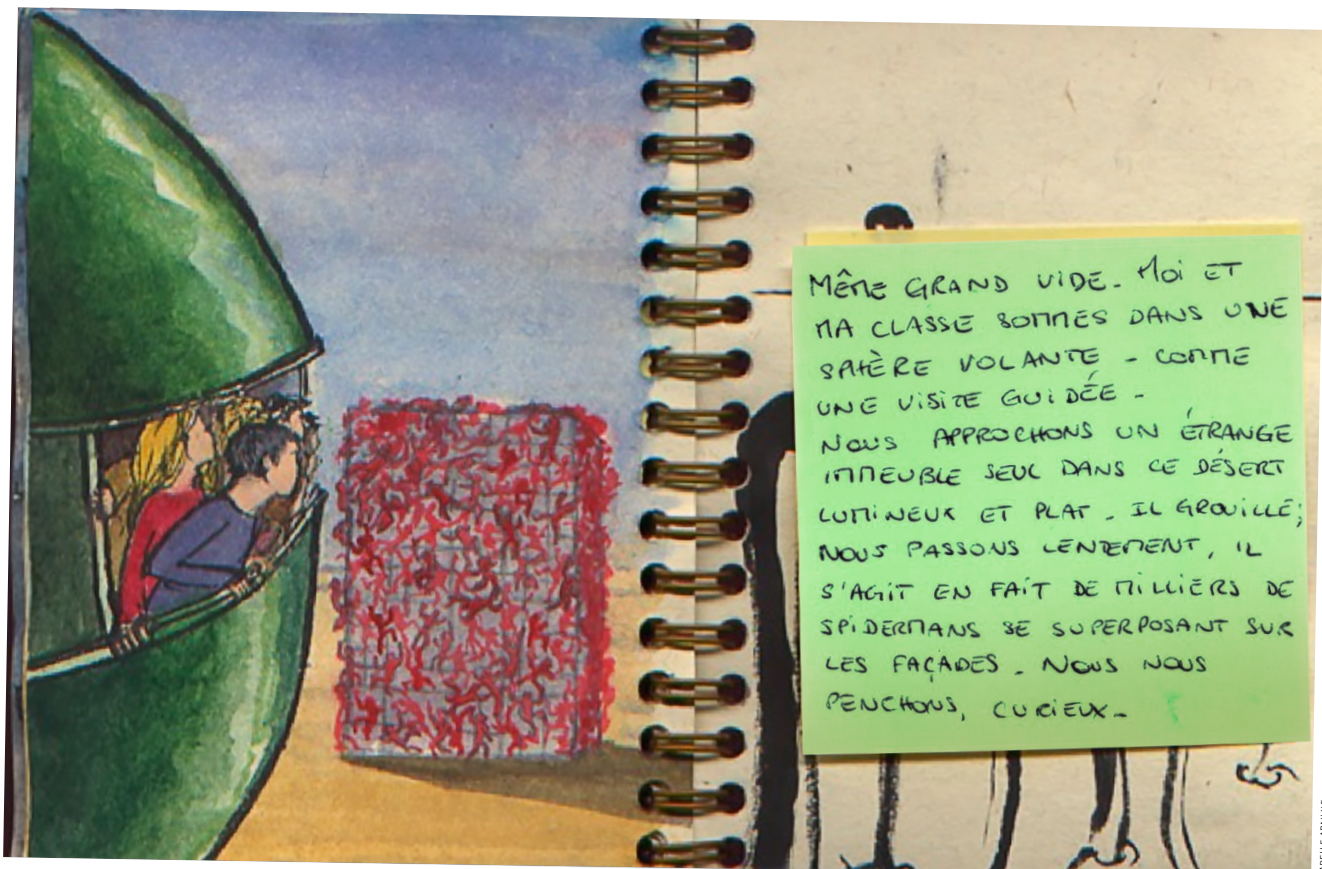
Eine andere krankhafte Erscheinung ist die REM-Schlaf-Verhaltensstörung, die auch RBD-Schlafstörung heißt (nach englisch REM sleep behavior disorder). Sie tritt meist erst bei über 50jährigen auf. Die Patienten schlagen um sich und verprügeln oder verletzen unsichtbare Gegner. In etwa 20 Prozent der Fälle zeigen sie nichtaggressives fiktives Verhalten: Sie rauchen scheinbar Zigaretten, kaufen oder verkaufen Dinge, essen, trinken Kaffee und dergleichen.

Normalerweise ist während des REM-Schlafs eine Neuroengruppe aktiv, die sämtliche Muskelbewegungen hemmt mit Ausnahme von Gesicht und Augen. Dadurch sollten Bewegungen noch weniger möglich sein als während des langsamwelligen Schlafs. Diese Zellen liegen im Locus subcaeruleus des Hirnstamms (siehe: »Das Gehirn im Traum«). Eine RBD-Schlafstörung zeigt an, dass jene Neurone nicht mehr



ISABELLE ARNUF

Traumtagebücher, die das im Schlaf Erlebte eindrücklich wiedergeben, können kleine Kunstwerke sein.



ISABELLE ARNUF

korrekt funktionieren. Häufig bedeutet das die erste Phase einer neurodegenerativen Erkrankung wie Parkinson. Daran sind solche Leiden früh erkennbar und können entsprechend behandelt werden. Eine Therapie sollte schon deswegen erfolgen, weil die Patienten sich selbst oder den Partner verletzen können (siehe auch: »Schlafwandler als Mörder«, SdW Spezial Biologie, Medizin, Hirnforschung 3/15, S. 34–39).

Es ist noch keine 20 Jahre her, seit man die Ursachen für diese schwere Störung erkannt hat. Wir wissen jetzt, dass hier die Schlafmedizin gefragt ist und nicht die Psychiatrie. Leider suchen viele Betroffene immer noch zunächst psychologische Hilfe. Aber sie leiden keineswegs an verborgenen, unterdrückten Aggressionen, wie manche meinen.

Der Traumforschung haben besonders diese Patienten wie auch Schlafwandler viele wertvolle Einsichten gebracht. So zeigte sich, dass sie, wenn man sie während einer solchen »Verhaltensattacke« weckt, tatsächlich gerade einen dazu passenden Traum hatten. Gleiches gilt für gesunde Menschen und ihre schwachen Verhaltensaussagen. Von daher sind wir inzwischen davon überzeugt, dass jeder träumt, selbst jene wenigen mit einem Anteil von unter einem Prozent, die sich nie an einen Traum erinnern können. Im Schlaflabor zeichnen wir für sie genauso Bewegungs- und Stimmäußerungen auf wie bei allen anderen.

In gewissem Maß sind Träume also durchaus von außen beobachtbar wie ein etwas eigenartiges Theaterstück. Einen noch direkteren Zugang verschafft aber eine neuere Methode, die es ermöglicht, mit einem oder einer Träumenden sogar zu kommunizieren und zu interagieren.

Wie Klarträumer aus ihrer Traumwelt Telegramme schicken

Normalerweise sind wir uns nicht dessen bewusst, dass wir gerade träumen. Falls dies doch einmal der Fall ist, werden wir davon gewöhnlich wach. Fast jeder dürfte das schon erlebt haben. Doch manche Menschen wissen, dass sie träumen, und schlafen dabei weiter. Viele von ihnen können den Trauminhalt lenken, teils sogar gezielt herbeirufen, zum Beispiel eine Person auftauchen lassen, um sich mit ihr zu befassen, oder vor einem Feind wegzufiegen. Wir bezeichnen das als einen luziden oder Klartraum.

Ein Klarträumer befindet sich gewissermaßen in einem hybriden Zustand zweier Bewusstseinsebenen. Zum einen lebt er in seinem Traum, agiert und fühlt, als wäre er dabei, zum anderen aber ist er sich gleichzeitig dessen bewusst, dass dies alles nicht wirklich geschieht. Letzteres machen sich die Schlafforscher zu Nutze. Weil die Schlaflähmung niemals die Augen betrifft, vermag der Träumende dem Experimentator mit Augenbewegungen zu signalisieren, dass er gerade einen luziden Traum hat. Meist bewegt er sie dazu zwei- oder dreimal hintereinander nach links und rechts – was er übrigens gleichzeitig auch im Traumgeschehen tut.

Dank solcher »Telegramme aus der Traumwelt« vermögen Forscher Hirnaktivitäten zu erfassen, die bei spezifischen, vorher vereinbarten geträumten Handlungen auftre-

Statistik von Traumgehalten

Auswertungen von Datenbanken mit zigtausenden Träumen zeigen:

- Träume enthalten doppelt so viele negative wie positive Emotionen.
- Sex kommt selten vor: bei Männern in 2 Prozent, bei Frauen in einem halben Prozent ihrer Träume.
- Die meisten Inhalte sind alltäglich, spielen im gewohnten Umfeld, und der Träumende hat es mit zwei bis vier Personen zu tun.
- So genannte typische Träume – Zähne fallen aus, man ist nackt, man fliegt – kennt fast jeder Mensch. Trotzdem machen sie weniger als ein Prozent aller Träume aus. Wohl weil sie so markant sind, erinnert man sich jedoch an sie und spricht davon.
- Komplexe Alltagshandlungen wie Schreiben, Lesen oder Rechnen führen wir im Traum sehr viel seltener aus als in Wirklichkeit.

ten. So wiesen Martin Dresler vom Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München und seine Kollegen 2011 nach, dass bei einer bestimmten im Traum durchgeführten Handbewegung dieselbe Region im sensomotorischen Kortex aktiviert ist, als wenn man sich die Handlung im Wachzustand vorstellt oder sie ausführt. Sogar Zeitdauern ließen sich messen (siehe: »Traumzeit ist Echtzeit«). Allerdings befindet sich die Klartraumforschung noch ganz am Anfang.

Noch weiter gingen 2012 Tomoyasu Horikawa von der Universität von Kyoto und seine Kollegen, indem sie für die Hirnaktivität sozusagen Traumschlüssel schufen, um im Gehirn zu lesen. Sie zeigten wachen Versuchspersonen Fotos und erfassten dabei die Hirntätigkeit mittels funktioneller Magnetresonanztomografie. Dann erstellten sie Hirnbilder dieser Personen im Schlaf, die anschließend ihre Träume erzählten. So konnten die Forscher Areale identifizieren, die bei bestimmten Bildkategorien aktiv waren, zum Beispiel solche für Bilder von Autos. Mit diesem Rüstzeug gelang es erstmals, anhand von Hirnaufnahmen grob festzustellen, wovon jemand gerade träumte. Hatte der Proband im Traum Essen gesehen, ließ sich das in 55 Prozent der Fälle bestimmen, bei Bildern von Personen sogar zu über 77 Prozent.

Doch welchen Sinn hat Träumen überhaupt, mit dem wir ein Viertel unseres Lebens zubringen? Allan Hobson von der Harvard University machte mit seiner Ansicht Furore – die er später allerdings abmilderte –, dass Träume keinerlei inhaltliche, sinnvolle Bedeutung haben, vielmehr lediglich nächtliche Hirnaktivitäten darstellen. Seines Erachtens generieren der Hippocampus sowie die sensorischen und Gefühlsregionen aus unserem Gedächtnis spontan Bilder und Gefühle. Angestoßen würde das möglicherweise vom Locus subcaeruleus im oberen Hirnstamm, der nicht nur den Muskeltonus

während des REM-Schlafs hemmt, sondern auch das Zucken der Extremitäten im Schlaf und die Augenbewegungen verursacht.

Tatsächlich gibt es Hinweise darauf, dass ein »Aktivator« im Hirnstamm die ersten Elemente beim Träumen auslöst. Bei einem seltenen neurologischen Syndrom kann der Patient sich nicht selbst aktivieren und hat im Wachzustand nicht einmal spontane Gedanken. Doch wie wir feststellten, haben diese Menschen noch Träume, wenn auch nur ganz kurze und wenig ausgefeilte. Diese könnte der angenommene Aktivator verursachen, aber weil die anderen Hirngebiete nicht mehr mitspielen, bleibt es dabei.

Nur »Ankleiden« von Erregungsmustern?

Normale Träume kämen laut Hobson schlicht dadurch zu Stande, dass das Gehirn versucht, das Sammelsurium an zusammenhanglosen Erregungen zu interpretieren, die der Hirnstamm generiert. Oder in den Worten des amerikanischen Neurologen Howard Roffwarg von der University of Mississippi in Oxford: »Ein Traum wird im Hirnstamm geboren und dann vom restlichen Gehirn angekleidet.«

Manchmal geraten zudem Wahrnehmungen von außen, wie ein Geräusch im Zimmer, in einen Traum und werden darin interpretiert. Der amerikanische Schlafforscher William Dement wies 1958 nach, dass Schlafende mitunter von Regen träumen, wenn man ihnen Wasser aufs Gesicht träufelt. Zu anderen Zeiten kapselt sich das schlafende Hirn allerdings praktisch komplett gegen die Außenwelt ab. Offenbar begünstigt das die so genannten vestibulären Träume wie Fliegen, Schwimmen oder das sich außerhalb seines Körpers Befinden. Das Gehirn könnte solche Szenarien erfinden, weil es keinerlei an Schwerkraftempfindungen gekoppelte sensorische Informationen erhält – und die merkwürdige Situation nun so deutet. Wenn man hingegen in einem REM-Traum nicht weglaufen kann, weil die Füße am Boden kleben, interpretiert das Gehirn möglicherweise die tatsächliche Schlaf lähmung der Gliedmaßen.

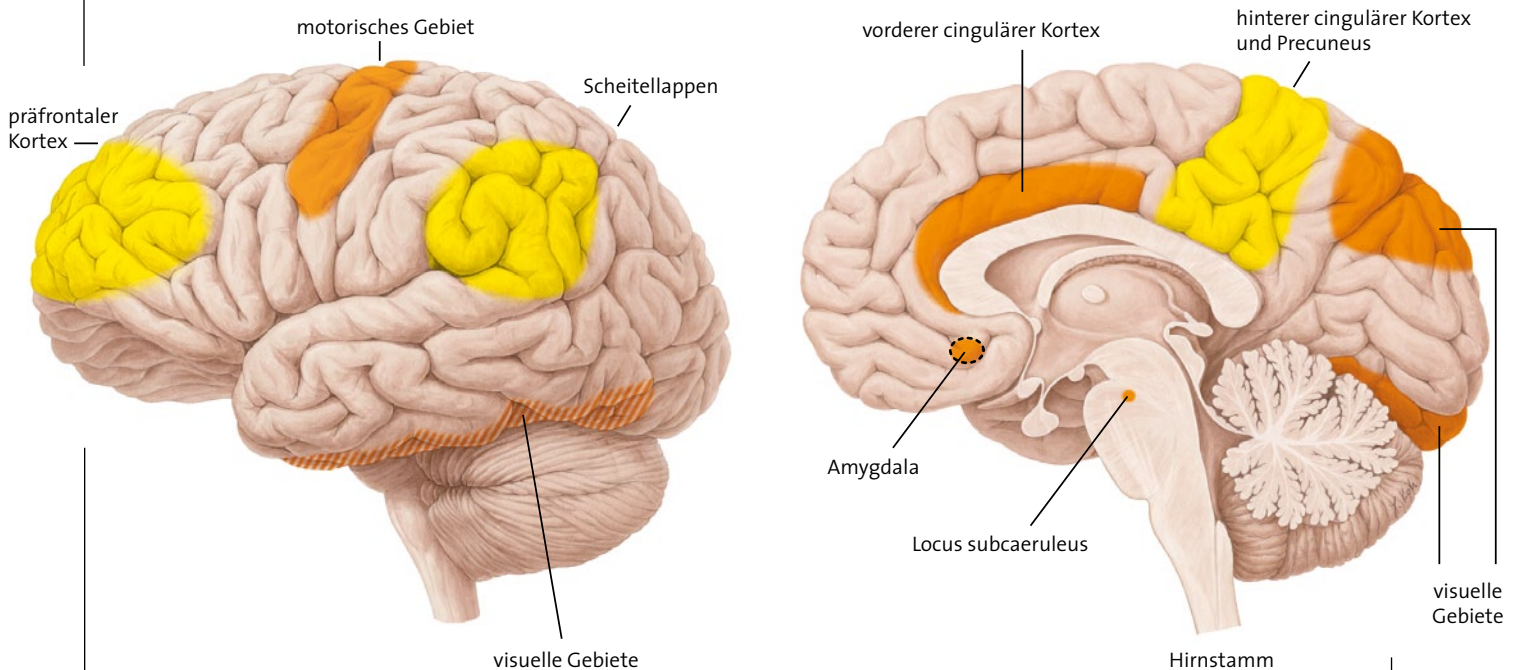
Wie die meisten Traumforscher glaube ich selbst nicht, dass Träume gar keinen Sinn enthalten. Manches an der Funktionsweise des schlafenden Gehirns könnte auf eine evolutive Selektion zurückgehen und zur Lebensbewältigung beitragen.

Das Gehirn im Traum

Manche Hirnregionen sind im REM-Schlaf ungewöhnlich inaktiv (gelb). Besonders der für Logik, Vernunft und Urteil zuständige präfrontale Kortex schweigt, was die oftmals skurrilen Hirn- gespinste erklären mag. Andere Gebiete sind umso aktiver (orange), etwa visuelle und motorische Areale. Auch die Amygdala tritt im REM-Schlaf oft voll aufs Gas. Sie sorgt wahrschein-

lich für die starke emotionale Tönung vieler Träume dieser Phase. Der Locus subcaeruleus im Hirnstamm vermittelt währenddessen die Lähmung der Extremitäten. Nur bei bestimmten Krankheiten fällt sie aus.

Trauminhalte beim langsamwelligen Schlaf ließen sich bisher nicht mit spezifischen Hirnaktivierungen korrelieren.



YOUSUN KOH, NACH: SCHWARTZ, S., MAQUET, P.: SLEEP IMAGING AND THE NEURO-PSYCHOLOGICAL ASSESSMENT OF DREAMS. IN: TRENDS IN COGNITIVE SCIENCES 6, S. 23-30, 2002

Bei einigen Krankheiten toben die Patienten im Schlaf. Weckt man sie währenddessen, passt das gerade Geträumte zu ihrem Verhalten: Oft wähten sie sich in größter Gefahr. Der hier abgebildete Mann kämpft im Traum gegen jemanden, der ihn ersticken will. Nach einer Theorie schulen uns Träume, mit Bedrohungen im realen Leben besser fertigzuwerden.



Als Erster gab Ende des 19. Jahrhunderts Sigmund Freud (1856–1939) Träumen eine wissenschaftlich fassbare Bedeutung. Der Begründer der Psychoanalyse postulierte, sie seien ein Ventil für das Unbewusste, besonders für im Wachzustand unterdrückte Begierden. Die Traum Inhalte würden diesen Wünschen und Trieben allerdings nicht direkt entsprechen. Eine Zensurinstanz würde Letztere vielmehr sogar im Schlaf zurückdrängen; sie träten daher nur maskiert in Erscheinung. Deswegen seien Träume oft so fremdartig und seltsam. Diese Hypothese wurde in der weiteren Entwicklung der Psychoanalyse insofern erweitert, als dass sich am Tag nicht ausgelebte bewusste wie unbewusste Wünsche in Träumen melden würden.

Die freudschen Theorien ließen sich wissenschaftlich nie beweisen. Im Gegenteil stellten mehrere Analysen von Traumbanken die Ventilrolle von Träumen in Frage. So bat 1970 der türkische Neurologe Ismet Karacan, der unter anderem am Baylor College of Medicine in Houston (Texas) tätig war, junge Männer, zwei Wochen lang auf sexuelle Intimitäten zu verzichten und auch nicht zu masturbieren. Er wollte wissen, ob sie dann mehr erotische Träume haben würden – was nicht der Fall war!

Eine ganz andere Theorie unterbreitete 2000 der finnische Neurowissenschaftler, Psychologe und Philosoph Antti Revonsuo, der an der Universität Skövde (Schweden) und an der Universität Turku (Finnland) arbeitet. Seines Erachtens sind Träume dazu da, bedrohliche Situationen zu simulieren und uns dadurch zu helfen, im Alltag besser damit fertig zu werden. Er erkannte, dass in Träumen Angriffe, Verfolgungen und gefährliche Tiere außergewöhnlich häufig vorkommen. Demnach enthalten zwischen 60 und 77 Prozent der Träume junger Erwachsener bedrohliche Elemente. Das könnte ein recht altes evolutives Erbe sein, denn auch Katzen und Hunde scheinen oft von Jagden und Raufereien zu träumen, soweit man aus ihren Zuckungen und Lauten im Schlaf schließen kann. Nach Revonsuo üben wir im Schlaf quasi Strategien der Flucht, Verteidigung oder Anpassung an heikle Situationen ein. Einer Imagination im Wachzustand wäre der Traum hierin überlegen, denn in ihm kommt einem das Geschehen ja real vor: Wir bewegen uns scheinbar ganz normal in einem dreidimensionalen Raum; der Empfindung nach funktionieren Sinnesorgane und Muskeln regulär, und wir durchleben die zum Geschehen passenden Gefühle. Revonsuo hat seine Theorie später auch auf soziale Bedrohungen ausgeweitet. Denn der Ausschluss aus der Gruppe, was im Traum oft vorkommt, bedeutete früher den sicheren Tod.

Eine Erhebung des Psychologen Tore Nielsen von der Universität de Montréal aus dem Jahr 2007 an 200 jungen Müttern stützt diese Deutung. 86 Prozent ihrer Träume kurz nach der Entbindung kreisten um das Kind, und in 73 Prozent war dieses in Gefahr: Es erstickte etwa versehentlich im Bett der Mutter oder fiel aus der Wiege. Oft erwachten die Frauen dann abrupt.

Manche Szenen, die wir jede Nacht in unserem Labor für Schlafstörungen filmen, passen gut in dieses Bild. Beim Nachtschreck, dem Pavor nocturnus aus dem Tiefschlaf heraus, handelt es sich fast immer um eine unmittelbar tödliche Gefahr, welcher der Träumende zu entkommen versucht – wie Ertrinken, eine Schlange oder eine einstürzende





Zimmerdecke. Mit Alpträumen verbundene Verhaltensauffälligkeiten im paradoxen oder REM-Schlaf äußern sich hingegen überwiegend als höchst aggressive Gegenwehr, wobei die Betroffenen heftig um sich schlagen, boxen und treten.

Wir wollten wissen, ob Träume tatsächlich vor allem tödliche Gefahren oder vielleicht generell Herausforderungen thematisieren. 2013 testeten wir Pariser Medizinstudenten, die am nächsten Tag eine wichtige Zwischenprüfung abzulegen hatten. Wirklich träumten 60 Prozent der Probanden von dem Examen, und 78 Prozent von diesen widerfuhr im Traum etwas Schlimmes: Sie verschliefen, kamen zu spät, hatten den Ausweis vergessen, ihnen fiel die richtige Antwort nicht ein und Ähnliches. Einer musste sogar auf Brotscheiben schreiben.

Katastrophenträume helfen gut durchs Examen

Unsere Träume füllen jede Nacht mehrere Stunden aus. Auch unbewusst wahrgenommenes Tagesgeschehen kann eingebaut sein. Die neuen Assoziationen und Schlussfolgerungen, die das Gehirn dabei generiert, schaffen allnächtlich Hunderte oft fantastischer Szenen. Da verwundert es nicht, dass Menschen bei einem antizipierenden Traum mitunter das Gefühl haben, er würde die Zukunft anzeigen.

Bei den Studenten traf hingegen das Gegenteil ein: In der Prüfung schnitten diejenigen mit Katastrophenträumen im Mittel entschieden besser ab als die anderen. Anscheinend ist es für späteres Handeln hilfreich, wenn das Gehirn zuvor im Schlaf dramatische Szenen heraufbeschwört. Womöglich lernen wir daran, mit der entsprechenden Situation angemessen umzugehen, vergewissern uns also etwa nochmals, ob wir den Ausweis auch wirklich dabei haben. Vielleicht schulen uns solche Träume sogar darin, negative Emotionen leichter wegzustecken. Wohl jeder Schauspieler hat vor einer Premiere schon von einem großen Reifall geträumt. Weil er das Gefühl nun bereits kennt, hat er am nächsten Tag möglicherweise etwas weniger Lampenfieber.

Besonders Träume im REM-Schlaf können voller negativer Gefühle stecken. In dieser Phase ist die Amygdala – ein wichtiges, auch Mandelkern genanntes Emotionszentrum – hochaktiv. Nielsen und sein Kollege Ross Levin postulieren, dass sich das Gehirn in diesem besonderen Zustand leichter als sonst an aufwühlende Vorgänge und Gefühle gewöhnt, indem es sie sozusagen im Leerlauf durchlebt. Überdies kommuniziert jetzt der Hippocampus, eine zentrale Struktur für die Gedächtnisbildung, mit der Amygdala. Dabei verbinden sich Schreckenserlebnisse und schwer verdauliche Ereignisse des Tages mit neutraleren, ebenfalls abgespeicherten Vorkommnissen, die mit Ersteren eigentlich nichts zu tun haben. Auf diese Weise dürfte mancher bizarre Traum zu Stande kommen, und negative Eindrücke könnten an Gewicht verlieren. Womöglich ist Gefühlstraining generell eine Funktion des Schlafs – nach dem Motto: Der kürzeste Weg von Verzweiflung zu Hoffnung ist, über die Sache zu schlafen.

Einen solchen Zusammenhang fand Matthew Walker von der University of California in Berkeley 2011, als er die Aktivität der Amygdala von Versuchspersonen aufzeichnete, denen er Bilder mit Kriegs- oder Mordszenen vorführte. Erwartungsgemäß reagierte die Hirnstruktur darauf zunächst sehr stark – doch nach einer gut durchschlafenen Nacht praktisch nicht mehr auf dieselben Bilder. Dennoch hatten sich diese ins Gedächtnis gebrannt. Sie waren jetzt nur weniger emotional besetzt, dafür aber wirkmächtiger: In der Studie beteiligte sich die Amygdala umso weniger, je aktiver zuvor im REM-Schlaf das vordere Stirnhirn gewesen war – der Sitz des Denkens, der Urteilsfindung und des Selbst. Es schien, als habe ein Dialog zwischen Gefühl und Vernunft stattgefunden und die Bewertung jener Eindrücke sowie den Umgang der betreffenden Person damit dauerhaft in eine für sie günstigere Richtung gebogen.

Nach einer weiteren Theorie festigen Träume das Erinnern an tagsüber Erlebtes, indem sie dieses nochmals verändert durchspielen. Zahlreiche Studien belegen seit Längerem, dass Schlafen wirklich hilft, sich ein neues Klavierstück,

einen Vortrag oder einen Weg einzuprägen. Es ist egal, ob eine Nacht dazwischen liegt oder die Übenden nur eineinhalb Stunden Siesta halten – die Leistung verbessert sich gegenüber Kontrollgruppen um etwa 20 Prozent. Ein Musikstück etwa spielen Klavierschüler schneller und machen trotzdem weniger Fehler als vorher. Nachweislich haben dann im Schlaf dieselben Hirnregionen und sogar Neurone gearbeitet, die beim Üben beansprucht wurden. Tatsächlich hängt von der Intensität dieser Reaktivierung anschließend der Grad des Könnens ab.

Am besten fürs Lernen: der NichtREM-Schlaf

Eine andere Frage ist, ob die Lernaufgabe selbst im Traum auftaucht. Man sollte annehmen, dass dies oft der Fall ist – zumindest verzeichneten verschiedene Untersuchungen viele Ähnlichkeiten von im Traum begegneten Orten, Menschen oder Dingen mit vorangegangenen Erlebnissen. Eine solche Studie führten Magdalena J. Fosse von der Harvard University und ihre Kollegen 2003 durch. Sie ließen die Teilnehmer zwei Wochen lang notieren, was sie am Tag gemacht und wovon sie geträumt hatten. Bei mehr als der Hälfte der Trauminhalte, Gefühle und Personen gab es eine Verbindung zu kürzlichen Erlebnissen. Direkte Wieder-

holungen von Geschehnissen traten allerdings selten auf. Eher wurden Teile davon in andere Szenarien eingebaut. Vermutlich integrieren sich Erlebnisse gewöhnlich nicht als genaue Kopie, sondern meist in Fragmenten, sozusagen Einzelbausteinen.

Am intensivsten verfestigen sich Erinnerungen im langsamwelligen NichtREM-Schlaf. Wenn beispielsweise Ratten den Weg durch ein Labyrinth lernen, melden sich anschließend im orthodoxen Schlaf dieselben vorher beanspruchten Ortsneurone. Ob die Ratten währenddessen auch vom Labyrinth träumen, wissen wir bisher nicht. Bei Menschen könnte es so sein. Dafür spricht etwa, dass eine unserer Patientinnen, die schlafwandelte, nachts sämtliche Gegenstände von ihrem Nachttisch in ihr Kopfkissen stopfte, nachdem sie den ganzen Tag Weihnachtsgeschenke eingepackt hatte.

Robert Stickgold von der Harvard University wies 2010 nach, dass man etwas viel besser lernt, wenn man nachher davon träumt. Stickgold ließ Studenten ein Labyrinth-Computerspiel üben und dann eine Dreiviertelstunde schlafen. Wer das Spiel in seine Träume einbezogen hatte, wie bruchstückhaft auch immer, war anschließend dreimal so gut darin wie die anderen Teilnehmer, selbst wenn er nur von der Musik geträumt hatte. Auch unsere Forschung zu Schlafstö-

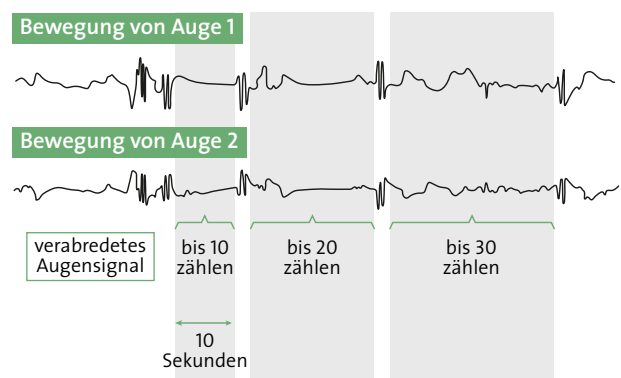
Traumzeit ist Echtzeit

Der amerikanische Schlafforscher William Dement setzte 1958 Schlafende zehn Minuten, bevor er sie weckte, einer Klingel oder kurzen Lampenblitzen aus. Diese Reize kamen in jedem vierten Traum vor. So erzählte jemand, Freunde hätten an der Tür geläutet. Man habe den Freunden einen Tee gekocht, sich dann ruhig unterhalten und den Tee getrunken, »und dann haben Sie mich geweckt«. Dieses Geschehen hätte auch in Wirklichkeit etwa zehn Minuten gedauert.

Menschen mit Traumstörungen, die ihre Träume körperlich ausleben, führen im Schlaf nicht nur weitgehend die gleichen Bewegungen oder Gesten aus wie in solchen Situationen im Wachen – diese brauchen auch ähnlich lange. Ein Raucher etwa führt eine fiktive Zigarette langsam zum Mund, nimmt in aller Ruhe einen tiefen Zug, atmet langsam wieder aus, klopft die Asche ab und zerdrückt die Zigarette schließlich in einem unsichtbaren Aschenbecher. Ein ehemaliger Schreiner baute im Traum eine Treppe und hämmerte im REM-Schlaf eine Stunde lang erkennbar mit seinem fiktiven Hammer.

Der Klartraumforscher Daniel Erlacher vom Institut für Sportwissenschaften der Universität Bern maß 2014, wie schnell Versuchspersonen im Wachen und im Schlaf bis 10, 20 und 30 zählen (siehe Bild). Oder sie sollten entsprechend viele Schritte gehen oder Kniebeugen machen. Anfang und Ende der Aktion im Schlaf signalisierten die Klarträumer dem Experimentator mit bestimmten Augenbewegungen. Meist dauerte

das Verhalten im Traum ein klein wenig länger als im Wachen. Der Unterschied war bei den körperlichen Bewegungen etwas ausgeprägter als beim Zählen. So brauchte das wache Zählen bis 20 im Mittel 17 Sekunden, das im Schlaf 22,4. 30 Schritte Gehen dauerte wach 18,5 Sekunden; im Klartraum waren es durchschnittlich 28,6. Die Zeitrelationen blieben dabei gewahrt: 30 Schritte kosteten dreimal soviel Zeit wie 10 Schritte.



Bis 10 zu zählen dauert im Traum durchschnittlich 11,1 Sekunden, wach 8,9. Hier deuten Klarträumer – die wissen, dass sie gerade träumen – mit absichtlichen, vorher verabredeten Augenbewegungen an, wann sie zu zählen anfangen und wieder aufhören.

FROM SCIENCE: MACH, ERLACHER, D. ET AL. TIME FOR ACTIONS IN LUCID DREAMS: EFFECT OF TASK MODALITY, LENGTH, AND COMPLEXITY. IN: FRONTIERS IN PSYCHOLOGY 4, S. 1-12, 2014, FIG. 2

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



www.spektrum.de/t/schlaf

FOTOLIA/ELIZABETH ENGLE



rungen unterstützt diese Theorie. So hatten wir Schlafwandlern eine Abfolge spezieller Handbewegungen beigebracht. Eine Patientin wiederholte diese nachts teilweise, träumte also wohl davon. Am nächsten Tag beherrschte sie die komplizierte Bewegungsfolge besser.

Die Steigerung der Kreativität ist kein Wunschdenken

Dass das schlafende Gehirn zuvor Erlebtes und Gedachtes nicht genau wiederholt, sondern zerlegt und vermischt, dürfte die Kreativität fördern. Der deutsche Chemiker August Kekulé (1829–1896) soll die Struktur des Benzolrings im Traum gefunden haben, der Russe Dimitri Mendelejew (1834–1907) den Aufbau des Periodensystems. Solche Problemlösungen im Schlaf sind nicht mehr nur Anekdoten. Beispielsweise konfrontierte der Neuropsychologe Ullrich Wagner, der heute an der Universität Münster arbeitet, Studenten 2004 mit einer Intelligenztestaufgabe, bei der zwar auch Übung den Erfolg steigerte, die aber außerdem eine versteckte Regel enthielt. Teilnehmer, die nach den ersten Durchgängen schlafen durften, erkannten danach doppelt so oft den Trick wie die anderen.

Nicht zuletzt dürften Träume auch soziale Funktionen haben. Wer wurde im Schlaf nicht schon zum Helden eines am Abend gesehenen Films? Welche Frau war noch nie ein Mann? Mit Homosexualität hat das übrigens nichts zu tun. Vielmehr scheint dabei zum Tragen zu kommen, dass wir uns in andere hineinversetzen und Empathie empfinden können – eine fundamentale Voraussetzung für einen wichtigen Aspekt unserer Sozialität, der auf den so genannten Spiegelneuronen beruht. Diese Hirnzellen werden gleichermaßen aktiv, wenn man selbst etwas tut und wenn man jemandem bei der gleichen Tätigkeit zusieht. Man könnte meinen, unser Gehirn spielt sich den Vorgang mental vor.

Wenn wir in einem Traum jemand anders sind, dürfte die Identifizierung mit demjenigen noch stärker sein als im Wachzustand. Hierzu erzählte mir ein Patient ein merkwürdiges Erlebnis, das er hatte, als er im Krankenhaus lag und seiner schwangeren Frau nicht beistehen konnte: Er träumte, ihm fehlten Arme und Beine, so dass er völlig handlungsunfähig war; doch plötzlich gebar er ein Kind – und nun lief alles viel besser. Wir vermuten, dass im Traum zuvor beanspruchte Spiegelneurone wieder aktiviert werden und dass

wir so üben, uns in andere hineinzufühlen und sie besser zu verstehen.

Besonders erstaunlich sind in der Hinsicht Träume von seit Geburt gelähmten Menschen, die nie ihre Gliedmaßen zu rühren vermochten. Alle, mit denen wir gearbeitet haben, konnten im Traum mühelos gehen und rennen, sogar tanzen, gärtnern, Fahrrad fahren oder Fußball spielen. Hatte ihr Gehirn dies durch Beobachtung gelernt? Auch dieses Beispiel scheint zu zeigen, dass Träumen der wachen Vorstellungskraft in mancher Hinsicht überlegen ist. Es kann Vorgänge wirklichkeitsnäher simulieren, weil man sie in dem Augenblick für wahr hält und mit sämtlichen Sinnen darin eintaucht.

Über die Herkunft von Träumen lässt sich dank der vorliegenden Studien also durchaus einiges sagen. Auf der einen Seite scheint sich diesbezüglich im Lauf der Evolution eine Reihe von nützlichen Funktionen herausgebildet zu haben. Unter anderem simuliert das Gehirn so bedrohliche Situationen und nimmt negative Empfindungen vorweg, legt sie ab und verwaltet sie, festigt das Gedächtnis, findet neue Ideen und erleichtert den sozialen Umgang. Auf der anderen Seite scheinen viele Traumelemente keine eigentliche Aufgabe zu haben. Zum Teil sind sie vielleicht nur Ausdruck der mentalen Einschränkungen und der eingedämmten Wahrnehmung des schlafenden Gehirns.

Für eine solche vielfältige Herkunft der Traumbestandteile sprechen nicht zuletzt die so genannten typischen Träume, die viele kennen. Zu fliegen dürfte auf das fehlende Schweregefühl zurückgehen. Vor allen Leuten nackt dazustehen mag damit zusammenhängen, dass man im Bett wenig oder gar nicht bekleidet ist. Wem alle Zähne aus dem Mund fallen, bei dem könnten verzerrte Erinnerungen an frühere Zahnbehandlungen aufgetaucht sein. Jedenfalls machen die Beobachtungen verständlich, wieso Träume derart mannigfaltig sind. ~

DIE AUTORIN



Isabelle Arnulf ist Professorin für Neurologie an der Université Pierre et Marie Curie (UPMC) in Paris. Sie leitet die Schlafpathologie des Krankenhauses La Pitié-Salpêtrière und forscht am Institut für Gehirn und Rückenmark (Inserm U1127; CNRS UMR 7225).

QUELLEN

- Andrillon, T. et al.:** Single-Neuron Activity and Eye Movement During Human REM Sleep and Awake Vision. In: *Nature Communications* 6, S. 1–10, 2015
- Arnulf, I.:** Une fenêtre sur les rêves. Editions Odile Jacob, 2014
- Arnulf, I. et al.:** Will Students Pass a Competitive Exam that They Failed in Their Dreams? In: *Consciousness and Cognition* 29, S. 36–47, 2014
- Horikawa, T. et al.:** Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep. In: *Science* 340, S. 639–642, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408638

Heilen mit dem vierten Aggregatzustand

Physikalisches Plasma bewährt sich bereits im klinischen Alltag: Es desinfiziert Wunden und lindert Entzündungen. Mediziner haben weitere Einsatzfelder im Blick, etwa Krebstherapien.

Von Thomas von Woedtke und Hans-Robert Metelmann

Seit etwa 15 Jahren ist eine neue Disziplin im Entstehen begriffen: die Plasmamedizin. Der Begriff hat nichts mit Blutplasma zu tun, wie viele annehmen. Stattdessen bezieht er sich auf physikalisches Plasma – ein Gemisch aus meist ionisierten, also geladenen Atomen, Molekülen sowie aus Elektronen, das sich üblicherweise wie ein Gas verhält. Physiker bezeichnen es oft als »vierten Aggregatzustand«. Dieser lässt sich beispielsweise erzeugen, indem man Gasen über starke elektrische Felder Energie zuführt. Dabei verlieren viele Gasteilchen Elektronen ihrer äußeren Atomhülle – sie werden teilweise oder vollständig ionisiert. Das entstehende Medium ist elektrisch leitfähig.

Da Plasmen energetisch angeregt sind, enthalten sie viele reaktionsfreudige Teilchen sowohl elektrisch geladener als auch neutraler Art und senden elektromagnetische Strahlung aus, vor allem UV- und sichtbares Licht. Dies macht Plasmen zu geeigneten Mitteln, um Licht zu erzeugen, Oberflächen zu verändern oder Energien umzuwandeln, zum Beispiel in experimentellen Kernfusionsanlagen. Meist weisen sie sehr hohe Temperaturen auf.

Etwa seit Mitte der 1990er Jahre gelingt es auch, so genannte kalte Atmosphärendruckplasmen (cold atmospheric plasmas, CAP) zu erzeugen. Das sind Teilchengemische mit Drücken, die jenem an der Erdoberfläche entsprechen, und

mit biologisch verträglichen Temperaturen unterhalb von 40 Grad Celsius. Sie eröffnen völlig neue Anwendungsfelder in der Medizin.

Zu den bereits etablierten und klinisch derzeit wichtigsten Behandlungsverfahren gehört es, physikalische Plasmen gegen Krankheitserreger auf entzündeter Haut oder in oberflächlichen Geschwüren einzusetzen. Für diese Indikation sind im Jahr 2013 die ersten Plasmaquellen in Deutschland als Medizingeräte zugelassen worden. Ein »Plasmajet« beispielsweise ist ein chirurgisches Gerät, das der Arzt mit der Hand führt und mit dem er einen kalten, bläulich schimmernden Plasmastrahl von etwa 14 Millimeter Länge auf eine keimbelastete Wundoberfläche richtet (siehe Bild rechts). Das führt dazu, dass dort vorhandene Bakterien, Pilze, Viren und auch Parasiten abgetötet werden. Da diese antimikrobielle Wirkung auf physikalisch-chemischen Mechanismen (unter anderem Radikaleinwirkung) beruht, können sich ihr auch Erreger mit Mehrfachresistenzen gegenüber Antibiotika nicht entziehen.

Schon nach etwa drei Sekunden kann ein Plasmastrahl eine Wunde beinahe vollständig keimfrei machen, sofern nicht Blut, Sekret oder Schmutz sie abdecken. Auf manchen Verletzungen bilden sich allerdings Biofilme – gelähnliche Schichten, in denen die Mikroben miteinander vernetzt und erheblich widerstandsfähiger sind. Hier ist die klinische Wirkung der Plasmajets zurzeit noch unbefriedigend. Immerhin führt die Behandlung mit physikalischem Plasma laut ersten Versuchen nicht dazu, dass Wundkeime resistenter gegenüber Antibiotika, Virustatika, Antimykotika und ähnlichen Arzneistoffen werden. Auch auf eine Resistenzbildung gegenüber dem Teilchengemisch selbst gibt es bisher keine Hinweise. Die antimikrobiellen Eigenschaften von Plasmen lassen sich zudem in der Zahnmedizin nutzen, um kieferorthopädische Geräte, zahnärztliche Prothesen und Implantate zu desinfizieren.

Ganz besonderen Wert hat die neue Methode für Krebspatienten, die unter infizierten Geschwüren an der Hautoberfläche leiden. Für diese Menschen bedeutet geringerer

AUF EINEN BLICK

DESINFEKTION MIT IONISIERTEN TEILCHEN

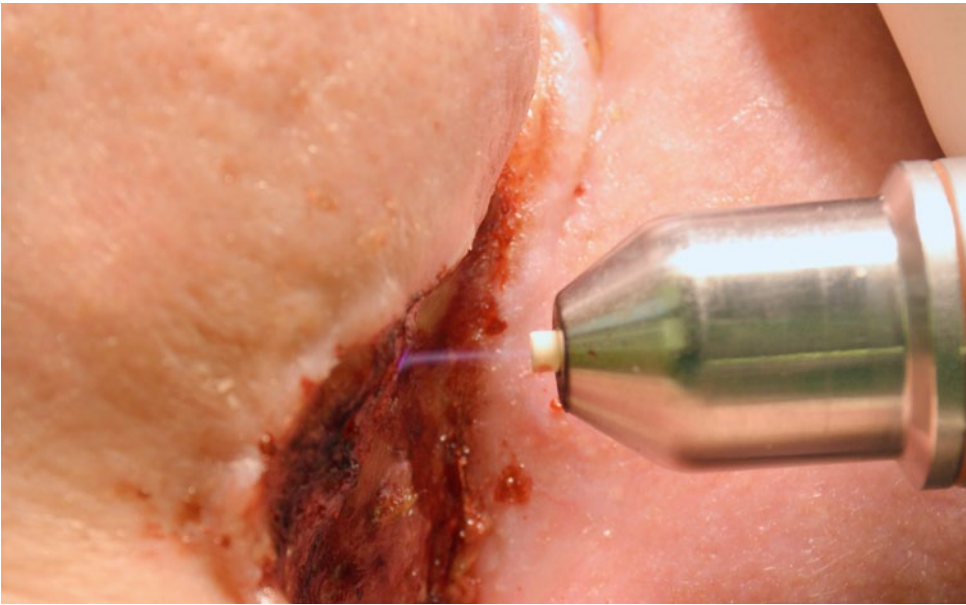
1 Mit **kalten physikalischen Plasmen** kann man lebendes Gewebe behandeln. Ärzte desinfizieren damit Wunden, Geschwüre und Tumoren an der Hautoberfläche.

2 Klinische Beobachtungen zeigen, dass die Plasmatherapie auch Wunden schneller heilen lässt. Vermutlich geschieht das über eine Beeinflussung der **zellulären Redoxbalance**.

3 Mediziner entwickeln weitere Anwendungen der Methode, etwa zur unterstützenden **Behandlung gegen Krebs**. Allerdings lässt sich die Plasmawirkung derzeit noch schlecht dosieren.

Mit Hilfe eines solchen Geräts richten Mediziner kalte Plasmastrahlen auf Haut- und Wundoberflächen.





In wenigen Sekunden kann ein Plasmastrahl eine keimbelastete Wundoberfläche desinfizieren. Besonders erfreulich: Auf eine Resistenzbildung seitens der Mikroben dagegen gibt es bislang keine Hinweise.

Glossar

Physikalisches Plasma: Ein Gemisch aus Atomen und/oder Molekülen, die teils im ionisierten Zustand vorliegen, sowie Elektronen. Plasmen können vollständig oder zum Teil aus Ionen bestehen; in jedem Fall enthalten sie freie Ladungsträger.

CAP: »Cold atmospheric plasmas«, physikalische Plasmen mit Temperaturen unterhalb von 40 Grad Celsius und Drücken, die denen an der Erdoberfläche entsprechen

Ionisation: Entfernung von Elektronen aus Atomen oder Molekülen. Dabei bleiben positiv geladene Reste der Atome oder Moleküle zurück, die so genannten Ionen.

Reaktive Sauerstoffspezies (ROS), reaktive Stickstoffspezies (RNS): Sauerstoff beziehungsweise Stickstoff enthaltende, reaktionsfreudige Substanzen, die im normalen Zellstoffwechsel vorkommen und an zahlreichen physiologischen Prozessen beteiligt sind – etwa an Stoffwechsellagen wie oxidativem Stress.

Redoxstatus: Die Balance zwischen Oxidationsmitteln und Antioxidanzien. Zu Oxidationsmitteln zählen freie Radikale und andere reaktionsfreudige Spezies. Bei Antioxidanzien kann es sich um Enzyme handeln, beispielsweise Superoxid-Dismutase, oder um andere Verbindungen wie Glutathion oder Vitamin C. Wird der Redoxstatus einer Zelle massiv beeinflusst, etwa durch Einbringen von reaktionsfreudigen Sauerstoffspezies, kann die Zelle unter oxidativen Stress geraten.

Mikrobenbefall auch weniger Schmerzen, verminderter Schmerzmittelbedarf, schwächere Geruchsentwicklung und damit weniger soziale Isolation. Das gilt insbesondere bei weit fortgeschrittenen und nicht mehr heilbaren Krebserkrankungen.

Zwar fehlen noch klinische Studien dazu, doch der klinische Alltag zeigt immer wieder: Behandelt man keimbefallene Wundoberflächen mit physikalischem Plasma, zerstört dies nicht nur die Krankheitserreger, sondern regt gleichzeitig und unabhängig davon die Wundheilung an. Selbst in tiefe Defekte wächst wieder Gewebe ein, und frisch entstandene Hautdecken verschließen auch solche Verletzungen, bei denen der Heilungsprozess schon seit langer Zeit stockt. Das eröffnet neue Möglichkeiten, um Geschwüre bei Diabetikern oder schlecht heilende Wunden wie offene Beine zu behandeln. Plasmajets erlauben es zudem, Infektionen bei offen liegenden Hautabtragungen vorzubeugen, etwa nach Lasertherapien. Weitere Einsatzfelder sind die Herzchirurgie oder die Desinfektion von Hautarealen, durch die hindurch technische Geräte geführt werden müssen.

Physikalisches Plasma verändert Säugetierzellen auf vielerlei Weise, wie inzwischen mehrere Untersuchungen gezeigt haben. Es beeinflusst ihre Bewegungen und stimuliert ihre Vermehrung und das Wachstum. Zudem fördert es die Herstellung von Proteinen, die Wechselwirkungen zwischen den Zellen sowie zwischen ihnen und der extrazellulären Matrix vermitteln (der faserhaltigen Substanz zwischen den Zellen). Im Gewebeverband führt das unter anderem dazu, dass vermehrt neue Blutgefäße entstehen.

Diese Wirkungen lassen sich mit sehr verschiedenen CAP-Quellen erzielen, hängen also offenbar kaum von der Art des verwendeten Gases ab. Damit stellt sich die wichtige Frage, ob den vielfältigen biologischen Effekten physikalischen Plasmas, die klinisch zu beobachten sind, einheitliche Mechanismen zu Grunde liegen. Bisher kennen wir zwei zentra-

le Wirkprinzipien kalter Atmosphärendruckplasmen. Einerseits entfalten sie ihre biologischen Effekte über Veränderungen in der wässrigen Umgebung der Zelle, andererseits in den Zellen selbst. Beides basiert überwiegend auf der Wirkung so genannter reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) und reaktiver Stickstoffspezies (RNS).

Zu diesen reaktionsfreudigen Substanzen gehören Wasserstoffperoxid (H_2O_2), das Superoxid- ($O_2\cdot^-$) und das Hydroxylradikal ($\cdot OH$) sowie Singulett-Sauerstoff (1O_2) einerseits, Stickstoffmonoxid ($\cdot NO$), Stickstoffdioxid ($\cdot NO_2$) und Peroxynitrit ($ONOO^-$) andererseits. Sie entstehen infolge der Anregung von Sauerstoff und Stickstoff aus der Atmosphäre. Das passiert etwa, wenn Luft als Arbeitsgas dient, um das Plasma herzustellen, oder wenn man hierfür ein Edelgas wie Argon oder Helium verwendet und das primär gebildete Plasma mit Luft und Flüssigkeiten in Kontakt kommt. Über eine erhöhte Konzentration solcher reaktiven Spezies beeinflussen kalte Atmosphärendruckplasmen den Redoxstatus von Zellen (siehe Glossar, S. 32). Wichtig ist die Tatsache, dass dieselben reaktionsfreudigen Substanzen auch im normalen Zellmetabolismus vorkommen und dort wichtige Funktionen beim Steuern und Vermitteln physiologischer und pathologischer Prozesse ausüben. Im Rahmen der Redoxbiologie haben Forscher solche Zusammenhänge bereits eingehend untersucht.

Ionenmix fördert Wundheilung

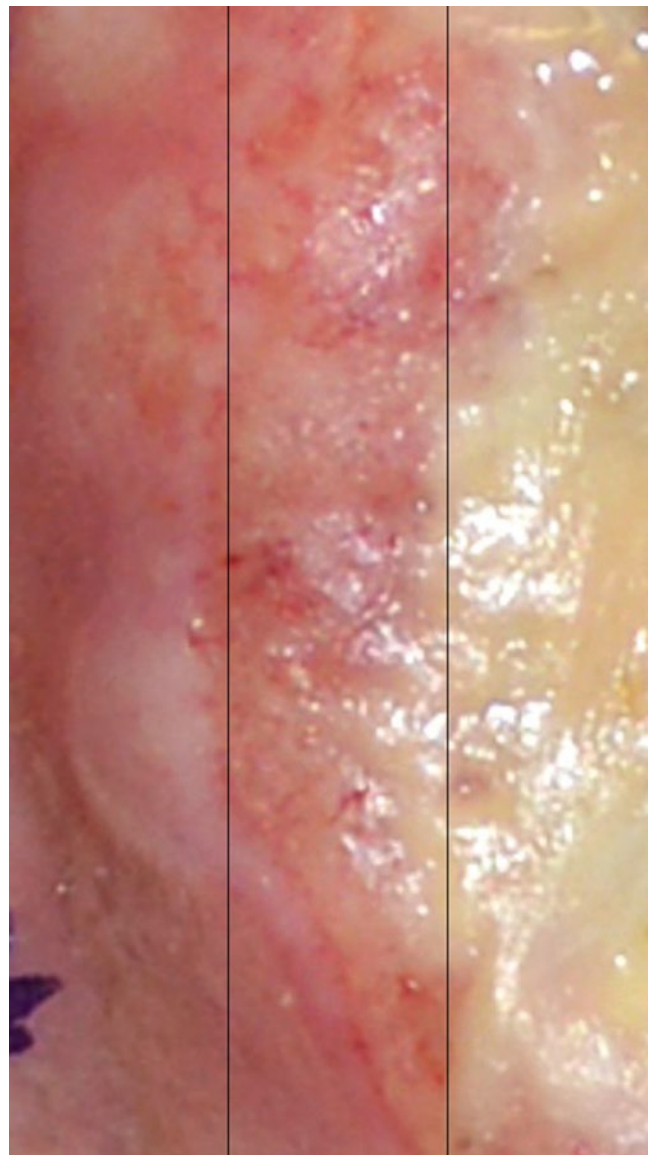
Auf diese Erkenntnisse kann zurückgreifen, wer die biologischen Effekte kalter Atmosphärendruckplasmen untersuchen möchte. So spielen die reaktiven Spezies, die als wirksame Komponenten kalter Plasmen identifiziert worden sind, auch eine wesentliche Rolle bei physiologischen Wundheilungsprozessen. Aus älteren Untersuchungen ist bekannt, dass Zellen in verletzten Geweben unter anderem von Mechanismen koordiniert werden, die ihren Redoxstatus beeinflussen. Mit Plasmajets lassen sich reaktive Sauerstoff- und Stickstoffspezies gezielt in Wunden einbringen, was die Genesung unmittelbar fördert.

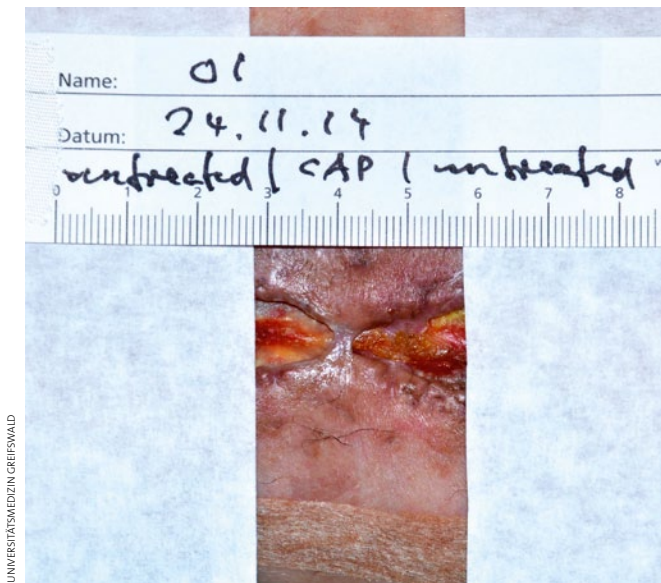
Ein Team um Anke Schmidt vom Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP) hat 2015 gezeigt: Wirkt ein physikalisches Plasma auf kultivierte Zellen ein, stellen diese mehr Enzyme und Proteine her, die für die Wundheilung relevant sind – darunter Oxidoreduktasen und Matrix-Metalloproteasen, verschiedene Zytokine und Wachstumsfaktoren. Nach Plasmabehandlungen vermehrten sich in Experimenten die Zellen stärker, weil sie infolge der Einwir-

Wunde Oberfläche eines offenen Krebsgeschwürs, wobei auf der rechten Seite ein dichter Bakterienrasen zu erkennen ist, während der mittlere Bildabschnitt das Ergebnis einer mehrmaligen Plasmabehandlung zeigt. Die Mikrobenschicht hat sich hier aufgelöst, und das darunterliegende Tumorgewebe wird sichtbar. Im linken Areal ist der Tumor unbehandelt; an dem kleinen erhabenen Gewebeknoten in der unteren Bildhälfte kann man erkennen, wie die Wucherung dort weiterwächst.

kung von ROS unter anderem mehr vom Fibroblasten-Wachstumsfaktor FGF2 ausschütteten. Bei Wundheilungsprozessen spielt weiterhin die zwischenzelluläre Kommunikation über Zell-Zell-Kontakte eine Rolle. Sie beeinflusst die Wanderung und Vermehrung von Zellen sowie Entzündungsreaktionen. Physikalisches Plasma greift auch hier ein, indem es die Produktion von Molekülen fördert oder hemmt, die an diesen Vorgängen mitwirken.

Körperzellen verfügen über zahlreiche Regelmechanismen, um ihren Redoxstatus aufrechtzuerhalten. Deshalb kann man davon ausgehen, dass ein mengenmäßig, örtlich und zeitlich begrenztes Einbringen von reaktiven Sauerstoff- und Stickstoffspezies ins Gewebe mit geringen Nebenwirkungen einhergeht. Die Plasmabehandlung ruft verschiedene zelluläre Reaktionen hervor, bei denen es sich oft um Schutz- und Reparaturmaßnahmen handelt – etwa die Herstellung von antioxidativ wirkenden Enzymen. Eine zentrale Rolle dabei spielt der Transkriptionsfaktor Nrf2, der das Ablesen entsprechender Gene über das »Antioxidans-Respon-





UNIVERSITÄTSMEDIZIN GREIFSWALD

Schlecht heilende, offene Wunde, deren mittleren Teil die Ärzte mehrfach mit einem Plasmastrahl behandelt haben, während die Bereiche rechts und links davon unbehandelt blieben. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich die Wunde im mittleren Areal bereits geschlossen hat, während sie beiderseits davon noch klafft.

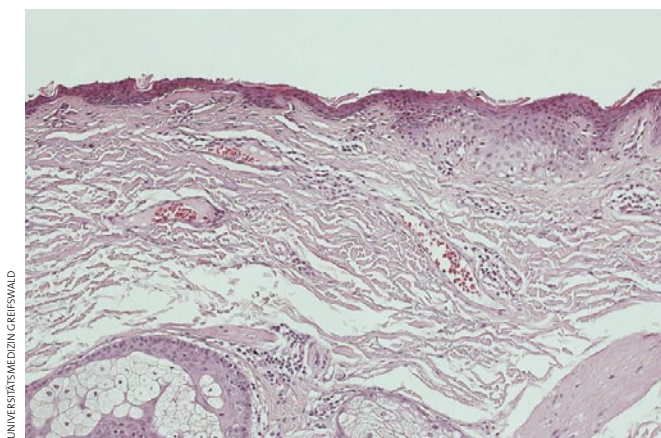
se-Element« (ARE) auf der DNA fördert. Kristian Wende und Anke Schmidt vom INP und ihre Kollegen haben 2014 und 2015 experimentell belegt, dass die Plasmabehandlung bei Keratinozyten (Horn bildenden Zellen der Oberhaut) den Nrf2-Signalweg aktiviert – mit dem Ergebnis, dass die Zellen resistenter gegenüber oxidativem Stress und seinen Folgen sind. Dies haben weitere Untersuchungen bestätigt.

Zusammen mit Ergebnissen, die an Gewebebiopsien und in klinischen Langzeituntersuchungen gewonnen wurden, bedeutet das: Nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist die medizinische Anwendung kalter Atmosphärendruckplasmen als sicher einzuschätzen. Aktuell befassen sich Forscher

mit der Frage, ob und wie physikalisches Plasma gegen Krebszellen wirkt. Bei Patienten mit bösartigen Tumoren im Mund- und Kieferbereich hat sich gezeigt, dass die CAP-Behandlung nicht nur die Besiedlung der Geschwüre durch Bakterien unterbindet, sondern das entartete Gewebe auch ein Stück weit normalisiert, indem es beispielsweise dessen Durchblutung fördert. In dem Bild auf S. 33 erscheint die plasmabehandelte Tumoroberfläche flacher und frisch durchblutet, während sich das unbehandelte Tumorgewebe weißlich und uneben präsentiert. Kann physikalisches Plasma womöglich das Wachstum von Tumorzellen hemmen? Der Frage sollte in klinischen Studien systematisch nachgegangen werden, wie Christian Seebauer von der Universität Greifswald und sein Team 2015 aufgezeigt haben. Vielleicht setzen die reaktiven Sauerstoff- und Stickstoffspezies, die der Plasmajet in die flüssige Zellumgebung einbringt, Krebszellen außer Gefecht, indem sie die Kapazitäten von deren Redoxregelmechanismen erschöpfen. Infolgedessen könnten sich Zellschäden anhäufen, die schließlich den programmierten Zelltod (Apoptose) auslösen.

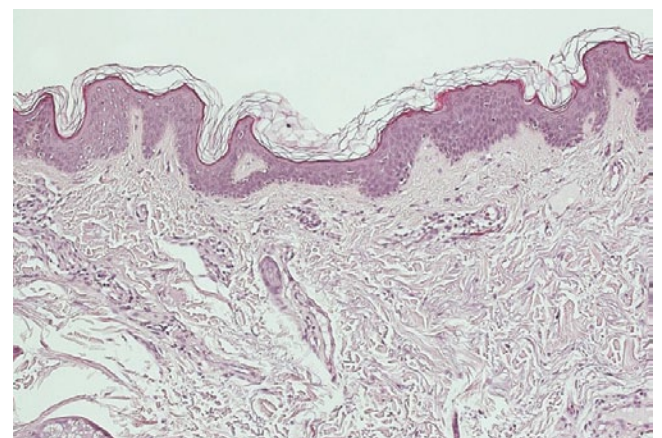
Physikalisches Plasma zerstört Tumorgewebe nicht – dies könnte auch zu gefährlichen Defekten führen, insbesondere wenn es in der Nähe großer Blutgefäße geschähe. Vielmehr scheint es einen langsamen Niedergang des entarteten Gewebes einzuleiten, wobei die benachbarten gesunden Zellen, wiederum angeregt durch Plasma, als Narbengewebe in die entstehende Lücke einwachsen. Hier zeichnen sich faszinierende Anwendungen ab, für die allerdings derzeit noch keinerlei klinische Studien vorliegen.

Immerhin haben Lars Ivo Partecke von der Universität Greifswald und sein Team 2012 an einem soliden In-vivo-Tumormodell demonstriert, dass eine Behandlung mit kaltem Atmosphärendruckplasma die oberen Zellschichten des Tumors mittels Einleitung der Apoptose inaktiviert. Ergänzend dazu ergaben Versuche an Mäusen in den Jahren 2011 und 2012: Plasmabehandlungen durch die Haut hindurch können das Wachstum von soliden Tumoren unter der Haut ver-



UNIVERSITÄTSMEDIZIN GREIFSWALD

Gewebebiopsien zweier unmittelbar benachbarter Hautareale. Die linke davon wurde über längere Zeit hinweg physikalischem Plasma ausgesetzt, die rechte diente als unbehandelte



Kontrolle. Erstere erscheint gestrafft und in der Oberhaut weniger verdickt, während die zweite faltig und mit vielen Zelltrümmern belegt ist.

langsamen und die Überlebenszeit der behandelten Nager verlängern, verglichen mit unbehandelten Tieren. Diese Befunde legen die Möglichkeit nahe, chirurgische Eingriffe an Krebspatienten mit Plasmabehandlungen zu unterstützen – besonders wenn sich der Tumor nicht vollständig entfernen lässt. Ob und wie man damit Geschwulste verkleinern oder sogar beseitigen kann, bedarf weiterer Grundlagenforschung. Unklar ist vor allem noch, wie eine Tiefenwirkung des Plasmas zu erzielen wäre.

Besseres Hautbild

Zu den möglichen Anwendungsgebieten zählt auch die ästhetische Medizin, denn mit physikalischem Plasma lässt sich das Erscheinungsbild von erschlafftem und faltigem Hautgewebe sichtbar verbessern. Die Bilder links unten zeigen Gewebebiopsien von zwei unmittelbar benachbarten Hautarealen. Eine davon wurde über längere Zeit hinweg physikalischem Plasma ausgesetzt, die andere diente als Kontrolle. Die erste erscheint gestrafft und mit einer dünneren Oberhaut, während die zweite faltig und mit vielen Zelltrümmern belegt ist. Das spiegelt den Gesamteindruck wider, wonach entsprechend behandelte Biopsien insgesamt fester, rosiger und frischer wirken. Klinische Studien fehlen allerdings auch hierzu noch.

Weiter entwickelt, aber immer noch im vorklinischen Stadium ist die Anwendung von Plasma gegen Zahnkaries. Diese Erkrankung wird ebenfalls von Keimen verursacht, die sich mit physikalischem Plasma deaktivieren beziehungsweise abtöten lassen. Es bleibt zu klären, ob die Methode auf mineralreichem Zahnschmelz ebenso gut wirkt wie auf Hautoberflächen und ob sie hilft, Zahnkaries vorzubeugen oder vielleicht sogar kariöse Höhlen zu sanieren. Zudem könnten sich CAP in der Augen- und HNO-Heilkunde bewähren, ebenfalls zur Infektionsbehandlung.

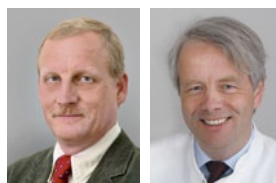
Ein ganz anderes Gebiet ist die Behandlung von Flüssigkeiten mit physikalischem Plasma. Sie kann dazu führen, dass die Flüssigkeit vorübergehend selbst biologisch wirksam wird. Das haben wir zunächst an plasmabehandelten Kochsalzlösungen demonstriert, die antimikrobielle Aktivität zeigen. Japanische Forscher um Hirosama Tanaka von der Nagoya University haben Zellkulturmedium auf diese Weise so verändert, dass es Krebszellen in die Apoptose treibt, was bei der Bekämpfung metastasierter Tumoren beispielsweise in der Bauchhöhle von Nutzen sein könnte. Die als Plasmapharmazie bezeichnete Disziplin umfasst das Herstellen, Optimieren oder Stabilisieren wirkstoffhaltiger Flüssigkeiten mit Hilfe von CAP und befindet sich derzeit noch im Stadium der Grundlagenforschung.

Insgesamt steht die Plasmamedizin am Anfang eines sehr erfolgversprechenden Wegs in die klinische Anwendung. Wegen den komplexen Wechselwirkungen verschiedener Plasmakomponenten mit Zellen, Geweben und Flüssigkeiten ergibt sich jedoch eine besondere Herausforderung: das Quantifizieren der Wirkung im Sinn einer Dosis, wie sie etwa in der Foto- und Strahlentherapie üblich ist. Zurzeit erfolgt diese

Kontrolle über die Einwirkzeit. Da die Art der verwendeten Plasmaquelle aber großen Einfluss auf die Effektstärke hat, ist die Einwirkzeit nicht sehr aussagekräftig, wenn es darum geht, verschiedene Forschungsergebnisse zu vergleichen. Eine geräteunabhängige Angabe von Behandlungsintensitäten im Sinn von Dosen ist bislang leider nicht möglich.

Die großen Fortschritte in der Plasmamedizin lassen sie zunehmend in den Medien sichtbar werden und wecken bei Patienten wie Ärzten die Hoffnung, damit klinische Probleme in den Griff zu bekommen, die bisher nicht oder nur unbefriedigend gelöst sind. Schon jetzt ist abzusehen, dass das Gebiet wirtschaftlich sehr interessant werden dürfte. Daher haben Forscher und Geräteentwickler eine große Verantwortung, einerseits auf solider wissenschaftlicher Basis die klinischen Anwendungen möglichst zügig voranzubringen, andererseits aber nicht voreilige, unerfüllbare Erwartungen an die Methode zu schüren und damit die Plasmamedizin in Misskredit zu bringen. ~

DIE AUTOREN



Thomas von Woedtke (links) ist Professor für Plasmamedizin an der Universität Greifswald und Forschungsschwerpunkt-leiter am dortigen Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie. **Hans-Robert Metelmann** arbeitet als Pro-

fessor und Direktor an der Klinik und Poliklinik für Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie und Plastische Operationen der Universität Greifswald.

QUELLEN

Metelmann, H.-R. et al.: Head and Neck Cancer Treatment and Physical Plasma. In: *Clinical Plasma Medicine* 3, S. 17–23, 2015

Partecke, L. I. et al.: Tissue Tolerable Plasma (TTP) Induces Apoptosis in Pancreatic Cancer Cells in Vitro and in Vivo. In: *BMC Cancer* 12, S. 473, 2012

Schmidt, A. et al.: Non-Thermal Plasma Activates Human Keratinocytes by Stimulation of Antioxidant and Phase II Pathways. In: *The Journal of Biological Chemistry* 290, S. 6731–6750, 2015

Tanaka, H. et al.: Plasma with High Electron Density and Plasma-Activated Medium for Cancer Treatment. In: *Clinical Plasma Medicine* 3, S. 72–76, 2015

von Woedtke, T. et al.: Plasmas for Medicine. In: *Physics Reports* 530, S. 291–320, 2013

LITERATURTIPPS

Metelmann, H.-R. et al.: Indikationen und Behandlungstechniken. In: Metelmann, H.-R., Hammes, S. (Hg.): *Lasermedizin in der Ästhetischen Chirurgie*. Springer Medizin, Berlin und Heidelberg 2015
Übersicht über Laserbehandlungen in der ästhetischen Chirurgie

Nationales Zentrum für Plasmamedizin: Positionspapier zum Risikopotenzial und zu Anwendungsperspektiven von kaltem Atmosphärendruckplasma in der Medizin, 2014. Abrufbar unter www.plasma-medicin.de
Kontinuierlich überarbeitete Zusammenfassung des aktuellen Wissensstands auf dem Gebiet der Plasmamedizin

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408639

Spurensuche im All

Leben auf fremden Planeten sollte Fingerabdrücke in deren Atmosphären hinterlassen. Mit immer besseren Beobachtungstechniken und Computermodellen ebnen Forscher jetzt den Weg, diese Signale zu finden und zu verstehen.

Von Florian Rodler

Können wir Hinweise auf Leben auf fernen Welten finden? Was heute noch nach Sciencefiction klingt, wird in den nächsten Jahren tatsächlich möglich sein. Wir kennen bereits mehr als 2100 Exoplaneten – von erdgroßen Gesteinsplaneten bis Gasplaneten doppelt so groß wie Jupiter. Einige der mehr als 1000 Exemplare, die der Kepler-Satellit der NASA bis 2013 entdeckte, befinden sich in der habitablen Zone um ihre Sonne. In dieser Region ist die Strahlung des Sterns gerade so stark, dass die Temperatur auf der Oberfläche eines Planeten die Existenz von flüssigem Wasser erlauben könnte – eine Grundvoraussetzung für Leben, wie wir es kennen.

Doch solange wir die Zusammensetzung der Planetenatmosphäre nicht kennen, können wir keinerlei Aussagen über die tatsächlichen Bedingungen auf diesem Himmelskörper treffen. Denn nicht nur die Strahlungsleistung des Sterns in einem bestimmten Abstand bestimmt das Klima dort, sondern auch vorhandene Treibhausgase in der Gashülle.

Da die meisten der bekannten Exoplaneten von der Erde aus gesehen zu nahe bei ihrem Stern stehen und von diesem überstrahlt werden, lassen sie sich nicht getrennt von ihm beobachten. Stattdessen empfangen wir das Licht der beiden Objekte gemeinsam. Wollen wir die Atmosphäre eines Exoplaneten untersuchen, benötigen wir ausgefeilte Techniken, um das schwache Planetensignal vom extrem hellen Sternenlicht trennen zu können.

Die derzeit erfolgreichste Methode, um Atmosphären von Exoplaneten zu untersuchen, ist die Transmissionsspektro-

ESO / ILLUS CALÇADA (WWW.ESOORG/PUBLIC/IMAGES/ESO0919A) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS/ORG/licenses/by/4.0/legalcode)



DIE SERIE IM ÜBERBLICK

GROSSFAHNDUNG NACH EXOPLANETEN

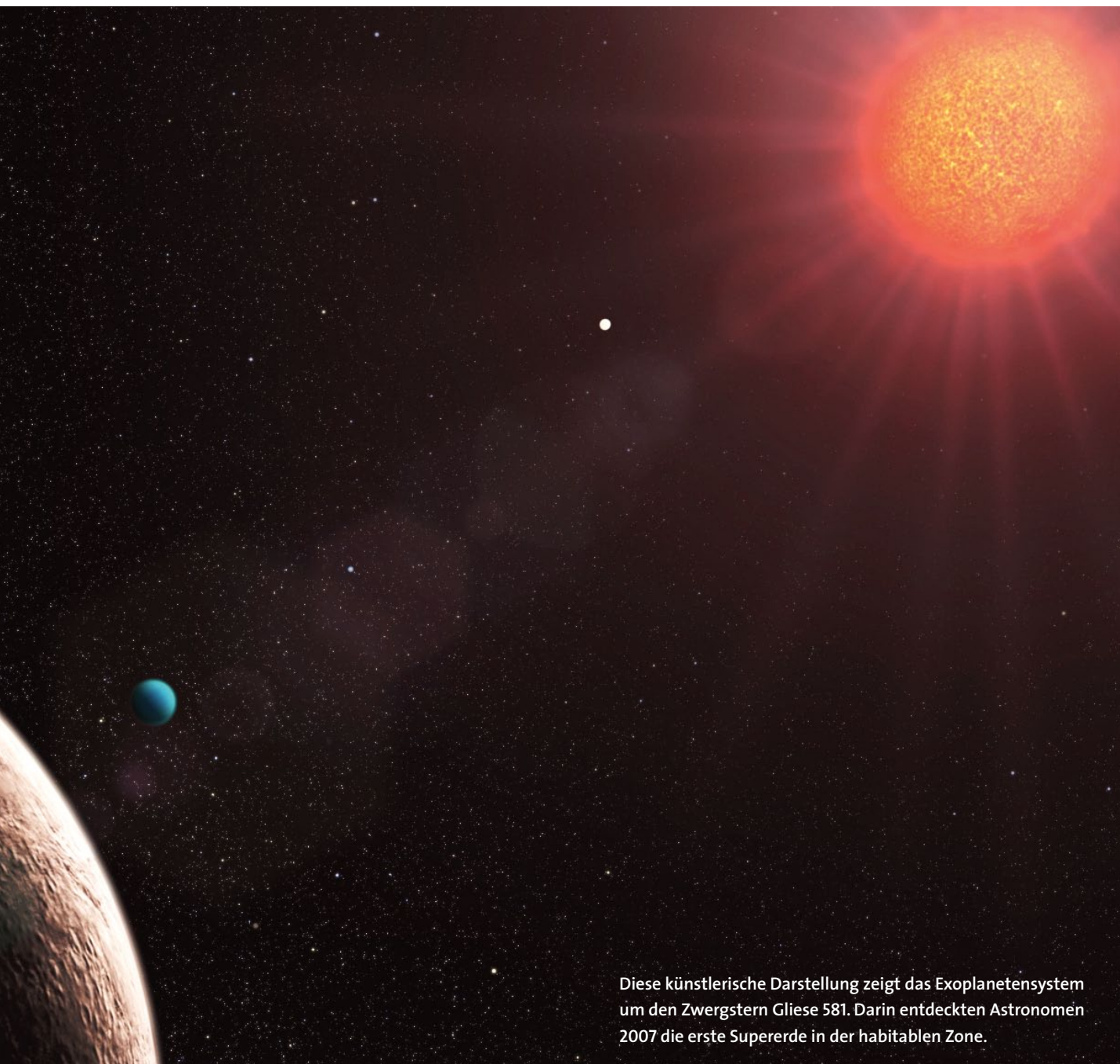
- | | | |
|--------|---|------------------|
| Teil 1 | ▶ Auf der Jagd nach der zweiten Erde
<i>Kevin Heng und Joshua Winn</i> | April 2016 |
| Teil 2 | ▶ Heiße Jupiter im Visier
<i>Lee Billings</i> | Mai 2016 |
| Teil 3 | ▶ Spurensuche im All
<i>Florian Rodler</i> | Juni 2016 |

skopie. Sie lässt sich bei solchen Systemen anwenden, die räumlich so orientiert sind, dass ein Planet von der Erde aus gesehen regelmäßig vor seinem Stern vorüberzieht. Besitzt der Exoplanet eine Atmosphäre, so scheint das Sternenlicht während eines Transits durch sie hindurch, und die Atome und Moleküle darin absorbieren einen Teil des Sternenlichts bei bestimmten Wellenlängen.

Im Jahr 2001 gelang es Astronomen erstmals, die Atmosphäre eines Exoplaneten zu beobachten. Inzwischen haben sie die Gashüllen von gut 50 Exoplaneten analysiert, größtenteils solche von heißen Jupitern – aufgeheizten Gasriesen also, die ihre Sonne in extrem geringen Abständen umkrei-

sen. Diese Atmosphären sind nach unserem Verständnis exotisch, denn unser Sonnensystem verfügt nicht über derartig aufgeblähte Gasplaneten mit Temperaturen jenseits von 1000 Grad Celsius. Immerhin bestehen diese sonderbaren Exoplanetenatmosphären wie ihre hiesigen Gegenstücke zum Großteil aus Wasserstoff und Helium. Darüber hinaus ließen sich in ihnen Gase wie Wasserdampf, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid, Kalium und Methan nachweisen.

Neben seiner Zusammensetzung lässt sich mittels Spektroskopie auch die Geschwindigkeit eines Objekts relativ zu uns zu messen, und zwar anhand des Dopplereffekts. Befinden sich Gasriesen besonders nah an ihrem Stern und heizen



Diese künstlerische Darstellung zeigt das Exoplanetensystem um den Zwergstern Gliese 581. Darin entdeckten Astronomen 2007 die erste Supererde in der habitablen Zone.

ESO / LUIS CALÇADA (WWW.ESOORG/PUBLIC/IMAGES/ESO919A) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS/CC BY 4.0/LEGALCODE)

sich dadurch stark auf, können sich heftige Winde entwickeln, die von der extrem warmen Tagseite zur kühleren Nachtseite wehen. Befindet sich der Planet nun vor dem Stern in der Transitposition, so blasen die Stürme von der dem Beobachter abgewandten Tagseite des Planeten zur ihm zugewandten Nachtseite. Dadurch verschieben die bewegten Luftmassen das Transmissionsspektrum leicht ins Blaue. Genau diesen Effekt konnten Forscher bei den beiden heißen Gasriesen HD 209458b und HD 189733b beobachten. Wie sich zeigte, können solche Stürme Geschwindigkeiten von mehreren tausend Kilometern pro Stunde erreichen.

Die Untersuchung der Atmosphären kleiner Exoplaneten von weniger als vier Erddurchmessern steckt allerdings noch in den Kinderschuhen. 2009 wurde die Supererde GJ1214b entdeckt: Dieser Transitplanet mit 2,6-fachem Erddurchmesser umkreist seinen kühlen Zwergstern der Spektralklasse M alle 1,6 Tage. Auf Grund der kleinen Größe des Zentralgestirns von nur 20 Prozent des Sonnendurchmessers erschien dieses System ideal, um die planetare Gashülle dieser Supererde zu analysieren. Denn was bei der Transmissionsspektroskopie letztlich zählt, ist das Flächenverhältnis der transparenten Planetenatmosphäre und der scheinbaren Sternscheibe. Umkreist ein Planet gegebenen Ausmaßes einen großen Stern, so erhalten wir zwar mehr Licht vom Stern selbst, es passiert aber ein geringerer Anteil davon die Planetenhülle als bei einem kleineren Stern. Ist der Stern klein, so ist es also einfacher, die Zusammensetzung der Planetenatmosphäre zu messen.

Kurz nach der Entdeckung von GJ1214b versuchte ein US-amerikanisches Astronomenteam die Zusammensetzung von dessen Atmosphäre mit dem Hubble-Weltraumteleskop zu analysieren. Das Ergebnis war ernüchternd: Das Transmis-

AUF EINEN BLICK

DIE ATMOSPHÄRE DURCHSCHAUEN

1 Mittlerweile kennen Astronomen **mehr als 2100 Exoplaneten**. Welche Bedingungen dort herrschen und ob dort vielleicht Leben, wie wir es kennen, existiert, lässt sich nur herausfinden, indem man ihre Atmosphären untersucht.

2 Bei einem Transit passiert ein Teil des Sternenlichts die planetare Atmosphäre. Je nach Zusammensetzung filtert sie dabei Licht bestimmter Wellenlängen heraus. Die Moleküle aus der Atmosphäre hinterlassen so im **Transmissionsspektrum** charakteristische Spuren.

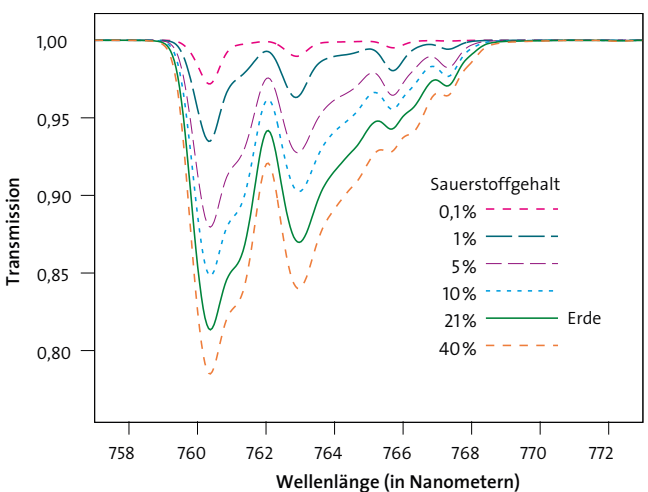
3 Mit heutigen Techniken lassen sich noch nicht die **Atmosphären erdähnlicher Exoplaneten** analysieren. Wie Modelle zeigen, wird dies aber mit einer neuen Teleskopgeneration möglich sein.

sionsspektrum wies keinerlei Absorption von Atomen und Molekülen auf – eigentlich ein Indiz für einen Gesteinsplaneten ohne jegliche Atmosphäre. Die aus anderen Beobachtungen bestimmte Dichte von GJ1214b deutete jedoch auf einen Gasplaneten hin. Ein weiteres plausibleres Erklärungsmodell wäre eine durchgängige Wolkenschicht, welche das Sternenlicht nicht passieren und die Atmosphäre somit undurchsichtig erscheinen lässt.

Im Februar 2016 ließ eine Publikation einer englischen Astronomenengruppe über die Supererde 55 Cancri e (auch »Janssen« genannt) aufhorchen. Der Gesteinsplanet von doppelter Größe und achtfacher Masse der Erde umkreist seinen hellen Mutterstern in einem Mehrfachplanetensystem auf einer engen Bahn alle 17,5 Stunden. Die Forscher interpretierten leichte Strukturen im Transmissionsspektrum als Anzeichen von Wasserstoff und Helium in seiner Atmosphäre. Sollte sich dies bestätigen, wäre 55 Cnc e der bislang kleinste Exoplanet mit einer nachgewiesenen Atmosphäre. Allerdings stellt sich bei einem so kleinen Himmelskörper die Frage, wie er seine Gashülle, noch dazu aus den leichtesten Elementen, derart nahe am Stern festhalten kann, wo er intensiver Strahlung und starkem Sternenwind ausgesetzt ist. Hatte dieser Planet vielleicht früher eine dichtere Atmosphäre, und beobachten wir nur noch die Überreste davon?

All das sind bereits viele interessante Details, die wir heute über fremde Welten erfahren können, die aber auch neue Fragen aufwerfen. Doch wonach müssen wir suchen, wenn wir auf Spuren von Leben stoßen wollen? Stellen wir uns dazu vor, ein außerirdisches Astronomenteam entdeckt einen kleinen, erdgroßen Gesteinsplaneten, der etwa alle 365 Tage 13 Stunden lang vor seiner gelben Sonne vorüberzieht und dabei einen geringen Teil von ihr – nur etwa 0,01 Prozent – verdeckt. Berechnungen unter Berücksichtigung der Temperatur des Sterns und des Abstands Planet-Stern würden für diesen Planet eine Durchschnittstemperatur von –18 Grad Celsius ergeben. Für die Existenz von flüssigem Wasser wäre das zu kalt, allerdings könnten auch Treibhausgase in der Planetenatmosphäre vorkommen und für wärmere Temperaturen sorgen.

Sauerstoff in der Modellatmosphäre



Je nach Startbedingungen und danach aktiven Prozessen in einer Atmosphäre ändert sich die Konzentration der verschiedenen Bestandteile. Je mehr molekularer Sauerstoff etwa vorhanden ist, umso stärker wird das Sternenlicht bei einem Transit bei den charakteristischen Wellenlängen blockiert.

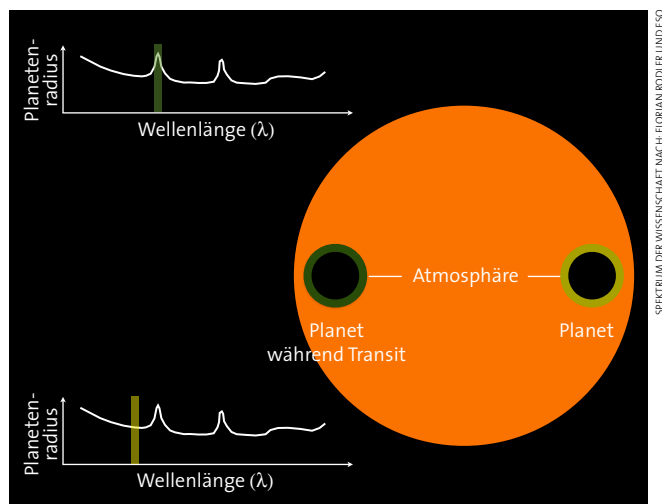
Um die Planetenatmosphäre genauer unter die Lupe zu nehmen, startet das Astronometeam eine groß angelegte Beoberkungskampagne mit riesigen Teleskopen. Was würden sie sehen? Vielleicht eine Atmosphäre wie jene der Erde, die sich hauptsächlich aus Stickstoff und Sauerstoff zusammensetzt. Letzterer würde Fingerabdrücke im sichtbaren Bereich des Spektrums hinterlassen, vornehmlich bei drei Rottönen. Im infraroten Spektrum offenbart unsere Atmosphäre die Treibhausgase Kohlenstoffmonoxid, Methan, Ozon, Lachgas und Wasserdampf. Sie bewirken dort, dass die von der Sonne kommende, kurzwelligere Strahlung die Atmosphäre zwar weit gehend passieren, die langwelligere Wärmestrahlung von der aufgeheizten Erdoberfläche aber nicht ins Weltall entweichen kann. Dadurch wärmt sich die Atmosphäre auf, und die Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche steigt um 33 Grad Celsius auf angenehme +15 Grad Celsius.

Bei der Frage nach flüssigem Wasser spielt aber auch der Atmosphärendruck auf der Planetenoberfläche eine Rolle. Auf der Erde lässt er Wasser auf Meereshöhe bei 100 Grad Celsius kochen. Bei niedrigeren Drücken sinkt die Siedetemperatur. Mars etwa besitzt eine so dünne Atmosphäre, dass Wasser nur im Temperaturbereich von 0 bis 10 Grad Celsius flüssig wäre und oberhalb davon sofort verdampfen würde. Und bei einem Atmosphärendruck von weniger als 0,6 Prozent des irdischen kann Wasser in flüssiger Form überhaupt nicht mehr existieren, sondern nur als Eis oder Wasserdampf.

Verräterisches Ungleichgewicht

Die außerirdischen Beobachter würden außerdem feststellen, dass sich die Erdatmosphäre nicht im chemischen Gleichgewicht befindet – ein starkes Indiz für Leben. Obwohl Sauerstoff und Methan Gase sind, die chemisch miteinander reagieren und dabei Wasser und Kohlenstoffdioxid bilden, existieren sie gleichzeitig in unserer Atmosphäre. Würde Sauerstoff nicht permanent nachproduziert werden, so würde sein Gehalt in der Erdatmosphäre stetig absinken. Das ist aber nicht der Fall. Es muss also einen Mechanismus geben, der diese Gase laufend nachliefert. Auf der Erde sorgt dafür in erster Linie das Leben: Die Photosynthese der Pflanzen erzeugt Sauerstoff und hat unsere heutige Atmosphäre geschaffen, und Stoffwechselprozesse in Mikroorganismen produzieren Methan. Letzteres wird allerdings auch in geringerem Maß durch vulkanische Aktivitäten ausgestoßen.

Wollen wir Hinweise auf Leben in anderen Welten finden, werden wir insbesondere nach solchen Kombinationen an Gasen suchen, die gleichzeitig eigentlich nicht existieren dürften. Allerdings gibt es auch abiotische Mechanismen, die eine durch Leben veränderte Atmosphäre vorgaukeln könnten. Neben geologischer Aktivität spielt dabei die energiereiche ultraviolette Strahlung der Sterne eine Rolle: Sie kann Atome aus Molekülverbindungen herausschlagen und dadurch die chemische Zusammensetzung der planetaren Atmosphären in ihrer Nähe verändern. Die UV-Strahlung kann etwa eine von Wasserdampf dominierte Gashülle in Sauer-



Besitzt ein Exoplanet eine Atmosphäre, dann absorbieren die Atome und Moleküle in ihr das Licht bei ganz bestimmten Wellenlängen. In diesem Spektralbereich erscheint der Planet größer, da die Gashülle dort lichtundurchlässig ist. Anhand des Transmissionsspektrums können die Wissenschaftler außerdem die Zusammensetzung der Atmosphäre untersuchen.

stoff und Wasserstoff aufspalten. Der leichte Wasserstoff würde dann langsam ins Weltall entweichen, und die Atmosphäre würde sich mit dem schwereren Sauerstoff anreichern. Simulationen von Planetenatmosphären sind also essenziell dafür, jene Kombinationen an Gasen zu lokalisieren, welche sich mit der geringsten Wahrscheinlichkeit abiotisch produzieren lassen und nebeneinander in einer Atmosphäre vorhanden zu sein können: Methan und Sauerstoff scheint eine solche zu sein.

Derartige Modellrechnungen sind wegen der vielen freien Parameter jedoch sehr zeitaufwändig. Dabei variieren die Forscher verschiedene Zusammensetzungen der Planetenatmosphären und erstellen so ein breites Raster an möglichen Bedingungen wie sie auf extrasolaren Welten existieren könnten. Als Startbedingungen gibt man Parameter wie die Größe und die Masse von bekannten Planeten vor. Diese bestimmen die Schwerkraft auf der Planetenoberfläche und haben somit einen wesentlichen Einfluss auf die vertikale Ausdehnung der Atmosphäre. Eine ebenso wichtige Anfangsbedingung dafür ist die Masse der Atmosphäre und dadurch ebenfalls der Druck, der auf der Planetenoberfläche lastet. Ist ein Planet in Relation zu seiner Größe massereich – seine Dichte also hoch, so wird seine Atmosphäre tendenziell kompakter sein und eine geringe vertikale Ausdehnung aufweisen. Dies ist bei Gesteinsplaneten wie der Erde der Fall, deren Atmosphäre gerade einmal 100 Kilometer in die Höhe reicht. Das entspricht nur 1,6 Prozent des Erdradius. Deshalb ist es so schwierig, die Gashüllen von Gesteinsplaneten zu beobachten.

In ihren Simulationen spielen die Forscher verschiedene chemische Zusammensetzungen sowie Massen von Atmo-

sphären durch. Dabei lässt sich auch die stetige Nacherzeugung von Gasen durch externe Mechanismen wie Leben und Vulkanismus berücksichtigen. Und zu guter Letzt fließt noch der Sterntyp, Abstand vom Stern und die Rotation des Planeten ein. Denn zum einen bestimmen Energieverteilung und Intensität der Einstrahlung auf den Planeten dessen Temperatur. Zum anderen kann etwa ein entsprechender Anteil an UV-Strahlung die Bildung von Ozon vorantreiben.

Als Resultat erhält man den Aufbau der Atmosphäre in Form von Temperatur, Druck und der atomaren und molekularen Zusammensetzung in Abhängigkeit der Höhe über der Planetenoberfläche. Die Zusammensetzung der unterschiedlichen Atmosphärenschichten kann stark variieren: In der Erdatmosphäre etwa kommt Ozon in Bodennähe kaum vor, während es sich in einer Höhe von 30 Kilometern konzentriert. Wasserdampf hingegen tritt hauptsächlich in Luftschichten unterhalb von 15 Kilometern auf.

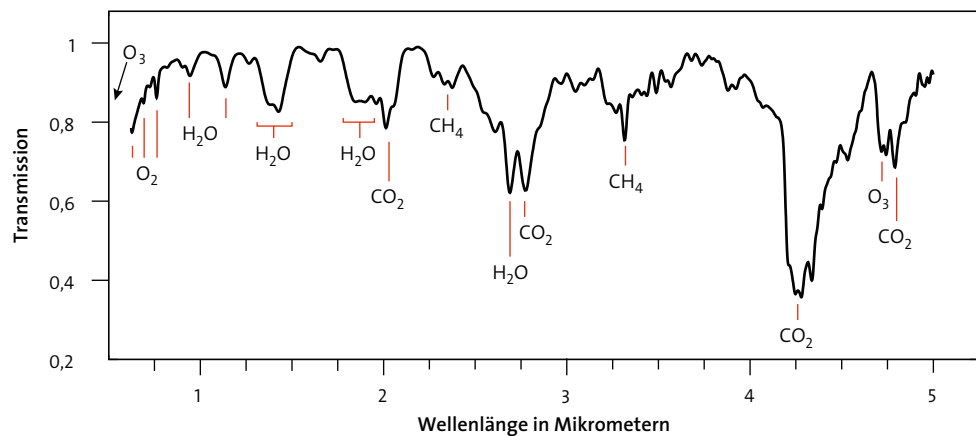
Allerdings erlaubt uns die Transmissionsspektroskopie nicht, die einzelnen Luftschichten getrennt voneinander zu beobachten, sondern man misst dabei die Summe aller At-

mosphärenschichten. Verschiedene Studien widmen sich derzeit unter anderem der Frage, wie genau sich die Konzentration der verschiedenen Gase in einer Exoplanetenatmosphäre mit künftigen Teleskopen messen lassen. Denn je mehr von einem Gas vorhanden ist, desto mehr Sternenlicht wird sie während eines Transits bei den für das Gas charakteristischen Wellenlängen schlucken. Das hypothetische außerirdische Astronomenteam könnte etwa anhand der Messung der Sauerstofflinientiefen erkennen, dass unsere Atmosphäre recht sauerstoffreich ist.

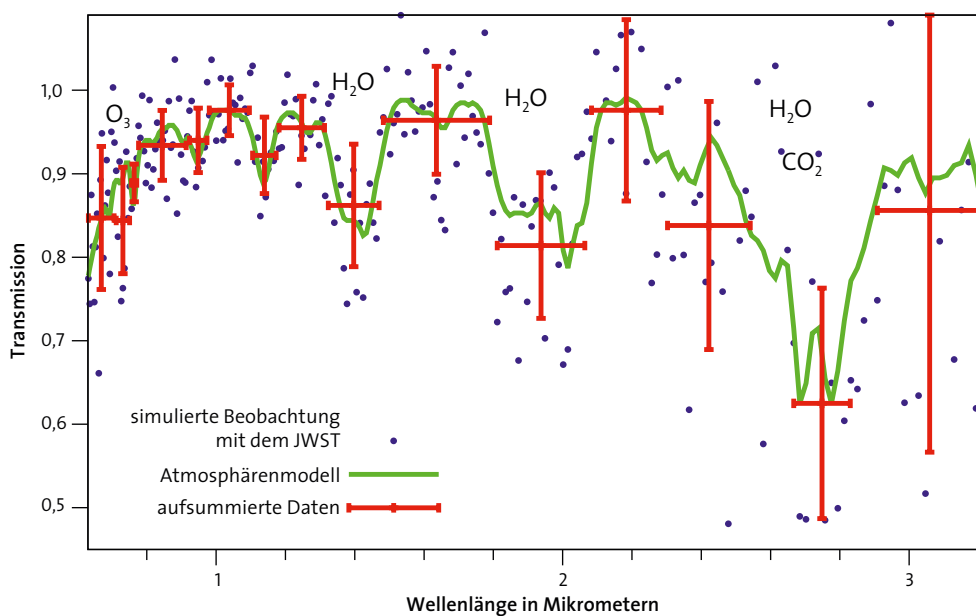
Supererde unter günstigen Bedingungen

Bezüglich lebensfreundlicher Welten war die Entdeckung des Planetensystems bei dem M-Zwergstern Gliese 581 im Jahr 2007 eine Sensation, handelt es sich doch um die erste bekannte Supererde in einer habitablen Zone. In den darauf folgenden Jahren sorgte vor allem das Kepler-Weltraumteleskop für bahnbrechende Entdeckungen von potenziell lebensfreundlichen Exoplaneten – heute kennen wir 33 solcher Exemplare.

Die »Erde« aus der Ferne



Das (simulierte) Transmissionsspektrum der Erdatmosphäre zeigt im nahen Infraroten für die Treibhausgase Wasser (H₂O), Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) sowie Ozon (O₃) charakteristische Einbrüche.



Mit 150 Stunden Beobachtungszeit des James Webb Space Telescope ließe sich ein Transmissionsspektrum einer Supererde um einen benachbarten M-Zwergstern aufnehmen. Wir würden in erster Linie Wasser, Kohlenstoffdioxid und Ozon finden.

Die meisten Planeten, die mit dem Kepler-Satelliten entdeckt wurden, umkreisen allerdings weit entfernte Sterne, die einfach zu dunkel für genauere Beobachtungen der Planetenatmosphären sind. Doch bereits 2017 wird die NASA mit der TESS-Mission die Nachfolge von Kepler ins Weltall schicken. Dieser Satellit wird den gesamten Himmel systematisch nach potenziell lebensfreundlichen Transitplaneten um hellere M-Zwergsterne durchforsten.

2024 soll schließlich die europäische PLATO-Mission starten, welche auch erdähnliche Transitplaneten um sonnenähnliche Sterne entdecken wird. Und vielleicht birgt einer dieser Planeten Leben auf seiner Oberfläche, das Gase erzeugt und seine Atmosphäre aus dem chemischen Gleichgewicht gebracht hat.

Doch was machen wir mit all diesen Planeten, wenn wir nicht die geeigneten Teleskope haben, um deren Atmosphären zu charakterisieren? Die gute Nachricht ist: Solche Instrumente werden gerade gebaut, und sie dürften in den nächsten Jahren die bisherigen Beobachtungstechniken in der Astronomie revolutionieren.

Das James Webb Space Telescope etwa, dessen Start für Herbst 2018 vorgesehen ist, wird voraussichtlich einige der mit TESS entdeckten Gesteinsplaneten genauer untersuchen können. Doch selbst für diesen Weltraumgiganten wird der Beobachtungsaufwand für derartige Transmissionsspektren enorm sein. Machbarkeitsstudien gehen für einen Planeten mit einem anderthalbfachen Durchmesser der Erde und einer erdähnlichen Atmosphäre von über 150 Stunden reiner Beobachtungszeit aus, um dort Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf in den hiesigen Konzentrationen nachweisen zu können.

Eine neue Teleskopgeneration am Boden

Auch am Boden entstehen derzeit neuartige Großobservatorien: zwei davon in der Wüste Atacama in Chile, ein weiteres ist für Hawaii geplant. Das größte Teleskop wird das E-ELT (European Extremely Large Telescope) der ESO in Chile mit einem Spiegeldurchmesser von rund 40 Metern sein, bei einem Budget von knapp einer Milliarde Euro. In etwa einer Dekade wird es das atmosphärische Transmissionsspektrum eines erdähnlichen Gesteinsplaneten in der habitablen Zone eines relativ sonnennahen M-Zwergsterns messen und mit nur 30 Stunden Beobachtungszeit Sauerstoff darin nachweisen können.

Der Nachteil der Transmissionsspektroskopie ist allerdings, dass sie auf die spezielle Orientierung eines Systems relativ zum Beobachter angewiesen ist. Statistisch betrachtet zieht weniger als ein Prozent aller extrasolaren Planeten von uns aus gesehen vor seinem Mutterstern vorüber. Wie lassen sich also andere ferne Welten studieren, deren Atmosphären nicht während eines Transits durchleuchtet werden?

Mit dem E-ELT wird es außerdem möglich sein, nach erdähnlichen Planeten um sonnenähnliche Sterne in unserer nächsten Nachbarschaft zu suchen und diese direkt abzubilden. Dank der so genannten adaptiven Optik wird es die Tur-

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

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



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



bulenzen der Erdatmosphäre weit gehend kompensieren können und gestochen scharfe Bilder liefern. Aktuelle Schätzungen zufolge sollte sich mit dem E-ELT ein Planet mit dem anderthalbfachen Durchmesser der Erde sogar auf einer venusähnlichen Bahn um unseren 4,3 Lichtjahre entfernten Nachbarstern Alpha Centauri A abbilden lassen. Und mit einer Beobachtungszeit von rund 30 Stunden könnte man Gase wie Kohlenstoffdioxid und Ozon in der Tagseite seiner Atmosphäre nachweisen.

Für diese Methode dürfen die Planeten allerdings nicht allzu nah bei ihrem Stern stehen und die Objekte nicht weiter als zwölf Lichtjahre von uns entfernt sein. Denn sonst reicht die Auflösung auch beim E-ELT noch nicht zum direkten Abbilden aus. Man wird also nach potenziell lebensfreundlichen Gesteinsplaneten bei sonnenähnlichen Sterne suchen, die wie die Erde ihre Sterne auf relativ weiten Bahnen umkreisen. Vielleicht entdecken wir schon bei unseren Nachbarsonnen ein Pendant zu unserer Erde?

So werden uns diese Teleskope der nächsten Generation erstmals in die Lage versetzen, auf fernen Welten nach Hinweisen auf Leben zu suchen. Doch bereits jetzt laufen schon die Planungen für die Nachfolgeteleskope des JWST und den irdischen Riesenteleskopen, um in 20 Jahren eine noch größere Anzahl an erdähnlichen Planeten direkt abbilden zu können und sogar nach Anzeichen für eine Vegetation auf ihnen zu suchen. Kurzum – es ist nur eine Frage der Zeit, dass wir belebte Welten jenseits des Sonnensystems finden werden. ~

DER AUTOR



Florian Rodler promovierte 2008 an der Universität Wien. Er forscht derzeit am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg sowie am Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics bei Boston, USA, und widmet sich der Beobachtung von Exoplanetenatmosphären.

LITERATURTIPP

Kaltenegger, L.: Faszinierende neue Welten. In: Spektrum der Wissenschaft, 7/2013, S. 58–66
Hier erfahren Sie mehr über die spannende Suche nach einer zweiten Erde.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408640

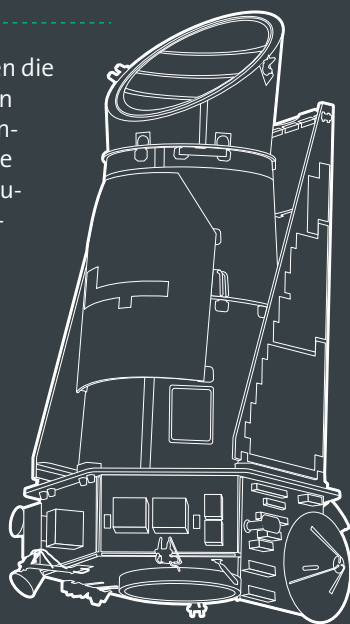
EXOPLANETEN DIE NÄCHSTEN 20 JAHRE

Forscher haben mittlerweile mehr als 2100 Welten außerhalb des Sonnensystems gefunden. Nun hoffen sie darauf, diese auch zu verstehen.

VON ALEXANDRA WITZE
DESIGN: JASIEK KRZYSZTOFIAK / NATURE

Vor 20 Jahren verkündeten Astronomen die Entdeckung von 51 Pegasi b, dem ersten bestätigten Exoplaneten bei einem sonnenähnlichen Stern. Der heiße Gasriese umrundet seinen Mutterstern kaum außerhalb seiner Glut und hat den Astronomen die Augen für die Vielfalt an fremden Welten geöffnet, die in unserer Galaxis existieren.

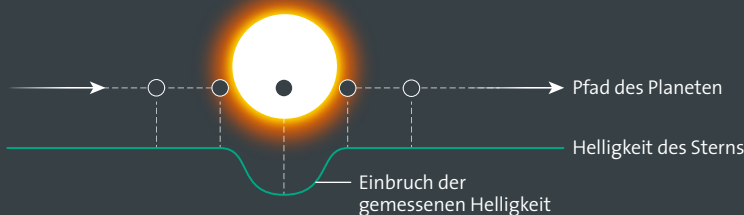
Derzeit zählen wir 2111 bekannte extrasolare Planeten, zudem gibt es 4700 weitere Kandidaten, die noch nicht bestätigt sind. Am 29. November 2015 trafen sich Astronomen auf Hawaii, um über diese extremen Sonnensysteme zu diskutieren und die Forschung für die nächsten 20 Jahre auf diesem Gebiet zu planen.



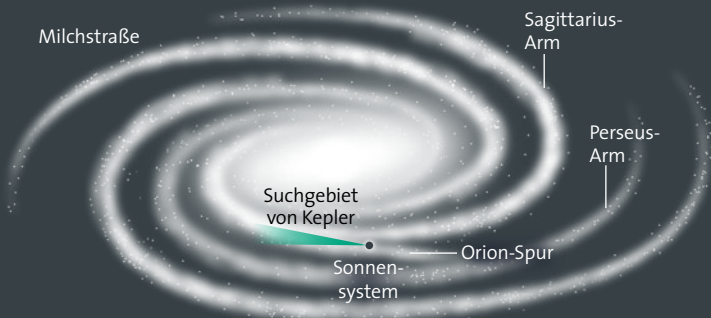
Weltraumteleskop Kepler

Bisherige Suche:

Die meisten extrasolaren Planeten hat bisher das Weltraumteleskop Kepler der NASA entdeckt. Vier Jahre lang suchte es einen kleinen Himmelsausschnitt nach Sternen ab, die vorübergehend leuchtschwächer werden, während ein Planet an ihnen vorüberzieht. Die Hauptmission von Kepler endete 2013, seitdem jagt das Teleskop aber weiter mit der Kampagne K2 nach fernen Welten.



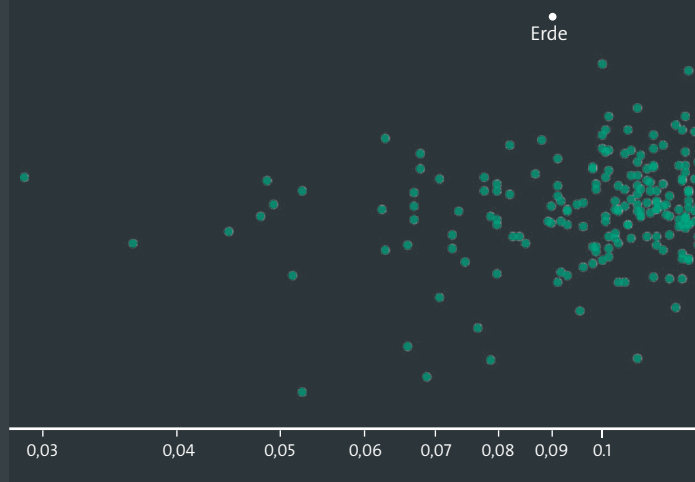
Das Gesichtsfeld des Keplerobservatoriums deckt nur etwa 1/4000 des Nachthimmels ab.



DIE WELTEN, DIE WIR HEUTE KENNEN

Viele der bisher entdeckten Exoplaneten unterscheiden sich maßgeblich von jenen in unserem Sonnensystem. Sie reichen von aufgeblasenen heißen Gasriesen, die sehr eng um ihren Stern kreisen, bis zu eisigen Welten auf weiten Orbits. Eine Hand voll von ihnen befindet sich in der lebensfreundlichen Zone ihres Zentralgestirns; dort herrschen solche Bedingungen, unter denen Leben, wie wir es kennen, möglich ist.

ERDÄHNLICHE PLANETEN UND SUPERERDEN



DIE NÄCHSTE GRENZE

Nun wollen die Astronomen herausfinden, was sie mit all diesen Entdeckungen anfangen. Das Forschungsziel für die nächsten zwei Dekaden ist es, Daten über die Eigenschaften dieser Planeten zu sammeln, angefangen bei den Wolken in der Atmosphäre bis hin zu den Bedingungen auf ihrer Oberfläche.

Was kommt als Nächstes?

GEMINI PLANET IMAGER

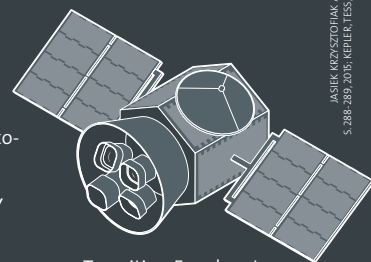
Mit diesem Projekt lässt sich die von heißen Gasplaneten abgestrahlte Energie direkt ermitteln und daraus Temperatur, Masse und atmosphärische Zusammensetzung des Exoplaneten ableiten.

NEXT-GENERATION TRANSIT SURVEY

In dieser Kampagne wird aktuell die südliche Hemisphäre nach Exoplaneten abgesucht.

TRANSITING EXOPLANET SURVEY SATELLITE (TESS)

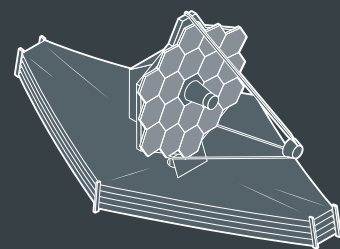
Das Teleskop soll 2017 ins All geschickt werden und nach Gesteinsplaneten bei nahen hellen Sternen suchen. Mit bodengebundenen Observatorien wollen Astronomen diese dann genauer beobachten.



Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)

JAMES WEBB SPACE TELESCOPE (JWST)

Ab voraussichtlich 2018 im Orbit wird das JWST in der Lage sein, die Zusammensetzung von exoplanetaren Atmosphären im Infraroten zu analysieren.

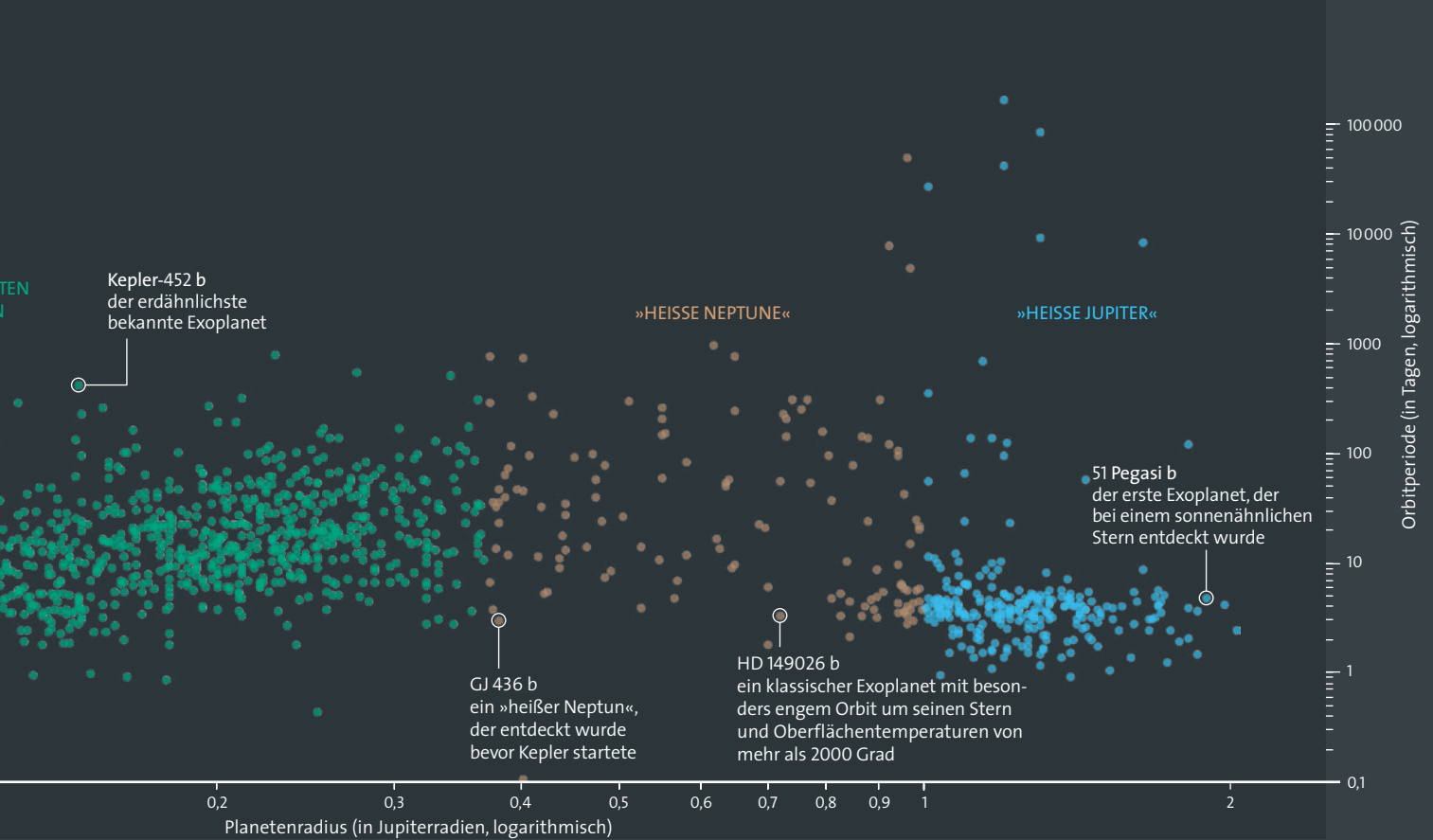


James Webb Space Telescope (JWST)

PLATO

Ab 2024 soll dieses Weltraumteleskop erdähnliche Welten in der lebensfreundlichen Zone bei bis zu einer Million Sterne aufspüren.

JASIEK KRZYSZTOFIAK / NATURE; WITZE, A. EXOPLANETS, THE NEXT 20 YEARS, IN NATURE 537, S. 288-289, 2015; KEPLER, TESS, JWST NACH NASA-DIAGRAMM EXOPLANETEN, NACH EXOPLANETU

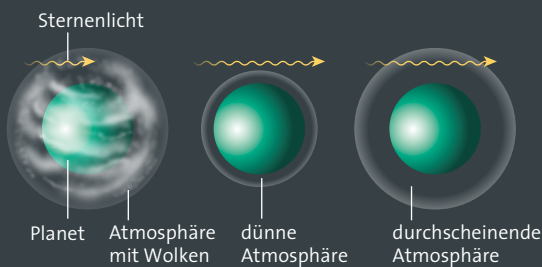


Wie viele sind es?

Unzählige Exoplaneten bleiben noch unentdeckt, aber Astronomen gelingt es immer besser, den Anteil an erdähnlichen Welten abzuschätzen, auf denen auch flüssiges Wasser existieren könnte. Die meisten Sterne in der Milchstraße sind so genannte M-Zwerg, die kleiner und kühler sind als die Sonne. Nach aktuellen Schätzungen besitzt jeder zweite dieser Zwergsterne einen erdähnlichen Planeten. Ein gewisser Anteil davon wiederum könnte lebensfreundlich sein.

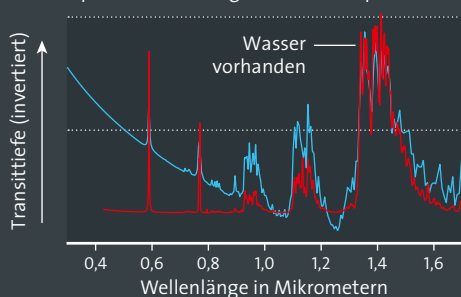
Wie sehen sie aus?

Neuerdings lassen sich auch exoplanetare Atmosphären anhand von Transitspektren studieren, die entstehen, wenn ein Planet vor seinem Stern vorbeizieht.



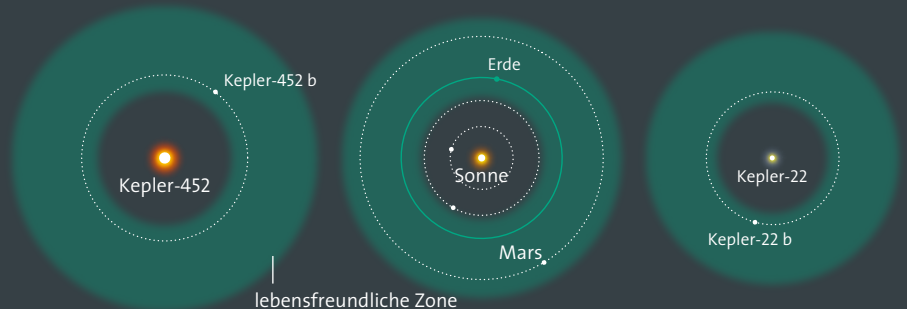
Chemische Analysen des während eines Transits absorbierten Sternenlichts geben Aufschluss über die Bestandteile in den Gashüllen ferner Exoplaneten.

- Modellspektren mit mehr Wasserdampf
- Modellspektren mit weniger Wasserdampf



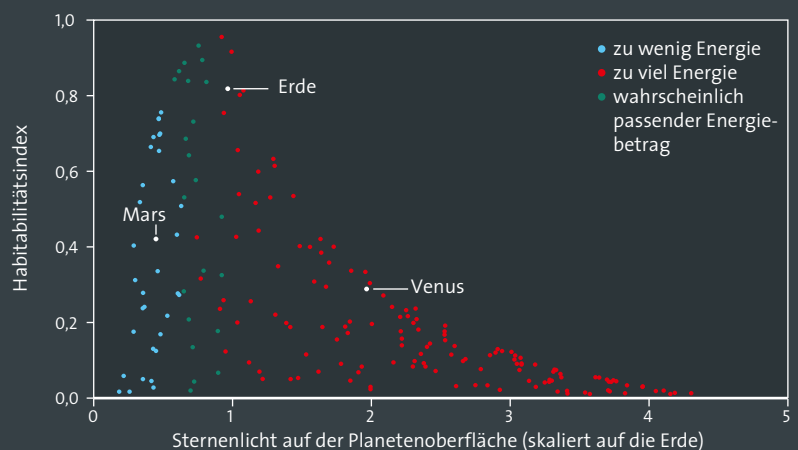
Sind sie bewohnbar?

Die interessantesten Exoplaneten sind diejenigen, die sich in der habitablen Zone ihres Sterns befinden. Dort kann auf ihrer Oberfläche flüssiges Wasser existieren. Position und Ausdehnung dieser Region variieren mit der Helligkeit des Zentralgestirns. Je leuchtschwächer dieses ist, umso näher an ihm ist die habitable Zone.



Gibt es dort Leben?

Vielleicht. Die Frage ist, welche der tausenden Planetenkandidaten wir genauer verfolgen wollen. Forscher haben kürzlich einen so genannten Habitabilitätsindex festgelegt, der diejenigen Planeten herauspickt, auf denen die Existenz von flüssigem Wasser besonders wahrscheinlich ist. In Kombination mit anderen Parametern wie der Strahlungsleistung des Sterns auf dem Planeten lässt sich herausfinden, bei welchen Objekten es sinnvoll ist, als Erstes nach Leben zu suchen.



Himmlische Sphären

Drückt ein Luftstrom gegen einen aufgespannten Flüssigkeitsfilm und wölbt ihn genügend stark ein, schnüren sich kugelförmige Teile ab – Seifenblasen!

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Seifenblasen faszinieren und sind schon bei Kindern beliebt. Denn es ist nicht schwer, die Gebilde herzustellen – einfache Exemplare glücken jedem bereits mit alltäglichen Hilfsmitteln. Offenbar scheint die Prozedur sogar so unkompliziert, dass Wissenschaftler die Details der Entstehung oft als selbstverständlich ansehen und dem Vorgang in der Fachliteratur bislang erstaunlich wenig Aufmerksamkeit geschenkt haben.

Die irisierenden Kugeln gelingen derart mühelos, weil die Natur uns die Arbeit weitgehend abnimmt. Der Mensch muss nur noch den Anstoß geben.

Seifenblasen beginnen mit einem dünnen Laugenfilm, einer so genannten Seifenlamelle. Sie entsteht, wenn man zum Beispiel einen benetzbaren Ring aus einer wässrigen Lösung herauszieht. Dabei wirken verschiedene Kräfte. Die Flüssigkeit bleibt zunächst durch Adhäsion hängen und zieht sich

dann beim Anheben als eine dünne Lage quer durch das Ringinnere. Dabei muss das Wasser zwei Grenzflächen zur Luft ausbilden. Hierfür ist Energie nötig, die beim Hochziehen mechanisch zugeführt wird.

Die Seifenlamelle steht ständig unter einer Spannung mit der Tendenz, die Oberfläche so zu verkleinern, dass sie möglichst viel Energie an die Umgebung abgibt. Reines Wasser hat im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten eine sehr große Oberflächenspannung. Daher sind Lamellen daraus äußerst instabil und zerreißen sofort wieder, sofern sie sich denn überhaupt vollständig ausbilden. Man kann sie aber langlebiger machen, indem man spezielle Stoffe zufügt, vor allem Seife. Sie enthält Tenside, deren einzelne Moleküle einen Wasser liebenden hydrophilen Kopf und einen Wasser abstoßenden hydrophoben Schwanz besitzen. Um beiden widersprüchlichen Vorlieben gerecht zu werden, halten sich die Tensidmoleküle bevorzugt an der Oberfläche auf, wobei sie wie gründelnde Enten den hinteren Teil in die Luft und das Köpfchen unter Wasser halten (siehe Illustration links).

Dieses Verhalten setzt die Oberflächenspannung herab. Sie ist in reinem Wasser so hoch, weil die Anziehungskraft zwischen den einzelnen Molekülen besonders stark ist und somit verhältnismäßig viel Energie nötig ist, um die Oberfläche zu vergrößern. Die Köpfe der Tensidmoleküle binden sich hingegen schwächer an die Wassermoleküle in der Umgebung, was die Kräfte insgesamt senkt.

Die Seifenlamelle, die aus so einer Lösung hervorgeht, widersetzt sich der

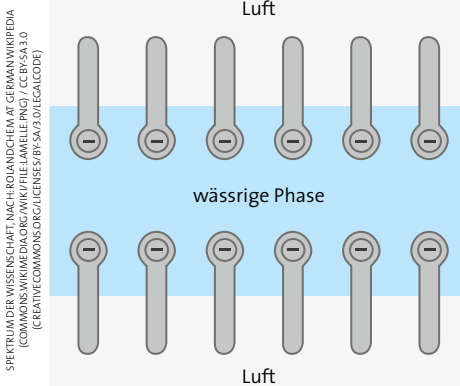
»Und sie reicht ihm willig Krug und Ähre,
und er bläst den Schaum,
und sieh da, die wunderschöne Sphäre
wölbt sich in den Raum,
wölbt sich auf, als obs ein Weltball wäre,
nicht nur Schaum und Traum.«

Christian Morgenstern (1871–1914)

Verformung durch äußere Einwirkungen, um ihre Oberflächenenergie klein zu halten. Diese Widerstandskraft kann man sogar spüren: Mit Lamelle fällt es schwerer, gegen den Ring zu pusten. Beim Blasen staut sich vor dem umströmten Ring ein so genannter dynamischer Druck auf. Die gespannte Oberfläche sorgt für einen Gegendruck, den »Krümmungsdruck« (auch als Laplace-Druck bezeichnet). Er ist umgekehrt proportional zum Radius der entstehenden Wölbung. Es ist also einfacher, eine große als eine kleine Delle in die Lamelle zu pusten. Einen ähnlichen Effekt gibt es beim Aufblasen eines Luftballons, wo man sich am Anfang besonders anstrengen muss. Sobald der Radius dann zunimmt, geht alles sehr viel leichter.

Materialnachschub für eine stabile Haut

Beim Ballon wird die Gummihaut immer dünner, weil dieselbe Materialmenge eine wachsende Fläche begrenzen muss. Das wäre auch bei der Seifenlamelle der Fall und würde das Gebilde rasch platzen lassen, stünde sie nicht mit einem Vorrat an Seifenlauge in Kontakt. Die kommerziell erhältlichen Ringe beispielsweise haben eine Riffelung, die zusammen mit der guten Benetzbarkeit des Plastiks viel Lösung festhält. Dieses Reservoir wird angezapft, sobald die Lamelle gestreckt wird. Denn dann sinkt die Konzentration der Tenside an der Grenze zur Luft, wodurch sich die Oberflächenspannung und damit die Energie erhöhen. Um die Energie des Systems zu senken, strömt Flüssigkeit aus benachbarten dickeren Gebieten nach, die ihrerseits mit dem Reservoir in Kontakt stehen. Dieser Sog



Die Tensidmoleküle in Seife besitzen einen hydrophilen Kopf und einen hydrophoben Schwanz. Sie setzen in einem dünnen Seifenfilm die Oberflächenspannung so weit herab, dass sich Blasen bilden können.



Beim Pusten von Seifenblasen formt sich meist zuerst ein längerer Schlauch, der erst später in einzelne Kugeln zerfällt.

ISTOCK / JAMES BREY

steigert die Tensidkonzentration, und die Oberflächenspannung nimmt ab. Auf diese Weise verschwinden dünne Stellen wieder sehr schnell.

Eine dicke Haut ist entscheidend für die Lebensdauer der Blase. Infolge der Schwerkraft fließt die Flüssigkeit zur Unterseite; außerdem verdunstet das Wasser, bis zumeist an der Oberseite eine kritische Wandstärke unterschritten wird – und das Kunstwerk platzt. Viele Enthusiasten experimentieren bei ihren Seifenmischungen daher mit zusätzlichen Stoffen wie Stärke, Glycerin und Glukose, um die Wasserschicht zwischen den Tensidmolekülen möglichst dick und haltbar zu machen.

Die Lamelle deltet sich beim Pusten umso stärker ein, je größer die Geschwindigkeit der Luft und damit der aufgebaute dynamische Druck sind. Solange die Geschwindigkeit unterhalb eines bestimmten kritischen Werts bleibt, bildet sich die Ausbeulung stets wieder zurück, wenn der Strom wieder abnimmt. Erst beim Überschreiten dieser Grenze gibt es für die Seifenblase kein Zurück mehr.

Weitere Luftzufuhr mit mindestens der kritischen Geschwindigkeit treibt die Kugelkalotte als vordere Abrundung eines wachsenden Seifenblasen-



H. DACHM SCHLICHTING

In Riesblasen sind die Kräfte zu gering, um gegen die wechselnden Luftströmungen eine stabile Kugelform zu erzeugen – gerade das macht die Gebilde besonders reizvoll.

schlauchs voran. Er wird ab einer bestimmten Länge instabil, das heißt, er schnürt sich ausgelöst durch zufällige Störungen ein und zerfällt in einzelne Blasen (siehe Foto ganz oben). Bei äqui-

distanten Abtrennungen sind diese gleich groß, aber in der Regel entstehen sehr verschiedene Körper. Sie alle streben augenblicklich die Kugelgestalt an, um die Oberflächenenergie zu mini-



Manche Künstler durchstechen die Lamelle des Rings, an der eine mit Rauch gefüllte Blase hängt, so dass deren Inhalt langsam wieder herausströmt.

mieren. Ein ähnlicher Mechanismus lässt einen aus einem Wasserhahn rinneenden, sehr dünnen Wasserstrahl zu einzelnen Tropfen werden.

Der kleinste Radius des beim Pusten entstehenden Kugelsegments wird immer durch den Luftstrom vorgegeben, hier also vom Radius der Öffnung des zugespitzten Mundes. Anschaulich muss die Wölbung in einer elastischen Haut so groß sein wie das Werkzeug, das dagegen drückt. Für besonders gewaltige Seifenblasen braucht man breite Vorrichtungen, deren ganze Fläche von der strömenden Luft durchsetzt wird. Das kann man etwa bei Straßenkünstlern sehen, die durchtränkte Fadenschlingen durch die Luft ziehen (siehe S. 45, Foto unten).

Es gibt allerdings einen Trick, Exemplare mit einem größeren Radius zu erzeugen, ohne auf unhandliche Instrumente zurückzugreifen. Dazu muss man den dynamischen Druck auf die Lamelle feinfühlig auf die Deformation abstimmen. Entscheidend ist dabei – so paradox es klingt –, nach der anfänglichen Schlauchbildung die Strömungsgeschwindigkeit durch den Ring vorsichtig etwas zurückzunehmen. Auf diese Weise geht das durch die Kugelka-

lotte begrenzte Schlauchende in eine kugelförmige Blase mit wachsendem Radius über, abermals um die Oberfläche zu minimieren. Es ist wieder eine Frage des Kräftegleichgewichts: Wenn man durch sanftes Pusten einen abnehmenden Druck vorgibt, können die entstehenden Kugeln größer werden, weil dann schon ein geringerer Krümmungsdruck ausreicht, um die Blase zusammenzuhalten.

Behutsame Abnabelung

Eine so geschickt begonnene Seifenblase wächst immer weiter, solange man pustet. Ihr Volumen begrenzen lediglich der Laugennachschub in den Rillen des Rings und die Luft, die unsere Lunge auf einmal ausatmen kann.

Schließlich schnürt sich das Gebilde von selbst oder durch einen kleinen Ruck am Blasring ab. Dabei entsteht zunächst eine Art Nabelschnur, deren Wände sehr schnell unter dem Einfluss der Minimierung der Oberfläche kollabieren und verschmelzen.

Beim Erzeugen der Blase muss der dynamische Druck des Luftstroms immer zumindest ein wenig größer sein als der äußere Luftdruck, um zusätzlich den Krümmungsdruck der Lamel-

lenoberfläche zu kompensieren. Dieser Unterschied bleibt anschließend im Inneren konserviert.

Manche Künstler nutzen das für einen eindrucksvollen Trick: Sie erzeugen und füllen die Blase mit Rauch, legen den frisch getränkten Ring darauf, so dass beide Lamellen verschmelzen, und durchstechen ihn. Es entsteht ein Loch, das außen vom Ring begrenzt wird. Dadurch platzt die Blase nicht, sondern der Entstehungsprozess kehrt sich gewissermaßen um. Der Überdruck geht allmählich verloren, und die infolge des Krümmungsdrucks schrumpfende Blase pustet den Rauch aus dem Loch heraus (siehe Bild links).

In Superzeitlupenaufnahmen kann man erkennen, dass sich bei der Blasenbildung meist ein längerer Schlauch formt, der sich erst dann in einzelne Sphären auflöst. Dieser Prozess ist bei Riesenseifenblasen besonders ausgeprägt. Auf Grund der sehr großen Radien ist hier der Krümmungsdruck äußerst gering und reicht selbst gegen nur kleine äußere Luftströmungen nicht mehr aus, um eine stabile Kugel form auszubilden. Die Körper werden zu wabernden Ungetümen, die beeindruckend dehnbar sind und ihre Form schnell verändern können. Das deutet darauf hin, dass die Flüssigkeit zwischen den Lamellenoberflächen sehr schnell strömen kann und Material in die dünner werdenden Flüssigkeitsschichten befördert, bevor die Blase platzt. Es wirkt, als hätte die Natur höchstselbst Freude daran, die filigranen Gestalten allen widrigen Einflüssen zum Trotz möglichst lange zu erhalten. ~

DER AUTOR



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

Dieser Artikel und Links im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1408647

Psycho&Logisch

Wie wir denken, fühlen, handeln:
Psychologen und Hirnforscher erklären in **Gehirn&Geist**,
was in unseren Köpfen vorgeht.
Lernen Sie sich von ganz neuen Seiten kennen!



Gehirn&Geist

Wissen ist Kopfsache.

Testen Sie jetzt **Gehirn&Geist** im Miniabo!

www.gehirn-und-geist.de/miniabo

Der Siegeszug des *Homo sapiens*

Zwei Eigenschaften ermöglichten es dem modernen Menschen, die ganze Erde zu besiedeln und jede Konkurrenz auszustechen: seine ausgeprägte Begabung zur Kooperation und seine technologischen Fähigkeiten.

Von Curtis W. Marean

Keine 70 000 Jahre ist es nach derzeitiger Kenntnis her, seit *Homo sapiens* von Afrika aus seinen Siegeszug über die Welt begann. Vor ihm hatten sich in Europa und Asien andere Menschenarten etabliert. Jedoch erst unsere Spezies drang schließlich auf alle bewohnbaren Kontinente und diverse Inselketten vor. Diese Ausbreitung hatte außergewöhnliche Folgen: Wo immer der moderne Mensch auftrat, gab es massive ökologische Verwerfungen. Archaische Menschen, auf die er traf, starben aus. Ebenso verschwanden zahlreiche Großtierarten. In der Erdgeschichte war dies die folgenschwerste Expansion einer einzelnen Art.

Paläoanthropologen suchen schon lange nach einer Erklärung für die Überlegenheit und zügige Verbreitung des *Homo sapiens*. Manche vermuten, das große, besonders komplexe Gehirn hätte dazu geführt, dass sich unsere Vorfahren gern neuen Herausforderungen stellten. Andere Experten glauben, den Ausschlag habe ihre überlegene Techno-

logie gegeben: Dadurch konnten sie effektiver jagen als ihre Zeitgenossen und wurden auch mit feindlichen Gruppen leichter fertig. Wieder andere Forscher sehen die Hauptursache in einem Klimawandel, der damals die Populationen der Neandertaler und sonstigen archaischen Menschen außerhalb Afrikas geschwächt habe.

Doch keiner dieser Aspekte allein vermag den Erfolg des *Homo sapiens* wirklich zu erklären. Unter anderem könnte das daran liegen, dass die jeweils herangezogenen Erkenntnisse großteils begrenzte geografische Regionen betreffen – oft lediglich Westeuropa. Obwohl sich der moderne Mensch in mehreren Phasen verbreitete, war dies dennoch ein übergreifender, einheitlicher Vorgang. Dem sollte eine plausible Theorie Rechnung tragen.

Daher schlage ich ein anderes Szenario vor. Dieses stützt sich zum einen auf archäologische Befunde von der Südküste Afrikas, wo ich seit 1999 am Pinnacle Point Ausgrabungen durchführe (siehe SdW 12/2010, S. 58). Zum anderen gingen neuere Vorstellungen der Evolutionsbiologie, insbesondere der Soziobiologie und der Verhaltensökologie, sowie der Sozialwissenschaften ein. Meiner Ansicht nach machten sich Vertreter unserer Spezies in neue Weltgegenden auf, als bei ihnen ein spezielles, genetisch basiertes soziales Verhalten entstanden war: die Bereitschaft, auch mit Individuen zu kooperieren, die nicht mit einem verwandt sind. Im Verein mit bereits hoch entwickelten geistigen Fähigkeiten ermöglichte das dem *Homo sapiens*, sich leicht an neue Umwelten anzupassen. Dazu verhalfen ihm nicht zuletzt bahnbrechende Innovationen wie vor allem fortschrittliche Projektilwaffen in Form von Speerschleudern oder womöglich sogar schon Pfeil und Bogen. Seinerzeit waren das revolutionäre Technologien.

Wie sehr die Besiedlung der Erde durch den *H. sapiens* damals aus dem Rahmen fiel, wird erst so richtig deutlich, wenn

AUF EINEN BLICK

ÜBERLEGEN DURCH KOOPERATION UND WAFFEN

1 Der *Homo sapiens* hat als einzige Menschenart die gesamte Welt erobert. Die Voraussetzungen dafür erwarb er vermutlich während einer **schwierigen Klimaphase in Afrika**.

2 Damals lernte er, in Küstenhabitaten von Meeresfrüchten zu leben. Diese Ressource auszubeuten, förderte **hohe Sozialkompetenz** sowie **aggressive Territorialität**. Unter diesen Bedingungen entstand zugleich eine neuartige Technologie für effektivere Waffen.

3 Beides zusammen machte den modernen Menschen so überlegen, dass er in für ihn völlig neue Umwelten vordringen konnte, wo er nach Meinung des Autors **archaische Menschen** ausrottete und ganze Großtierbestände vernichtete.

Mit den damals fortschrittlichsten Waffen – und nicht zuletzt dank seines besonderen Gemeinschaftssinns – eroberte der moderne Mensch fast alle Weltregionen und übertrumpfte archaische Menschenarten.



man sich sein Verhalten in den Zeiten davor vergegenwärtigt. Denn anatomisch moderne Menschen, die uns äußerlich gleichen, hatten sich in Afrika bereits vor nicht ganz 200 000 Jahren herausgebildet – und waren zunächst dort geblieben. Zwar drang eine Gruppe rund 100 000 Jahre später für kurze Zeit in den Nahen Osten vor, weiter aber auch nicht. Erst wieder vor knapp 70 000 Jahren machte eine kleine Gründerpopulation einen neuen Vorstoß – und besiedelte in relativ kurzer Zeit weite Teile Eurasiens (siehe »Spuren der Vernichtung«, S. 52/53). Diese Menschen müssen Neandertalern und auch Denisovanern begegnet sein – jener erst kürzlich entdeckten, mit den Neandertalern nah verwandten Menschenart, von der im Altaigebirge Fossilien gefunden wurden (siehe SdW 12/2014, S. 68). Beide archaischen Arten starben bald darauf aus, hinterließen in unserem Genom allerdings Spuren.

Als erste menschliche Spezies überhaupt kam der *Homo sapiens* vor mindestens 45 000 Jahren über Südostasien bis nach Australien, das er rasch eroberte. Das Meer können diese Menschen nur mit seetüchtigen Booten überquert haben, vermutlich getrieben von dem auch uns eigenen Drang, neue Welten zu erkunden. Tasmanien erreichten jene Pioniere vor etwa 40 000 Jahren über eine Landbrücke. Viele der großen australischen Beuteltiere verschwanden damals binnen kurzer Zeit.

Eine andere Population fand vom Südwesten aus den Weg nach Nordosten bis nach Sibirien. Die Eroberung Amerikas verwehrt zunächst Eisbarrieren. Noch ist strittig, wie früh den ersten Gruppen die Passage in die Neue Welt gelang, doch sicherlich hatten sie Nordamerika vor rund 14 000 Jahren erreicht. Nur wenige Jahrtausende später war auch Südamerika bis zur Südspitze besiedelt – um den Preis des massenhaften Aussterbens von eiszeitlichen Großtieren wie dem Amerikanischen Mastodon und den Riesenfaultieren, denn menschliche Jäger war die amerikanische Tierwelt nicht gewohnt.

Madagaskar und viele pazifische Inseln blieben noch 10 000 Jahre länger von einer Invasion verschont – bis Seefahrer sie schließlich doch entdeckten und sich dort ansiedelten. Und wieder musste die Tier- und Pflanzenwelt den Preis

dafür zahlen, dass die neuen Herrscher das Land gemäß ihren Bedürfnissen umgestalteten. Einzig die Eroberung der Antarktis findet erst heute statt.

Eine Theorie, die diesem Geschehen Rechnung trägt, sollte erklären, wieso der Aufbruch aus Afrika gerade damals einsetzte und nicht bereits viel früher. Sie muss auch begründen, weshalb sich der moderne Mensch so rasch praktisch überall hin verbreitete. Wodurch konnte er sich an verschiedenste Umwelten anpassen und in Regionen vordringen, die noch kein menschliches Wesen betreten hatte? Was zeichnete ihn

Die Kehrseite der herausragenden Kooperationsfähigkeit: Unerbittlichkeit gegen Konkurrenten

aus, dass ihm sogar Meere nicht Einhalt geboten? Und warum verschwanden bald alle anderen Menschenformen?

Wesentlich für seine überragende Dominanz war meines Erachtens die schon eingangs erwähnte herausragende Kooperationsfähigkeit mitsamt ihrer Kehrseite, gegen Konkurrenten unerbittlich vorzugehen. Solch ein unbedingtes Voranstreben besaßen die archaischen Menschenarten nach meiner Einschätzung nicht. Ich halte diese Eigenschaft für ein letztlich entscheidendes Attribut, das den *Homo sapiens* auszeichnet und seine Vorrangstellung begründete.

Unvorstellbar:

Schimpansen als disziplinierte Flugpassagiere

Wir heutigen Menschen leisten hinsichtlich Kooperation Außergewöhnliches. Gemeinsam mit nicht näher verwandten Personen, ja selbst mit völlig Fremden gelingen uns hochkomplexe koordinierte Handlungen. Die Anthropologin Sarah Blaffer Hrdy von der University of California in Davis entwarf dazu folgendes Bild: 100 Schimpansen warten ruhig in einer Schlange, bevor sie geordnet in ein Flugzeug einsteigen, sitzen dann stundenlang still und gehen schließlich ebenso diszipliniert wieder hinaus. Für die Menschenaffen wäre das völlig undenkbar, denn sie würden sich die ganze Zeit bekämpfen.

Dass wir im Stande sind, fremden Menschen in Not selbst unter eigener Gefährdung tatkräftig beizustehen, nenne ich Hyperprosozialität. Leider bedeutet das auch: Wir verbünden uns zum erbarmungslosen Krieg gegen andere Gruppen. Wie viele meiner Kollegen vermute ich, dass uns eine starke Neigung zum koordinierten gemeinsamen Handeln angeboren ist. Dabei ist das beim Menschen etwas grundsätzlich anderes, als wenn Tiere leichte Ansätze zu kooperativem Verhalten erkennen lassen.

Aber wie konnten sich solche Verhaltensmuster in unserer Evolution überhaupt herausbilden? Wertvolle Hinweise auf den möglichen Ablauf liefern mathematische Modelle zur sozialen Evolution, die ebenfalls von einer genetischen Veranlagung ausgehen. Der Ökonom Samuel Bowles vom Santa Fe Institute in New Mexico zeigte, dass sich Gene für hyperprosoziales Verhalten im Zusammenhang mit Gruppenkonflikten besonders gut ausbreiten. Und zwar hängt bei

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



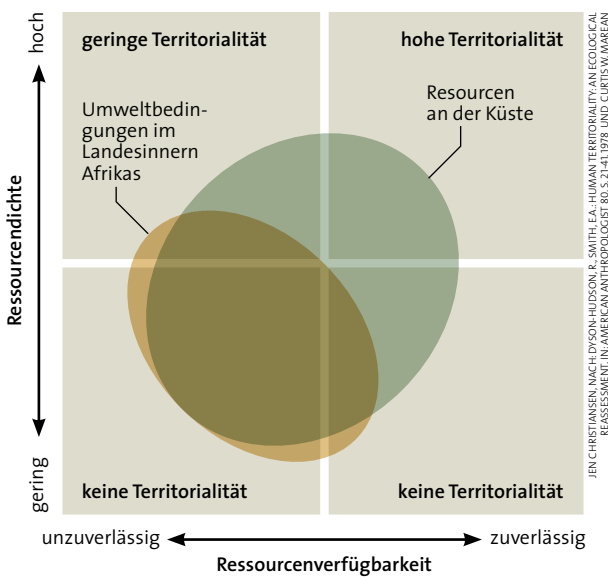
www.spektrum.de/t/evolution



FOTOLIA / HL PHOTO

Wann lohnt Gebietsverteidigung?

Eine klassische soziobiologische Theorie besagt: Die natürliche Selektion begünstigt die Verteidigung von Nahrungsressourcen und somit Territorialität, wenn der exklusive Zugang mehr einbringt, als der Einsatz dafür kostet. Das trifft für kleine Menschengruppen bei konzentrierten, vorhersagbar verfügbaren Ressourcen zu. Bestimmte Küstenabschnitte Afrikas, an denen Muschelbänke wachsen, erfüllen diese Voraussetzungen. Unter Gruppen des frühen modernen Menschen entstand dort wahrscheinlich das für uns typische Territorialverhalten.



dieser Betrachtungsweise die Effektivität der Kooperation vom Anteil der Gruppenmitglieder ab, die angeborenermaßen prosozial eingestellt sind: Weil bei Konflikten mit fremden Gruppen kooperatives Verhalten in der Gemeinschaft Vorteile bringt, wird ihre Population in der nächsten Generation verhältnismäßig mehr Individuen mit Genen für das entsprechende Verhalten aufweisen. Wie Peter Richerson von der University of California in Davis und Robert Boyd von der Arizona State University zeigten, setzt sich Prosozialität am besten in kleinen Populationen durch, nämlich dann, wenn sie ihren Anfang in einer Teilpopulation mit starken Gruppenkonflikten nimmt. Tatsächlich stammen alle heutigen Menschen von einer vergleichsweise kleinen afrikanischen *Homo sapiens*-Population ab.

Moderne Jäger und Sammler bilden gewöhnlich Verbände von ungefähr zwei Dutzend Individuen. Heiratspartner wählt man bei anderen Gruppen, die aber zum selben »Stamm« zählen. Den Stammeszusammenhalt fördern die gemeinsame Sprache, gleiche Traditionen sowie Geschenke. Verschiedene Stämme bekriegen sich mitunter trotz der damit verbundenen oft erheblichen Gefahren für Leib und Leben. Wieso lassen sich Menschen auf solche Gemetzel ein?

Zu den wichtigsten Vorreitern von soziobiologischen und verhaltensökologischen Evolutionsmodellen zählt Jerram L. Brown, jetzt an der University of Albany (State University of New York). In den 1960er Jahren hatte er für die unterschiedliche territoriale Aggressivität von Vögeln die klassische Theorie einer ökonomisch bedingten Verteidigungswürdigkeit (economic defendability) von Ressourcen aufgestellt. Brown ging davon aus, dass sich Individuen naturgemäß für Ziele einsetzen, die ihnen helfen, Überleben und Fortpflanzung zu maximieren. Im Zuge der natürlichen Selektion lohnt sich demnach Kämpfen, sofern es solchen Zielen dient. Weil Nahrung zu den wichtigsten Überlebensfaktoren gehört, sollte die Veranlagung zum Kampf um Futter, falls das unter gegebenen Umständen sinnvoll ist, folglich einer positiven Selektion unterliegen – also bei Vögeln etwa die Neigung, ein Revier zu etablieren. Manchmal würden sich Auseinandersetzungen um Futter jedoch nicht auszahlen, nämlich dann, wenn es entweder unsinnig oder zu kostspielig wäre, Nahrungsquellen für sich allein zu beanspruchen.

Eine Nahrungsressource, die Aggressivität förderte

Diese Theorie übertrugen Rada Dyson-Hudson und Eric Alden Smith, beide damals an der Cornell University in Ithaca (New York), 1978 in einer ebenfalls klassischen Arbeit auf kleine menschliche Gemeinschaften. Heraus kam dabei: Ressourcen zu verteidigen ist dann sinnvoll, wenn diese erstens dicht konzentriert sind und zweitens zuverlässig vorhersagbar zur Verfügung stehen. Meines Erachtens muss so ein Gut außerdem lebensnotwendig sein, weil sich andernfalls wohl kaum jemand entschieden dafür einsetzen würde. Der Zusammenhang gilt noch heute. Ethnien und Staaten kämpfen um konzentrierte, gut kalkulierbare, wertvolle Ressourcen wie Erdöl, Wasser und fruchtbares Ackerland.

Folgt man diesen Überlegungen, so traf der *Homo sapiens* zunächst längst nicht überall in Afrika Umweltbedingungen an, die ernstliche Konflikte zwischen Gruppen geschürt und damit eine ausgeprägte interne Kooperation gefördert hätten. Vielmehr fand er seine Nahrung in den meisten Gegenden eher locker verstreut vor, zudem war sie oft knapp und vielfach nur sporadisch, unregelmäßig und wenig vorhersehbar vorhanden. Auch heute verwenden die meisten daraufhin untersuchten afrikanischen Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften wenig Zeit und Energie auf eine Grenzverteidigung ihres Gebiets. Das gilt jedoch nicht für einige Küstenabschnitte, wo Muschelbänke stets reichlich hochwertige Nahrung bieten. Nach ethnografischen und archäologischen Erhebungen führten auch in anderen Weltgegenden solche Jäger und Sammler, die von derartigen Ressourcen lebten, im Vergleich zu anderen Gruppen mehr Kriege, etwa an der nordamerikanischen Pazifikküste.

Über Millionen Jahre hatten sich unsere Vorfahren vorwiegend von Landpflanzen und -tieren sowie gelegentlich von Süßwasserorganismen ernährt. Ihre Kost war nämlich eher wenig konzentriert und vieles längst nicht immer zuverlässig verfügbar. Diese Urahnen bildeten denn auch weit

verstreute Gruppen, die zur Nahrungssuche ständig umherzogen. Doch als sich ein immer komplexerer Verstand entwickelte, muss eine Population irgendwann herausgefunden haben, wie man an der Küste Meeresfrüchte erntet und verzehrt. Ganz im Süden Afrikas setzte diese Ernährungsweise nach unseren Befunden vor etwa 160 000 Jahren ein. Wohl erstmals in der Menschheitsgeschichte machten sich Vertreter unserer Spezies nun jene stets reichlich vorhandene, hochwertige Nahrungsquelle zu eigen – und setzten damit einen großen sozialen Umschwung in Gang.

Archäologischen und genetischen Befunden zufolge scheint die Population des *Homo sapiens* allerdings schon bald nach seinem Auftreten eingebrochen zu sein. Dies ging wohl auf die weltweite Klimaabkühlung zurück, die vor 195 000 Jahren einsetzte und bis vor 125 000 Jahren anhielt. Im Inneren Afrikas wurde die Ernährungslage während der kalten Abschnitte für die Menschen schwierig, aber manche Küstengebiete boten Refugien – auf den Muschelbänken fand sich genug zu essen. Nach einer neueren Studie, die Jan De Vynck von der Nelson Mandela Metropolitan University

Spuren der Vernichtung

Nachdem die Gattung *Homo* in Afrika ihren Anfang genommen hatte (lila), begann sie sich vor zwei Millionen Jahren auch nach Eurasien zu verbreiten und dort in viele Regionen vorzudringen. Schließlich entstanden der *Homo erectus*, der Neandertaler und der Denisovaner (Grüntöne).

In Afrika trat vor zirka 200 000 Jahren der anatomisch moderne *Homo sapiens* auf. Einige Vertreter fanden an der Südküste Afrikas mit deren reichen Muschelbänken passable Lebensbedingungen vor, als das Innere des Kontinents vor zirka 160 000 Jahren für Menschen unwirtlich wurde. Nach Ansicht des Autors bildete sich in der neuen Umwelt eine Veranlagung heraus, sogar mit nicht verwandten Individuen zu kooperieren, denn so ließ sich die neue Nahrungsressource am besten kontrollieren.

Die enge Zusammenarbeit machte diese Menschen besonders erfinderisch. Ein technologischer Meilenstein war erreicht, als sie Projektilwaffen herzustellen verstanden: vielleicht Speerschleudern oder sogar schon Pfeil und Bogen.

Dieser *Homo sapiens* war gerüstet, die ganze Welt zu erobern (rote Pfeile). Er konnte sogar in Gegenden vordringen, die andere Menschen noch nie betreten hatten. Besonders dort wälzte sein Erscheinen Ökosysteme um: durch Ausrottung vieler Arten der Megafauna, also der großen Tiere.



in Port Elizabeth (Südafrika) leitete, kann ein Mensch dort in nur einer Stunde Nahrung mit einem Energiegehalt von bis zu 4500 Kilokalorien gewinnen.

Diese Ressourcen erfüllten somit alle Voraussetzungen für die Etablierung von Territorialität. Ich vermute, dass die Menschengruppen damals heftig und wiederholt um den exklusiven Zugang zu besonders günstigen Muschelbänken stritten. Der fortwährende gemeinsame Kampf gegen fremde Gruppen müsste nach innen eine Selektion auf prosoziales Verhalten vorangetrieben haben – zunächst also die Be-

reitschaft, bei Auseinandersetzungen auch mit nicht verwandten Gruppenmitgliedern zu kooperieren. Vermutlich setzte sich das bald in der gesamten Population durch. Damit wäre eine der beiden von mir postulierten Voraussetzungen gegeben gewesen, die den *Homo sapiens* dafür prädestinierten, die Welt zu erobern.

Ich bin jedoch überzeugt, dass erst eine neue Technologie ihn unaufhaltbar und unbezwingbar machte. Speziell meine ich damit Projektilwaffen wie die ersten Speerschleudern. Gravierende Neuerungen vollzogen sich schrittweise über lange Zeiträume. Wie bei so vielen anderen Technologien kamen sicherlich auch in diesem Fall Erfahrung und Begreifen zusammen und führten zu immer komplexeren und wirksameren Konstruktionen.

Wahrscheinlich verwendeten die Menschen zuerst einfach spitze Stöcke als Lanzen, die sie mit der Zeit verbesserten. Darauf aufbauend entwickelten sie immer perfektere leichte Wurfspere – zunächst noch mit hölzerner, aber irgendwann mit aufgesetzter Steinspitze, was deren Durchschlagskraft beträchtlich erhöhte. Dann erfanden Menschen die Speerschleuder, wobei der Speer mit Hilfe einer Führungsschiene geworfen wurde und doppelt so weit flog wie zuvor. Und schließlich ersannen sie Pfeil und Bogen.

Speere mit Steinspitze sind keine Erfindung des modernen Menschen

Ein mit einem angespitzten Holzspieß verwundetes Tier verblutet eher langsam. Eine messerscharfe Steinspitze auf dem Speer reißt eine schwerere Wunde. Dessen Anfertigung erfordert aber bereits eine Menge Knowhow. Die Steinspitze muss ja nicht nur so geformt sein, dass sie leicht tief in das Tier eindringt. Sie muss sich auch fest am Schaft anbringen lassen, und dazu brauchte man Klebstoff oder Fasern zum Umwickeln, am besten beides.

Nach Befunden von Jayne Wilkins von der University of Cape Town und ihren Kollegen sind solche zusammengesetzten Speere wesentlich älter als gedacht. Die Forscher zeigten, dass kleine, scharfe, 500 000 Jahre alte Steinspitzen von der südafrikanischen Fundstelle Kathu Pan 1 wohl zu Speeren gehörten. Das Alter dieser Spitzen könnte besagen, dass sich bereits gemeinsame Vorfahren von *Homo sapiens* und Neandertaler darauf verstanden, Wurfspere mit Steinspitze anzufertigen. Beide Arten hinterließen vor 200 000 Jahren Hinweise auf solche Geräte. Und die hölzernen Speere von Schöningen am Harz, die vermutlich vor 300 000 Jahren entstanden, bedeuten, dass Menschen früh wussten, wie man leichte Jagdwaffen mit hervorragenden ballistischen Eigenschaften fertigt. Möglicherweise waren die Neandertaler in dieser Hinsicht ähnlich gut gerüstet wie die frühen modernen Menschen.

Doch für eine echte Fernwaffentechnologie sprechen nach Meinung der Experten erst so genannte Mikrolithe: wenige Zentimeter lange Steinspitzen und -klingen – zu klein, um sie für sich allein zu handhaben, aber vermutlich für zusammengesetzte, hocheffiziente Geschosse und Gerätschaft-



ten bestens geeignet. Die frühesten bislang bekannten Beispiele einer Mikrolithentechnologie stammen von Pinnacle Point. Unter einem als PP5-6 verzeichneten Felsdach entdeckte mein Team Mikrolithe zusammen mit anderen Spuren einer langen Anwesenheit von Menschen. Die Zeitspanne der Besiedlung datierte die Geochronologin Zenobia Jacobs von der University of Wollongong (Australien) mittels optisch stimulierter Lumineszenz auf 90 000 bis 50 000 Jahre vor heute. Die ältesten Mikrolithe von dort sind etwa 71 000 Jahre alt.

Leichte Waffen für neue Jagdmethoden

Zu ihrer Erfindung könnte wiederum ein Klimawandel geführt haben. Zuvor hatten die Bewohner jenes Orts große Klingen und Spitzen aus Quarzit hergestellt – und das zu Zeiten, als die Küstenlinie dicht bei Pinnacle Point verlief, wie unser Mitarbeiter Erich C. Fisher ermittelte. Untersuchungen von Mira Bar-Matthews vom israelischen Geologischen Dienst und Kerstin Braun, jetzt an der Arizona State University, lassen annehmen, dass das Klima und die Vegetation damals ähnlich waren wie heute: Es gab regenreiche Winter und Strauchbewuchs.

Doch vor etwa 74 000 Jahren bahnte sich im Weltklima eine Vereisungsphase an. Weil der Meeresspiegel infolgedessen stark sank, entstanden jetzt im Süden Afrikas ausgedehnte Küstenebenen. Die Sommer wurden regenreicher, und nahrhafte Grasflächen sowie lockere Akazienwälder machten sich breit. Vieles spricht dafür, dass sich hier damals ein riesiges Ökosystem wandernder Tiere etablierte, die dem Futterangebot folgten. Und zwar dürften sie im Sommer nach Osten gezogen sein, im Winter nach Westen. Es könnte gut sein, dass Menschen mit ihren neuen, besonders



SIMEN GESTMO, ARIZONA STATE UNIVERSITY

71 000 Jahre alte Mikrolithe – kleine Steinklingen von Pinnacle Point an der Küste Südafrikas (linkes Bild) – zeigen, dass Menschen schon damals Projekttilwaffen herstellten. Sie dürften die

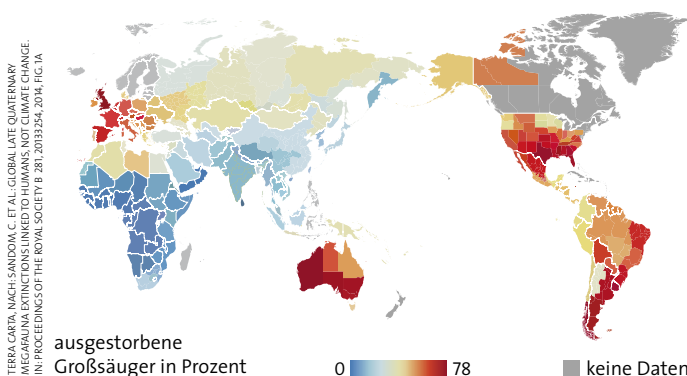
leichten Waffen Jagd auf die vorbeiziehenden Tierherden machten.

Zur Herstellung der Mikrolithe entwickelten sie ein geradezu geniales Verfahren. Als neues Rohmaterial verwendeten sie Kieselkonglomerate (Silcrete). Sie hatten herausgefunden, dass dieser brüchige Rohstoff eine glasartige Konsistenz gewinnt und sich viel präziser bearbeiten lässt, wenn man ihn vorher im Feuer erhitzt. Das dazu benötigte Brennholz lieferten die Baumbestände. So etablierte sich für die neue fortschrittliche Technologie in dieser günstigen Umwelt bald eine dauerhafte Industrie.

Für welche Sorte Distanzwaffen jene Menschen die Mikrolithe verwendeten, wissen wir noch nicht. Meine Kollegin Marlize Lombard von der University of Johannesburg glaubt, dass die feinen Steinspitzen auf Pfeile aufgesetzt wurden und somit den ersten Gebrauch von Pfeil und Bogen anzeigen. An ähnlichen, etwas jüngeren Stücken von anderen Fundstellen der Region fand die Paläoarchäologin Spuren, wie sie bei benutzten Pfeilspitzen dieser Art aufzutreten pflegen. Allerdings hat sie Mikrolithe nicht auf Gebrauchsspuren an Speerspitzen beim Einsatz von Speerschleudern geprüft. Meines Erachtens dürften Menschen überall zuerst diese einfachere Waffe verwendet haben.

Überdies vermute ich, dass bereits der frühe *Homo sapiens* die Wirkung von Gift entdeckt hatte und Waffen damit benetzte. Solche Methoden, die das Opfer schnell wehrlos machten, benutzten afrikanische Jäger und Sammler noch in historischer Zeit. Die letzten Sekunden des Tötens mit Speer oder Lanze ohne Gift sind unberechenbar und für den Jäger lebensgefährlich, wenn sich das Tier plötzlich noch einmal aufbäumt und angreift. Vielleicht war die Lebenserwartung

Kollateralschäden in der Tierwelt



TERRA CARTA, NACH SANDOIM, C. ET AL.: GLOBAL LATE QUATERNARY MEGAFUNA EXTINCTIONS LINKED TO HUMANS, NOT CLIMATE CHANGE. IN: PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B 281, 2013, 254, 2014, TIC, 1A

Die Ausbreitung des *Homo sapiens* brachte einschneidende ökologische Veränderungen mit sich. In Europa und Asien gingen die einheimischen archaischen Menschen unter. In bisher menschenleeren Gebieten rottete der moderne Mensch rasch viele Großtierarten aus. In Eurasien behaupteten sich große Tiere besser. Vermutlich deshalb, weil sie schon lange vom Menschen gejagt wurden und sich daran angepasst hatten.



Klingen an Holzschäften zu Pfeilen oder kleinen Speeren für Speerschleudern befestigt haben, ähnlich wie Forscher dies hier rekonstruierten (rechtes Bild).

der Neandertaler auch deswegen so niedrig – nicht viele wurden älter als 30 Jahre –, und vermutlich stammten ihre zahlreichen Knochenbrüche zumeist von der Großwildjagd. Auf Entfernung einsetzbare und zudem vergiftete Waffen, die Tiere bald außer Gefecht setzten, machten so ein Unterfangen wesentlich sicherer und waren deshalb ein technologischer Durchbruch.

Projekttilwaffen im Verein mit hyperprosozialem Verhalten verliehen dem *Homo sapiens* eine nie da gewesene Überlegenheit. Im Team, das wie ein einzelner Mensch vorging, war er praktisch unbezwingbar. Keine Beute, kein Feind konnte mehr vor ihm sicher sein. Ein gutes Beispiel für die Macht guter Kooperation gibt eine Waljagd mit einem kleinen Boot: Sechs Männer, die vielleicht jeder eine andere Sprache sprechen, können das Boot so auf den Kamm einer hohen Welle rudern, dass sich der Harpunier auf Zuruf des Steuermanns genau im passenden Moment am Bug aufrichten und den Koloss beim Auftauchen treffen kann. Gleichermaßen vermag ein aus 20 vernetzten Gruppen bestehender 500-köpfiger Stamm eine kleine Armee aufzustellen, die den Übergriff eines Nachbarstamms auf ihr Gebiet rächt.

Die Verbindung der beiden Eigenschaften, hochgradig zu kooperieren und effektiv mit Projekttilwaffen zu töten, könnte erklären, wieso die Populationen des modernen Menschen nicht nochmals einbrachen, als sich das Klima Afrikas in der Zeit zwischen 74 000 und 60 000 Jahren vor heute wiederum so stark abkühlte, dass weite Gebiete des Kontinents für sie erneut unbewohnbar wurden. Im Gegenteil: Damals breitete sich der *Homo sapiens* in Südafrika sogar weiter aus und unterhielt eine blühende fortschrittliche Werkzeugindustrie. Denn auf Umweltkrisen verstand er jetzt sozial flexibel und

mit angepassten Technologien zu reagieren – und wurde bald zum obersten Raubtier, zunächst auf dem Land, später auch auf dem Meer.

Dank der neuen Voraussetzungen konnten jene Menschen in jedem Lebensraum bestehen. Das dürfte ihnen auch den Weg in die übrige Welt eröffnet haben. Die archaischen Menschengruppen, welche nicht über jene Errungenschaften verfügten, hatten ihnen gegenüber keine Chance. Noch ist nicht geklärt, weshalb die Neandertaler ausstarben. Am plausibelsten finde ich die für uns beschämendste Erklärung: Die modernen Menschen nahmen die Neandertaler als Konkurrenz und Bedrohung wahr – und rotteten sie aus. So hatte die Evolution sie gemacht.

Manchmal stelle ich mir vor, wie sich die Begegnungen abgespielt haben könnten. Beliebte Gesprächsthemen der Neandertaler am Feuer waren seit jeher die gefährlichen Kämpfe gegen Höhlenbären und Mammuts gewesen. Doch eines Tages wurden die Inhalte wirklich beängstigend. Man erzählte sich von unbekanntem, ziemlich schnellen und schlaun Typen. Diese merkwürdigen Leute schleuderten Speere unmöglich weit – und trafen auch noch schrecklich genau. Sogar des Nachts konnte plötzlich eine Schar von ihnen auftauchen, die Männer und Kinder niedermetzte und Frauen raubte.

Meiner Ansicht nach könnten sich heutiger Völkermord und Fremdenhass teilweise auf gleiche Weise erklären wie damals. Wenn Ressourcen und Land knapp werden, neigen wir dazu, alle, die anders aussehen oder sprechen, als »andere« zu bezeichnen. Deren Anderssein allein rechtfertigt dann, sie zu vertreiben oder zu vernichten. Es gibt viele wissenschaftliche Arbeiten zu dem Thema. Sie decken auf, wie unsere Eigenschaften zu solcher Unterscheidung und entsprechendem Handeln geweckt werden.

Trotzdem sind wir nicht Sklaven unserer Biologie; Kultur kann selbst die stärksten Instinkte übertrumpfen. Daher hoffe ich, dass eine vertiefte Einsicht in unsere dunkle Seite diese in Schach halten kann. ~

DER AUTOR



Curtis W. Marean hat an der Arizona State University in Tempe eine Professur an der School of Human Evolution and Social Change und ist stellvertretender Direktor des Institute of Human Origins. Zudem ist er Honorarprofessor an der Nelson Mandela Metropolitan University mit Hauptsitz in Port Elizabeth (Südafrika).

QUELLEN

Brown, K.S. et al.: An Early and Enduring Advanced Technology Originating 71 000 Years Ago in South Africa. In: *Nature* 491, S. 590–593, 2012

Marean, C.W.: The Origins and Significance of Coastal Resource Use in Africa and Western Eurasia. In: *Journal of Human Evolution* 77, S. 17–40, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408642

»Möge dir die Erde leicht sein«

Tod und Erinnerung hingen für die Römer eng zusammen. Denn noch mehr als das Sterben selbst fürchteten sie, von der Nachwelt vergessen zu werden. Das verraten ihre Bestattungsbräuche.

Von Annika Domainko

»» **W**undern wir uns wirklich darüber, dass der Mensch stirbt, wenn der Tod schon Steinen und Namen nachstellt?«, grübelte der Dichter Ausonius im 4. Jahrhundert n. Chr. Ein verwitterter Grabstein hatte ihn nachdenklich gemacht. Dessen Inschrift sollte den Verstorbenen den Menschen im Gedächtnis halten, doch war sie kaum mehr zu entziffern, bloß noch eine Ansammlung von Strichen und Kerben ohne erkennbaren Zusammenhang. Ein »L« glaubte Ausonius zu lesen, vermutlich für den Vornamen Lucius. Dann war da noch ein »M«, doch ob das für Marcus, Marcus oder Metellus stand, vermochte Ausonius nicht zu sagen.

Erinnern und Vergessen, Tod und Vergänglichkeit haben die Menschen zu allen Zeiten beschäftigt. Jede Gesellschaft fand und findet ihre eigenen Wege, damit umzugehen, sei es durch Rituale, Mythen oder wissenschaftliche Erklärungen. Dabei bewegt sie sich immer innerhalb »sozialer Rahmungen«, wie Matthias Meitzler betont, der an der Universität Duisburg-Essen zur Soziologie des Sterbens forscht. Mit anderen Worten: Der Tod ist keine reine Privatangelegenheit. Wie Menschen mit dem Sterben umgehen, verrät viel darüber, wie ihre jeweilige Gesellschaft funktioniert. Deren Kodes

geben den Spielraum vor, innerhalb dessen dann auch individuelle Varianten möglich sind.

Wie diese Rahmungen in der römischen Antike aussahen und wie die Römer sich den Themen Tod und Vergänglichkeit näherten, erfahren wir aus der Literatur und Philosophie, aus Mythologie und Religion, aber auch durch Kunst, Architektur und Grabkult. Ein monumentales Denkmal etwa, das einen Platz im öffentlichen Raum besetzte, verkörperte den Anspruch, ein historisches Ereignis auch dann noch im kollektiven Bewusstsein lebendig zu halten, wenn es für den Alltag nicht mehr relevant war. Römische Dichter sahen ihr Schaffen als einen Schlüssel zu ewigem Ruhm. Und mythische Erzählungen von einem jenseitigen Leben konnten ebenso Trost und Zuversicht spenden wie philosophische Lehren, die gerade im Sterben die endgültige Befreiung von jedem Schmerz sahen.

Der Umgang mit dem Tod war hochgradig ritualisiert. Nicht nur Ort und Zeitpunkt der Bestattung folgten einem gesellschaftlichen Kode, sondern auch die Form der Beisetzung, der Grabbeigaben und der Riten, die am Grab zu vollziehen waren und mit denen man sich später an das Familienmitglied erinnerte. Umgekehrt festigten solche Rituale die sozialen Strukturen, die sie hervorgebracht hatten, wie der Althistoriker Ian Morris von der Stanford University in seinen Publikationen darlegte, die zu den Standardwerken der klassischen Altertumswissenschaften zählen.

Schon die Zwölftafelgesetze, eine Mitte des 5. Jahrhunderts v. Chr. kompilierte und auf zwölf Bronzetafeln auf dem Forum ausgestellte Gesetzessammlung, enthielten entsprechende Vorschriften. Die wohl wichtigste Regel verbot das Beisetzen oder Verbrennen von Leichen innerhalb der Stadt. Über die Gründe schweigen sich die Quellen aus, doch Hygiene und Brandschutz gelten Forschern als wahrscheinliche Erklärungen. Pragmatismus und mythisch-rituelle Vorstellungen griffen dabei aber wohl eng ineinander: Die Toten sollten jenseits des so genannten Pomeriums ihre letzte Ruhestätte finden, also hinter der sakralen Stadtgrenze, die Ro-

AUF EINEN BLICK

RITUALISIERTER ABSCHIED

1 Der Nachwelt im Gedächtnis zu bleiben, war den Römern ein zentrales Anliegen. Wer es sich leisten konnte, investierte daher in **Grabbauten** und **Inschriften**.

2 Diesem Zweck dienten auch Elemente der **Bestattungsbräuche** wie die Anrufung des Namens oder eine Schilderung der Verdienste des Verstorbenen.

3 Der als »funus« bezeichnete Zeitraum zwischen Tod und Abschluss der Beisetzung war genau geregelt und stark ritualisiert, um den **Übergang des Toten in das Jenseits** zu unterstützen – auch zum Schutz der Hinterbliebenen vor Geistern.



Erinnerung und Repräsentation – das Familiengrab der Haterier mit seinem Reliefschmuck diente beidem zugleich. Forschern liefert es zudem Aufschlüsse über den römischen Grabkult. So wurde die Verstorbene (im oberen Bildteil zu sehen) im Prachtgewand aufgebahrt, um von der Familie betrauert zu werden. Links errichteten Arbeiter den tempelartigen Grabbau, dessen Säulenhalle Ahnenporträts zieren. Das Motiv samt Baukran hatte seinen guten Grund: Die Haterier waren freigelassene Sklaven, die als Bauunternehmer ein Vermögen verdient hatten.

mulus selbst einst bei der Gründung Roms mit dem Pflug in den Boden getrieben haben soll. Dementsprechend säumten die großen Grabanlagen über- wie unterirdisch Ausfallstraßen wie die Via Appia.

In der Frühzeit waren Körperbestattungen und Einäscherungen (cremationes) gleichermaßen verbreitet. Bei Ersterer setzte man den Leichnam in der Erde bei oder in einem Sarkophag in einem Familiengrab. Aus Schriften des römischen Autors und Staatsmanns Cicero wissen wir, dass seine Landsleute diese Form der Beisetzung lange als die altertümlichere, manchmal auch primitivere Praxis ansahen. Im Lauf der Zeit setzte sich die Kremation nach und nach durch, bis sie in der späten Republik und in der frühen Kaiserzeit (etwa 2. Jahrhundert v. bis 1. Jahrhundert n. Chr.) als »Romanus mos«, als römische Sitte galt, wie der Historiker Tacitus berichtet.

Bei der Brandbestattung wurde der Leichnam auf einem Scheiterhaufen verbrannt und die Asche in einer Urne beige- setzt. Diese wiederum bewahrte man ebenfalls in Familien-

gräbern oder in den Wandnischen so genannter Kolumbarien auf; das waren von größeren Gemeinschaften genutzte Grabkammern für bis zu mehrere hundert Aschegefäße (siehe Bild unten rechts). Nur selten wurde in Rom eine Leiche direkt über der Grabgrube eingäschert.

Das Gemeinschaftsgrab – eine kostengünstige Lösung

Sterben ist teuer – das galt schon in der Antike. Bürger, Freigelassene und auch Sklaven, denen die notwendigen Mittel fehlten, konnten einem »collegium funeraticium« beitreten und regelmäßig kleinere Beträge einzahlen, um die Beerdigung und einen Platz in einem Gemeinschaftsgrab zu finanzieren. Die römischen Begräbnisvereine sind eines der frühesten Beispiele für ein kollektiv organisiertes Versicherungswesen, in dem sich Mitglieder einer Solidargemeinschaft wechselseitig absicherten. Skelettfunde belegen allerdings, dass trotz alledem viele Menschen ohne Zeremoniell in Massengräbern verscharrt wurden. Am Fuß des Esquilins,



AKG IMAGES / GLASSHOUSE IMAGES

eines der sieben Hügel Roms, fanden Archäologen ein Sammelgrab mit den unverbrannten Überresten mehrerer tausend Personen. Dort hatten offenbar die Mittellosen der Stadt ihre triste letzte Ruhe gefunden – zwischen Schutt, Tierkadavern und anderem Abfall.

Dieser Fund zeigt aber auch, dass Körperbestattungen nie völlig verschwanden. Im 2. Jahrhundert, etwa zur Zeit von Kaiser Hadrian (117–138 n. Chr.), wurden sie dann sogar wieder Usus und verdrängten nun ihrerseits die Kremation. Manche Forscher sahen die Ursache in einem expandierenden Glauben an ein Leben nach dem Tod (siehe »Trost spendende Vielfalt«, S. 61). Dieser habe bewirkt, dass man den Körper des Verstorbenen für das Jenseits intakt ließ. Andere führen die Entwicklung auf Migrationsbewegungen zurück: Einwanderer aus dem östlichen Mittelmeerraum hätten ihre Kulte mit in die Hauptstadt gebracht und damit die sepulkralen Traditionen in Rom nachhaltig verändert. Beide Hypothesen gelten inzwischen jedoch weitgehend als widerlegt, da weder archäologische noch schriftliche Quellen solche

eindimensionalen Erklärungen bestätigen. Vielmehr erscheint der Wandel nun als komplexes Phänomen, das sich vor allem sozialhistorisch erklären lasse. Denn während man zuvor schlichte Urnen in aufwändig gestalteten Grabbauten untergebracht hatte, kamen nun prächtig geschmückte Sarkophage in Mode, die in einfachen Grabbauten beigesetzt wurden statt in Nekropolen mit prunkvollen Fassaden. Es fand eine Verlagerung von »außen« nach »innen« statt, wie der Archäologe Tonio Hölscher und andere argumentieren. Beim Begräbnis habe immer weniger die öffentliche Repräsentation im Vordergrund gestanden als vielmehr die nach innen gewandte Trauerfeier im Familienkreis.

Ein Ritus für den Übergang

Der Ablauf römischer Begräbnisse lässt sich anhand von schriftlichen Überlieferungen und von wenigen bildlichen Darstellungen rekonstruieren, etwa dem Marmorrelief vom Grab der Familie der Haterier (siehe Bild S. 57). Zwar waren die Römer keine homogene Gruppe, und je weiter das Impe-

Viele Römer bestatteten ihre Verstorbenen in gemeinschaftlich genutzten Grabkammern wie den Kolumbarien in der Vigna Codini. Wandnischen boten Platz für bis zu mehrere hundert Urnen und Porträts.

Gräber zogen sich im römischen Reich entlang der großen Ausfallstraßen der Städte, da bereits die Zwölftafelgesetze (um 450 v. Chr.) eine Beisetzung innerhalb der Stadtmauern verboten. Mit der Zeit entstanden so prunkvolle Gräberstraßen wie hier in Pompeji.



rium expandierte, desto größer wurde auch die Bandbreite an lokalen Gebräuchen und kulturellen Eigenheiten. Dennoch identifizieren Forscher einige allgemeine Muster für die Handlungen beim »funus« – dem Zeitraum zwischen Tod und Beisetzung. In Anlehnung an den französischen Ethnologen Arnold van Gennep (1873–1957) sprechen sie von einem mehrstufigen »rite de passage«: einem Übergangsritus, der kritische Phasenübergänge wie etwa auch jenen zwischen Kindheit und Erwachsenenalter bahnen soll. Die Gesamtheit der Bräuche und Zeremonien rund um das funus sollten den Übertritt vom Leben zum Tod begleiten und ihn darüber hinaus in eine sinnstiftende Form bringen. Van Gennep hatte mit seinem 1909 publizierten Modell ursprünglich beschreiben wollen, wie vormoderne Gesellschaften mit kritischen Übergängen im individuellen und öffentlichen Leben umgingen, zu denen er neben dem Tod beispielsweise

auch Geburt, Initiation, Hochzeit und Krieg zählte. Auch wenn sein Schema kritisiert und weiterentwickelt wurde, eignet sich das Grundgerüst zur strukturellen Beschreibung der römischen Bestattungskultur.

Weihrauch zum Schutz der Lebenden

Insbesondere sah man den Leichnam und alle, die mit ihm Kontakt hatten, als unrein an. Daher mussten entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, um diese »Befleckung« (griechisch: *miasma*) zu überwinden: Die Angehörigen verbrannten beispielsweise Weihrauch und andere wohlriechende Substanzen. Sie wuschen und salbten den Verstorbenen, bahrten ihn dann für bis zu sieben Tage im Haus auf, um ihn zu betauern, oft unterstützt von bezahlten Klagefrauen. Im nächsten Schritt wurde der Leichnam in einer Prozession zum Begräbnisplatz überführt.

Bei wohlhabenden Familien übernahmen Dienstleister einen Großteil der anfallenden Aufgaben. Dazu zählten neben den erwähnten Klagefrauen unter anderem auch Musiker, zudem die »libitinarii«, welche die allgemeine Organisation besorgten, die »pollinctores«, die den Leichnam für die Aufbahrung vorbereiteten, sowie die »ustores«, die in der Republik und frühen Kaiserzeit für die Kremation zuständig waren.

Besonders spektakulär ging es bei der Beisetzung eines hohen Beamten zu. Für die Nobilität war die »pompa funebris«, also der Leichenzug, ein öffentliches Schauspiel, das neben der eigentlichen Beisetzung auch der Repräsentation der betroffenen Familie diente. Als der Historiker Polybios im 2. Jahrhundert v. Chr. als Kriegsgefangener nach Rom kam, faszinierten ihn diese Prozessionen derart, dass er ihnen später einen langen Absatz in seinen »Historien« widmete.

Immer wenn ein herausragender Mann starb, führte er aus, verwandele sich der öffentliche Raum rund um das Forum in ein großes Spektakel. Der Verstorbene würde, begleitet von wogenden Menschenmassen, in aufrechter oder liegender Position zur Rednertribüne getragen und dort für alle sichtbar aufgebahrt. Ein enger Verwandter schildere allen Anwesenden die Lebensleistungen des Verschiedenen so lebhaft, dass selbst jene weinten, die ihn nicht persönlich kannten. Anschließend beschwöre der Redner die Taten aller verdienten Vorfahren der Familie. Dann folge die eigentliche »pompa«: Die Angehörigen schlüpfen in die Rollen ihrer Vorfahren, indem sie Ahnenmasken aus Wachs (*imagines*) vor sich hertrugen, und ließen so die gesamte Genealogie der Familie in einer öffentlichen Performance aufscheinen (siehe Bild links). Auf diese Weise begleiteten sie den Toten auf seiner letzten Reise und nahmen ihn in ihre Reihe auf.

Wächserne Ahnenmasken, »imagines«, spielten eine wichtige Rolle in der römischen Erinnerungskultur. Keine dieser Masken hat sich bis heute erhalten, aber die Statue des Togatus Barberini vermittelt uns einen Eindruck. Der Patrizier trägt die römische Toga und hält die Porträts verstorbener Familienmitglieder in den Händen.



ANG IMAGES / MONDADORI PORTFOLIO / ELEFTA

Die Masken wurden so zu mehr als zu Bildern, die man zu Hause im Familienschrein aufstellte – sie ließen Teile der römischen Geschichte aktiv im öffentlichen Raum lebendig werden.

In Polybios' Augen verkörperte der auf den ersten Blick befremdliche Brauch all das, was Rom nach außen und nach innen stark machte. In ähnlicher Weise deuten moderne Historiker diese Leichenzüge als eine sicht- und greifbare Inszenierung des kollektiven Gedächtnisses. Mit jedem Todesfall lebten die Leistungen ganzer Generationen wieder auf. Der Vergänglichkeit des Lebens begegneten die Römer mit der Zurschaustellung beispielhafter Taten, welche die Zeiten überdauerten. Gleichzeitig erhielten die Verdienste des Einzelnen so eine zusätzliche Bedeutung vor dem Hintergrund der Meriten seiner Familie. Durch das in Szene gesetzte Erinnern an eine ganze Reihe großer Vorbilder sollte die nächste

Generation bereits in jungen Jahren in die gemeinsame Identität hineinwachsen, sich mit der Familie und dem Dienst am römischen Gemeinwesen identifizieren und dazu motiviert werden, den gleichen Weg einzuschlagen.

Der feierlichen Beisetzung wohnten – selbst in den gehobeneren Kreisen – in der Regel nur die Familie und die engsten Freunde bei, die am Grab gemeinsam ein »silicernium« genanntes Mahl einnahmen. Nach einer Klagezeit von neun Tagen versammelten sich die Angehörigen dort erneut, um ein weiteres rituelles Mahl zu teilen und den Totengeistern ein Trankopfer darzubringen.

Familie, Haus und Besucher wurden sodann einer rituellen Reinigung unterzogen, welche die Sphäre der Toten klar von jener der Lebenden abtrennen sollte. Dazu zählten Waschungen, das Ausfegen des Hauses und das Verbrennen von Weihrauch sowie magische Riten wie die »suffitio«. Die Quel-

Trost spendende Vielfalt

Im römischen Reich kursierten unterschiedliche, zum Teil sogar einander widersprechende Jenseitsvorstellungen.

Was erwartet den Menschen nach dem Tod? Die Vorstellungen der Römer dazu waren sehr heterogen und folgten keinem allgemein gültigen Dogma, wie wir es aus der christlichen Theologie kennen. Erzählungen über den Unterweltherrscher »Dis Pater«, auch als Pluto bekannt, und philosophische Skepsis existierten nebeneinander, und die Heilsversprechen aus dem Orient stammender Mysterienkulte standen neben dem folkloristischen Glauben an Totengeister, die es an bestimmten Tagen im Jahr durch Opfer zu besänftigen galt.

Die Idee des Fortlebens in einer Unterwelt findet sich vor allem in der römischen Dichtung. Zu den berühmtesten Schilderungen des Totenreichs zählt die des Dichters Vergil (70–19 v. Chr.), die eng an die griechische Mythologie angelehnt ist: Er ließ Äneas, den mythischen Stammvater der Römer, gemeinsam mit der Priesterin Sibylle durch eine Höhle am Avernensee, in der Nähe des heutigen Neapel in den Orkus hinabsteigen. Mit Hilfe des Fährmanns Charon überquerten sie den Unterweltfluss Styx, der das Reich der Toten von dem der Lebenden trennte, trafen auf Cerberus, den dreiköpfigen Höllenhund, und wanderten durch ein Meer von Schattenwesen. Sie begegneten den Seelen der Frevler, die im Tartarus Qualen litten, und jenen der Glückseligen, die im Elysium alles irdische Leid vergessen durften.

Eine ganz andere, damals verbreitete Idee griff der Komödiendichter Plautus (etwa 250–184 v. Chr.) auf: Ein Gespenst suchte die Lebenden heim, da es sich in seinem Andenken vernachlässigt fühlte; die Römer nannten solche Geister »larvae« oder »lemures«. Die Manen hingegen – die Ahnen, die man als Totengötter verehrte und denen die Römer Grabstätten weihten – galten als wohlgesinnte Helfer, deren Beistand man sich durch regelmäßige Opfer sicherte.

Die Vorstellung einer Fortexistenz nach dem Tod war nicht auf Dichtung und Volksglauben beschränkt. Sie fand sich auch

in der Philosophie, besonders eindrücklich im so genannten »Traum des Scipio«, einer Erzählung des römischen Autors und Staatsmanns Cicero. Die Seele eines verdienten Mannes, so schildert dieser, kehrte nach dem Tod zu ihrer ursprünglichen Heimat im Kosmos zurück. Von der Milchstraße aus könne der Verstorbene dann das gesamte Universum überblicken, das Geschick der Menschen verstehen und die einzigartige Harmonie der rotierenden Sphären des Kosmos hören – eine Vorstellung, die auf den griechischen Philosophen und Mathematiker Pythagoras zurückging.

Den wohl größten Kontrast zu solchen Vorstellungen bildeten die Lehren des griechischen Philosophen Epikur (342–271 v. Chr.): Mit dem Körper würde auch die Seele geboren, und mit ihm müsse sie daher auch wieder vergehen. So deprimierend diese Vorstellung erscheinen mag, brachte sie Epikurs Anhängern doch Erlösung: Wenn der Tod das Ende bedeute, müsse man ihn auch nicht fürchten und könne folglich ein freies Leben führen.

Auch Epikurs Philosophie und ihre römischen Ableger haben Spuren in den Grabinschriften der Römer hinterlassen: »Wir sind nichts und wir waren nichts. Du, der du das liest, schau's dir an, wie schnell wir vom Nichts ins Nichts zurückkehren«, ist in einem Epigramm zu lesen. Bezeichnenderweise spricht die Inschrift den Passanten, der am Grab vorübergeht, direkt an und lenkt seine Aufmerksamkeit so auf den Verstorbenen. Wenn auch die Seele mit dem Tod verschwindet, so kann der Tote dennoch auch hier im Andenken der Menschen lebendig bleiben. Das Hoffen darauf, im kollektiven Gedächtnis der Nachwelt weiterzuleben, dürfte demnach ein nahezu allgemein gültiges Muster der römischen Kultur gewesen sein – unabhängig von Mythos und Logos, von Glaube und Philosophie.

len zu dieser sind spärlich, aber es scheint, dass Wasser und Feuer eine zentrale Rolle spielten: Die Trauernden schritten oder sprangen über ein rauchendes Feuer und benetzten einander mit in Wasser getränkten Lorbeerkränzen.

Was nun der Nachwelt blieb, um der Toten zu gedenken, waren ihre Grabstätten, die oft an einer der großen Ausfallstraßen lagen. Nur die wichtigsten Clans besaßen dort Flächen unmittelbar am Wegrand. Aus Platznot wurden die Grabanlagen daher in mehreren Reihen oder gleich unterirdisch angelegt.

Roms Steinmetze und Architekten haben eine Vielzahl an verschiedenen Grabformen hervorgebracht. Zu den einfachsten zählte der Tumulus: Über einer aufgemauerten Grabkammer mit meist kreisförmigem Grundriss schüttete man einen Erdhügel auf, der bepflanzt werden konnte. Wie monumental eine solche Anlage gleichwohl wirken konnte, demonstrierte das Mausoleum des Kaisers Augustus auf dem Marsfeld. Besonders beliebt waren auch Gebäude in Form von Tempeln oder Altären. Im 1. Jahrhundert v. Chr. ließ sich ein gewisser Cestius gar eine Pyramide als letzte Ruhestätte errichten, während der offenbar betuchte Bäcker Eurysaces sich in einem gigantischen, steinernen Klotz bestatten ließ, der mit stilisierten Teigknettrögen verziert war und dessen Bildschmuck Szenen aus dem Alltag des Bäckerhandwerks zeigte. Dem Einfallsreichtum waren also keine Grenzen gesetzt.

In römischen Rechtstexten lesen wir entsprechend, dass ein Grabmal über die einfache Erinnerung hinaus auch den Zweck hatte, das Wesen und die gesellschaftliche Stellung des Toten (*substantia et dignitas*) widerzuspiegeln und für die Nachwelt zu bewahren. Die Form des Monuments, das Material, die Bepflanzung und die Umgebung sollten dem Vorübergehenden vermitteln, wer da ruhte. Was die Soziologen Matthias Meitzler und Thorsten Benkel von der Universität Passau unserer gegenwärtigen Friedhofskultur attestieren – eine zunehmende Individualisierung des Grabschmucks und des Umgangs mit dem Sterben – galt in modifizierter Form also auch für das antike Rom.

Manchmal zierten Porträts der Verstorbenen die Grabbauten, immer aber Inschriften. Ungefähr ab dem späten 1. Jahrhundert v. Chr. eröffnete man Letztere regelmäßig mit der Formel »dis manibus« – zu Deutsch: »den Totengöttern«, denen man das Grabmal stiftete.

Der Inhalt einer Grabinschrift reichte von grundlegenden Informationen bis hin zu elaborierten Versen, die nicht selten die großen Dichter der lateinischen Literatur zitierten. Meist verzeichneten die Texte Namen und Familienzugehörigkeit des Verstorbenen sowie den Namen des Grabmalstifters. Umfassender gestaltete Inschriften unterrichteten über das Leben des Toten – bei Männern über deren öffentliche Ämter, bei Frauen über ihre Verdienste um die Familie. Ähnlich dem christlichen »Ruhe in Frieden« gab es auch in Rom

Formeln, die sich häufig am Ende der Inschriften fanden, darunter die Abkürzung »S.T.T.L.«, die für die Formel »sit tibi terra levis« stand: Möge dir die Erde leicht sein. Dahinter verbarg sich die Vorstellung, dass der Tote, mochte er auch in einem steinernen Grabbau liegen, in der Erde seine letzte Ruhe fand; sie wurde als personalisierte »Terra Mater« in der Grabkunst häufig dargestellt.

Grab und Inschrift waren wichtige Mittel zur sozialen Präsentation. Sie bezeugten Ansehen und Macht der jeweiligen Familie wie auch des Verstorbenen. Vor allem aber sorgten sie dafür, dass dieser in der Welt der Lebenden präsent blieb. Bereits unmittelbar nach dem Tod und dann wieder

beim gemeinsamen Mahl am Grab riefen die Angehörigen den Toten beim Namen. Die Römer bezeichneten diesen Brauch als »conclamatio«. Viele Inschriften waren so formuliert, dass der

Verstorbene den Passanten »ansprach«, ihn bat stehenzubleiben, kurz innezuhalten und laut zu lesen, was auf dem Grabstein geschrieben stand. Auf diese Weise wiederholte der Vorübergehende die »conclamatio« und bewahrte den Toten so vor dem Vergessenwerden.

Das Grab fungierte als eine Art Dialog zwischen dem Bestatteten und jenen, die seiner gedachten. Die »damnatio memoriae«, das erzwungene Vergessen durch die gezielte Zerstörung von Inschriften, Porträts und Grabmälern, zählte tatsächlich zu den am meisten gefürchteten Strafen. Kein Wunder also, dass Ausonius angesichts des unleserlichen Namens auf einem Grabstein in Meditationen über die Vergänglichkeit menschlicher Leistungen verfiel. Das Monument, dem er sich gegenüber sah, hatte die ihm ureigene Aufgabe nicht erfüllt – der Stein war verstummt. ~

Das Zerstören von allem, was an einen Toten erinnern sollte, gehörte zu den schrecklichsten Strafen

DIE AUTORIN



Annika Domaïko hat in Cambridge und Heidelberg Latinistik und Klassische Archäologie studiert. Sie ist Doktorandin im ERC-Projekt »Ancient Narrative« an der Universität Heidelberg und arbeitet außerdem als Wissenschafts- und Kulturjournalistin.

QUELLEN

- Carroll, M., Rempel, J. (Hg.):** Living through the Dead. Burial and Commemoration in the Classical World. Oxbow Books, Oxford 2011
- Morris, I.:** Death-Ritual and Social Structure in Classical Antiquity. Cambridge University Press, Cambridge 1992
- Schrumpf, S.:** Bestattung und Bestattungswesen im Römischen Reich. Ablauf, soziale Dimension und ökonomische Bedeutung der Totenfürsorge im lateinischen Westen. Vandenhoeck & Rupprecht, Göttingen 2006
- Toynbee, J. M. C.:** Death and Burial in the Roman World, Cornell University Press, Ithaca, New York 1971

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408650

TOTENKULT II

Hauptstadt der Seuchen

Das chronisch überbevölkerte antike Rom hatte immer wieder mit verheerenden Epidemien zu kämpfen, die tausende Menschenleben forderten. Mit ungewöhnlichen Lösungen versuchte man, der Leichenberge Herr zu werden.

Von Dominique Castex und Sacha Kacki



Die Katakomben von Sankt Petrus und Marcellinus beherbergen Berge von Skeletten. Die Ergebnisse der archäologischen Untersuchung zeigen, dass es sich bei ihnen wahrscheinlich um die Opfer einer Seuche handelt.

DENIS GLIKSMAN, INRAP; MIT FRDL. GEN. VON DOMINIQUE CASTEX

Der Aufstieg vom Stadtstaat zur Hauptstadt eines Weltreichs ließ Rom aus den Fugen geraten. Von der Mitte des 3. Jahrhunderts v. Chr. bis zur Hochphase des Kaiserreichs im 2. Jahrhundert n. Chr. wuchs die Bevölkerung von 250 000 auf 750 000 oder gar eine Million Einwohner an. Diese Entwicklung hatte aber ihren Preis: Überbevölkerung und Platznot zwang die Ärmern dazu, auf engstem Raum zusammenzuleben. Diese Bedingungen begünstigten die Verbreitung von Krankheiten und dürften zumindest teilweise erklären, wieso die Stadt so häufig von Epidemien heimgesucht wurde.

Dass dem so war, überlieferten etliche Chronisten. So soll eine Epidemie im Jahr 189 laut dem griechischen Autor Cassius Dio täglich mehr als 8000 Menschen das Leben gekostet haben. Zwar ist diese Angabe heute umstritten, doch sie zeigt die Größenordnung der Sterblichkeit während solcher Phasen. Experten schätzen, dass sie bei dieser als Antoninische Pest – benannt nach dem Herrscherhaus der Antoniner – bekannten Seuche zwischen 7 und 33 Prozent der Stadtbevölkerung lag.

Wie viel Leid und Trauer ein solches Massensterben verursacht haben mag, wie die Bürger Roms damit umgingen, was die Obrigkeit dagegen unternahm – über all das wissen wir nur wenig. Ebenso unsicher ist, wie man versuchte, der Leichen Herr zu werden. Die wenigen schriftlichen Zeugnisse stammen zumeist aus republikanischer Zeit. Ihnen zufolge warf man viele Tote in den Tiber, andere entsorgte man in dem Graben, der die so genannte Servianische Stadtmauer umgab. Ausgrabungen auf dem Esquilin, einem der sieben Hügel Roms, förderten Ende des 19. Jahrhunderts einen Teil der Verteidigungsanlage zu Tage. Die Mauer säumte tatsächlich ein gewaltiger Graben von gut 30 Meter Breite und etwa 9 Meter Tiefe, der auf einer Länge von mehr als 30 Metern freigelegt wurde. Er war bis zum Rand mit menschlichen Skeletten gefüllt. Die Archäologen schätzten, dass etwa 24 000 Leichen dort »beigesetzt« worden waren. Ob es sich dabei hauptsächlich um Seuchenopfer handelte und zu welcher Zeit die Menschen starben, ist leider nicht bekannt.

Diese Nutzung des Grabens wurde reguliert – möglicherweise aus hygienischen Gründen oder weil der Platz darin knapp wurde – und unter Augustus im 1. Jahrhundert v. Chr. ganz verboten. Leider gibt es aus der nun folgenden Kaiser-

zeit kaum verwertbare Berichte über den Umgang mit massenhaft anfallenden Toten. Wohin ließ beispielsweise Kaiser Commodus (161 – 192) die von Cassius Dio erwähnten Opfer der Antoninischen Pest bringen? Die antike Überlieferung schweigt sich hierzu aus, und lange konnten auch Archäologen keine befriedigende Antwort auf diese Frage geben. Neue Anhaltspunkte liefern Grabungskampagnen in einer Katakomben etwa drei Kilometer südöstlich des antiken Stadtkerns. Der Legende nach wurden im 3. Jahrhundert dort die Märtyrer Marcellinus und Petrus beigesetzt, weshalb die Gewölbe später christliches Gemeinschaftsgrab wurden.

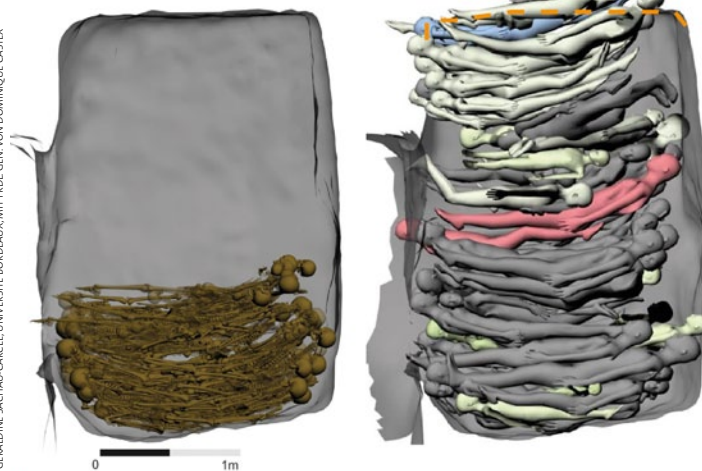
Die auch »Friedhof zu den zwei Lorbeeren« genannte unterirdische Anlage – eine von 60 in Rom und Umgebung – besteht aus einem ganzen Netz von Grablegen, verteilt auf gut viereinhalb Kilometer Galerien und drei Stockwerke. Zwischen dem Ende des 3. und dem Beginn des 5. Jahrhunderts wurden dort 20 000 bis 25 000 Menschen bestattet.

Gemeinschaftlich zur letzten Ruhe

Nachdem ein Teil des mittleren Sektors eingebrochen war, konnten Archäologen 2004 einen bis dahin unzugänglichen Bereich untersuchen, der sich deutlich von den anderen unterschied. Während Gänge sonst in rechten Winkeln zueinander aus dem Gestein geschlagen worden waren, mit Einzelgräbern (»loculi«) in ihren Wänden, gibt es dort etliche miteinander verbundene Räume unterschiedlicher Größe. Vor allem entdeckten italienische Archäologen in einigen davon die Gebeine zahlreicher Individuen – es waren Kollektivgräber. Sie konnten außerdem nachweisen, dass man dort vollständige Körper bestattet hatte. Von 2005 bis 2010 folgten weitere Kampagnen im Rahmen eines gemeinsamen Projekts verschiedener Institutionen wie dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS), der Maison des Sciences et de l'Homme d'Aquitaine, der Päpstlichen Kommission für Sakrale Archäologie, dem Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP) und der École Française de Rome.

Die Forscher untersuchten zwei kleinere Räume gänzlich, zwei größere teilweise. Sie legten die Skelette von insgesamt etwa 500 Individuen frei, die in mehreren Lagen aufeinander gestapelt waren. Ein Fresko aus dem Hochmittelalter im Gang zu einer der Kammern zeigt militärisch gekleidete Personen neben den Märtyrern Petrus und Marcellinus. Die

Wenn man die Körper der Toten in einer der Kammern digital rekonstruiert, zeigt sich, dass sie nicht alle auf einmal dort abgelegt worden sein können: Das Gesamtvolumen wäre zu groß (rechts).



dort Beigesetzten hätten gemäß der christlichen Bildsprache der Zeit also Opfer von Christenverfolgungen gewesen sein können. Da jedoch keines der Skelette Spuren von Gewalt aufwies, kommt diese Erklärung nicht in Frage. Datierungen anhand diverser Kleinfunde und Münzen sowie mit Radiokohlenstoffanalysen von Knochen- und Geweberesten bestätigten, dass die Kammern bereits Ende des 1. bis Anfang des 3. Jahrhunderts als Grablege dienten, also noch vor dem Martyrium der Genannten.

Die Bestattung einer großen Zahl von Toten am gleichen Ort lässt vermuten, sie seien einer Seuche zum Opfer gefallen – sofern man sie tatsächlich etwa zur gleichen Zeit bestattet hat. Doch laut einer 3-D-Rekonstruktion des Gesamtvolumens der Körper vor der Verwesung hätte das verfügbare Volumen der Grabkammern für eine gleichzeitige Deponierung aller Toten auf keinen Fall gereicht (siehe Bild oben).

Trotz des eher mäßigen Erhaltungszustands der Gebeine ließ sich andererseits zeigen, dass die Skelette von direkt neben- und übereinander gestapelten Personen jeweils im anatomischen Verbund lagen, das heißt: Die Anordnung der Knochen war erhalten geblieben. Wären diese Toten aber zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten in den Kammern abgelegt worden, hätten die jüngeren die bereits stark verwesenen älteren Leichen beeinträchtigt.

Löst man den Blick von Einzelskeletten und betrachtet sie als Bestandteil archäologischer Schichten, fällt auf, dass die meisten Individuen in ihrer jeweiligen Schicht systematisch angeordnet worden waren: auf dem Rücken liegend, Seite an Seite; kleine Kinder in den Lücken zwischen Erwachsene – ein Platz sparendes Schema. Einige Schichten waren zudem nach unten durchgebogen, wobei die Schädel und die Knochen der unteren Gliedmaßen über denen des Rumpfs lagen. Wahrscheinlich sackten die offenbar gemeinsam verwesenden Körper in die Form der darunter liegenden Schicht bereits zersetzter Kadaver.

AUF EINEN BLICK

STAPELWEISE LEICHEN

1 Mehrere **Epidemien** suchten Rom im Lauf der Antike heim. Eine von ihnen, die so genannte **Antoninische Pest**, soll tausenden Menschen pro Tag das Leben gekostet haben.

2 Eine solche Zahl von Toten ließ sich nicht mehr in Einzelgräbern bestatten. Die **Katakomben von Sankt Petrus und Marcellinus** zeigt, dass die Leichen stattdessen in Gemeinschaftsanlagen gestapelt wurden. Trotz Massengrab gab es **Bestattungsriten**: Man bestrich die Leichen mit Gips, streute Bernstein und Harze darüber und gab Vornehmen wertvolle Gegenstände mit.

Hier wurden mehrere Leichname gleichzeitig abgelegt, wie der Erhalt des anatomischen Verbundes der Knochen zeigt.



DENE GUKSMAN, INRAP, MIT FRED GEN VON DOMINIQUE CASTEX

Auch wenn nicht alle 500 Menschen Opfer ein und desselben Ereignisses geworden waren, gab es also zweifellos Massenbestattungen, und die Kammern dienten als Notfallgrablege für Krisenzeiten. 2013 lieferte eine chemische Analyse des Tuffsteins zusätzliche Anhaltspunkte: Weil bei der Verwesung organische Flüssigkeiten entstehen, die das Gestein in der Umgebung des Kadavers verändern, ließen sich drei Massenbegräbnisse nachweisen und weitere nicht ausschließen.

Waren manche der Toten Migranten?

Epidemien sind derzeit die wahrscheinlichste Erklärung des Befunds. Die Antoninische Pest, die manche Medizinhistoriker den Pocken zuschreiben, würde zur Datierung passen. Allerdings konnte bislang keine DNA eines entsprechenden Pathogens identifiziert werden. Zudem spricht die erwähnte 3-D-Rekonstruktion dafür, dass die Bestatteten mehreren aufeinanderfolgenden Seuchen zum Opfer fielen oder dem Zusammentreffen von Seuchen und anderen katastrophalen Ereignissen.

Offenbar genossen zumindest einige der Toten eine hohe gesellschaftliche Stellung, denn zu den Kleinfunden gehörte zum Beispiel ein Paar goldener Ohrringe und ein Ring aus Gagat. Viele Leichname waren in Leinen eingewickelt worden, und manche dieser Stoffe waren von feiner Machart, wiesen bisweilen sogar eingewebte Goldfäden auf.

Zuvor hatte man etliche Tote chemischen Analysen nach von Kopf bis Fuß mit Gips bedeckt. In dessen Resten sowie auf den Skeletten entdeckten die Forscher auch feine rötliche Partikel, die sich als Bernstein von der Ostseeküste herausstellten, sowie Rückstände von Sandarach und Weihrauch. Ersterer galt als Schutz gegen Krankheiten, unterstreicht also die Seuchentese. Auch die beiden Harze passen dazu: Die hippokratische Tradition der antiken Medizin vertrat nämlich die Ansicht, dass übel riechende Luft gefährlich sei, da sie so genannte Miasmen transportiere, gegen die man sich

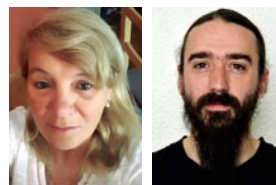
zu schützen versuchte, indem man die Luft im Gegenzug mit Wohlgerüchen sättigte.

Diese für Rom ungewöhnliche Bestattungspraxis könnte die Sitte einer aus einem anderen Kulturkreis zugezogenen Bevölkerungsgruppe gewesen oder von dieser inspiriert worden sein. Das würde den Gips verständlich machen: In vielen antiken Gräbern in Tunesien und Algerien hat man ein helles, gipsähnliches Material auf den Körpern von Bestatteten gefunden. Diese Praxis könnte sich während der Kaiserzeit durch Migration im römischen Reich verbreitet haben. Dementsprechend findet man ähnliche Beispiele auch in mehreren europäischen Ländern. Biochemische Untersuchungen an 130 Skeletten der Katakomben zeigten 2015, dass sich die Ernährung dieser Personen zwar nicht von der anderer Rombewohner unterschied – Getreide, Fleisch und Fisch –, ein Viertel von ihnen aber tatsächlich Migranten gewesen waren, davon einige aus Afrika, Arabien und Kleinasien.

Dass die Gruft von Marcellinus und Petrus kein Einzelfall war, bewies der italienische Archäologe Giuseppe Wilpert: In der Katakomben von Sankt Calixt legte er eine ähnlich organisierte Abfolge aus mehreren Schichten aufgehäufter menschlicher Skelette frei, die in die gleiche Zeitspanne datiert wurde. Beide Massengräber unterstreichen die Überlieferung des Cassius Dio, der von 8000 Toten pro Tag in Folge der Antoninischen Pest schrieb.

Gut 50 Jahre später ergriffen Soldatenkaiser die Macht, wurden aber der inneren und äußeren Konflikte nicht Herr. Hatte das Massensterben so tiefe Wunden in Rom hinterlassen, dass es das Reich destabilisierte? Diese These gilt inzwischen zwar als überholt, doch sollte tatsächlich ein Drittel der Stadtbevölkerung der Seuche zum Opfer gefallen sein, wie manche Experten schätzen, mag sie wesentlich zu den Transformationsprozessen beigetragen haben, die das Imperium schließlich Ende des 3. Jahrhunderts in ein neues Zeitalter führten: die Spätantike. ~

DIE AUTOREN



Dominique Castex ist Forschungsdirektorin am CNRS, **Sacha Kacki** ist Doktorand im »Laboratorium für Kultur, Umwelt und Anthropologie von der Vorgeschichte bis Heute« der Universität de Bordeaux.

QUELLEN

Kacki, S. et al.: Réévaluation des arguments de simultanéité des dépôts de cadavres: l'exemple des sépultures plurielles de la catacombe des saints Pierre et Marcellin (Rome). In: Bulletin et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris 26, S. 88–97, 2014

Sachau-Carcel, G.: From Field Recording of Plural Burials to 3D Modelling. Evidence from the Catacomb of Sts. Peter and Marcellinus, Italy. In: Anthropology, International Journal of Human Diversity and Evolution, 52, S. 285–297, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408651



Afrikas bedrohliche Bevölkerungs- explosion

Neue Prognosen alarmieren: Bis 2100 könnten sich mehr als sechs Milliarden Menschen in Afrika drängen – mehr als der Kontinent verträgt. Dagegen hilft allein die Emanzipation der Frauen und ihr ungehinderter Zugang zu Verhütungsmitteln.

Von Robert Engelman

In einem Krankenhaus in Rabai (Kenia) lauschen Frauen einem Vortrag über die »Pille danach« und andere Möglichkeiten der Familienplanung.

Die Erde ist ein begrenztes System: Je mehr Menschen auf unserem Planeten leben, desto heftiger tobt der Wettstreit um knappe Ressourcen. Die Erdbevölkerung wächst zwar stetig weiter, aber die Trends der vergangenen Jahrzehnte stimmen optimistisch. Im weltweiten Durchschnitt bringt jede Frau heutzutage 2,5 Kinder zur Welt – nur noch halb so viele wie Anfang der 1950er Jahre. In 40 Prozent aller Länder liegt die Fruchtbarkeitsziffer nicht über jenen 2,1 Kindern pro Frau, bei denen die Bevölkerungszahl konstant bleibt.

Die große Ausnahme ist Afrika. Dort gebiert jede Frau durchschnittlich 4,7 Kinder, und die Bevölkerung wächst fast dreimal schneller als im Rest der Welt. Der große Kontinent, aus dem einst unsere Gattung hervorging, sieht einer düsteren Zukunft entgegen. Die Fertilitätsrate – definiert als die Anzahl der Lebendgeburten einer Frau – verharrt in fast jedem der 54 Länder Afrikas auf hohem Niveau. Traditionell gelten große Familien als erstrebenswert, denn der zahlreiche Nachwuchs leistet billige Landarbeit und hohe Kindersterblichkeit fällt weniger ins Gewicht.

Heute erreichen jedoch viel mehr Babys als früher das Erwachsenenalter und werden selbst Eltern. Die fast 1,2 Milliarden Bewohner Afrikas sind zur Hälfte Kinder oder Jugendliche. Diese Altersverteilung wirkt als Treibsatz eines beispiellosen Bevölkerungswachstums. Nach neuen demografischen Berechnungen wird sich die Einwohnerzahl Afrikas bis zum Ende des Jahrhunderts verdrei- oder gar vervierfachen.

Früher rechnete man für 2100 mit zwei Milliarden Menschen in Afrika. Diese Modelle unterstellten eine zügig fallende Fertilitätsrate, doch in Wirklichkeit gehen die Geburtenziffern nur sehr zögernd und ungleichmäßig zurück. Neuerdings prognostizieren die Vereinten Nationen deshalb atemberaubende Zahlen zwischen 3 und 6,1 Milliarden. Selbst die sehr vorsichtige Schätzung des in Österreich ansässigen Internationalen Instituts für Angewandte Systemanalyse (IIASA) kommt auf 2,6 Milliarden.

In den letzten Jahren musste die UNO die für 2100 vorausgesagte Höhe der Weltbevölkerung fortwährend anheben – von anno 2004 geschätzten 9,1 Milliarden auf heute 11,2 Mil-

liarden. Der unvorhergesehene Zuwachs stammt fast ausschließlich aus Afrika.

Die extreme Bevölkerungszunahme stört wirtschaftliche Entwicklung und politische Stabilität. Vielen Ländern Afrikas mangelt es jetzt schon an Wasser, fruchtbaren Böden oder einer funktionierenden Regierung. Immer heftigere Konkurrenz um Nahrung und Arbeit schafft Spannungen, die nicht nur die heimische Versorgung gefährden, sondern auch die natürlichen Ressourcen anderer Kontinente – insbesondere, wenn Afrikaner beginnen, scharenweise die Heimat zu verlassen. Diesen Wunsch äußern nicht weniger als 37 Prozent aller jungen Schwarzafrikaner, meist in der Hoffnung auf Arbeit im Ausland. Allein 2015 ertranken hunderte Afrikaner beim Versuch, nach Europa zu fliehen.

Die Welt muss Afrika helfen, sein Bevölkerungswachstum zu bremsen. Von den 1960er Jahren an drängten internationale Stiftungen und Hilfsorganisationen die örtlichen Regierungen, »etwas zu unternehmen«. Dieses Etwas bestand meist aus Investitionen in Programme zur Familienplanung, die aber nicht mit dem übrigen Gesundheitssystem vernetzt waren, sowie aus Regierungsappellen nach dem Motto »Kleine Familien sind besser«. Doch ab Mitte der 1990er Jahre verstummten die Appelle. Kritik am Bevölkerungswachstum galt nun als politisch inkorrekt und als Zeichen von mangelndem Kulturverständnis. Die internationalen Geldgeber konzentrierten sich auf Gesundheitsreformen, insbesondere auf den Kampf gegen Aids und andere tödliche Krankheiten.

Die Frauen ermächtigen

Es ist höchste Zeit, wieder vom Bevölkerungsproblem zu reden. Erfahrungsgemäß genügt es nicht, den Frauen bloß Zugang zu wirksamen Verhütungsmitteln zu verschaffen und sie über deren Gebrauch aufzuklären. Auf Dauer wirken nur emanzipatorische Maßnahmen: Schulbildung für Mädchen und Frauen sowie soziale und rechtliche Gleichstellung mit den Männern. Zwar haben einige Länder hier und da damit angefangen, doch letztlich hilft nur ein mehrgleisiger Ansatz, der den Frauen echte Chancen auf Bildung, Beruf, eigenes Einkommen, sozialen und politischen Status verschafft.

Eine menschliche Population lässt sich niemals »kontrollieren«; ein solcher Versuch verletzt die Menschenrechte und funktioniert meist ohnehin nicht. Aber es gibt indirekte und dennoch wirksame Methoden. Eine strategisch geplante Serie von Maßnahmen kann den Wettbewerb um Ressourcen mildern, Konflikte entschärfen und die Lebensqualität erhöhen – für Mädchen und Jungen, Frauen und Männer.

Etlche Messstatistiken zeichnen derzeit ein düsteres Bild von Afrika. Trotz wirtschaftlicher und politischer Fortschritte herrschen vielerorts niedrige Lebenserwartung, große Armut und Mangelernährung. Die Ernteerträge gehören zu den niedrigsten der Welt. Südlich der Sahara führt die Überweidung durch Nutztiere zur Ausbreitung der Wüsten; das zwingt nomadisch lebende Hirtenvölker, in Bauernland einzudringen, während beide Bevölkerungsgruppen weiter

AUF EINEN BLICK

OHNE DIE FRAUEN GEHT GAR NICHTS

1 Bis 2100 könnte die Bevölkerung Afrikas von heute **1,2 Milliarden** auf 3 oder gar **mehr als 6 Milliarden** steigen, falls es bei den hohen Geburtenziffern bleibt. Das unerwartet starke Bevölkerungswachstum gefährdet die Lebensgrundlagen – nicht nur in Afrika.

2 Ein deutlicher Rückgang der Geburtenziffer lässt sich nur erreichen, wenn die Frauen bessere Bildungs- und Berufschancen sowie mehr **soziale und politische Mitsprache** bekommen. Außerdem brauchen sie leichteren **Zugang zu Verhütungsmitteln**.

3 Die Männer müssen lernen, über die Anzahl ihrer Kinder nicht allein zu entscheiden. Und sie müssen aufhören, ihren Frauen **Gewalt** anzutun, sobald diese Verhütung praktizieren.

wachsen. Ägypten und Äthiopien rasseln mit dem Säbel; sie streiten um das Wasser des Nils, von dem einst elf Nationen gut leben konnten. Laut einer Analyse aus dem Jahr 2010 liegen die vier wasserärmsten Länder der Welt in Afrika.

Der Streit um immer knappere Ressourcen schürt Terrorismus und Bürgerkriege. Auf der kenianischen Insel Lamu wurden im Juli 2014 bei einem Streit zwischen Christen und Muslimen um Landbesitz 80 Menschen ermordet. Manche Experten erklären auch den Aufstieg der islamistischen Terrorgruppe Boko Haram in Nigeria zumindest teilweise mit dem Streit von Hirten und Bauern um das austrocknende Buschland der Sahelzone. In ganz Zentralafrika wächst die Aggressivität junger Männer, denen sich kaum Arbeitschancen bieten. »Wenn es mehr Jobs gäbe, vor allem in der Landwirtschaft, hätten wir weniger Frustration und Streit in Plateau«, sagt die Regierungsberaterin Becky Adda-Dontoh über einen Bundesstaat Nigerias, in dem Boko Haram besonders aktiv ist.

The Fund for Peace, eine Nichtregierungsorganisation mit Sitz in der US-Hauptstadt Washington, bezeichnet vier afri-

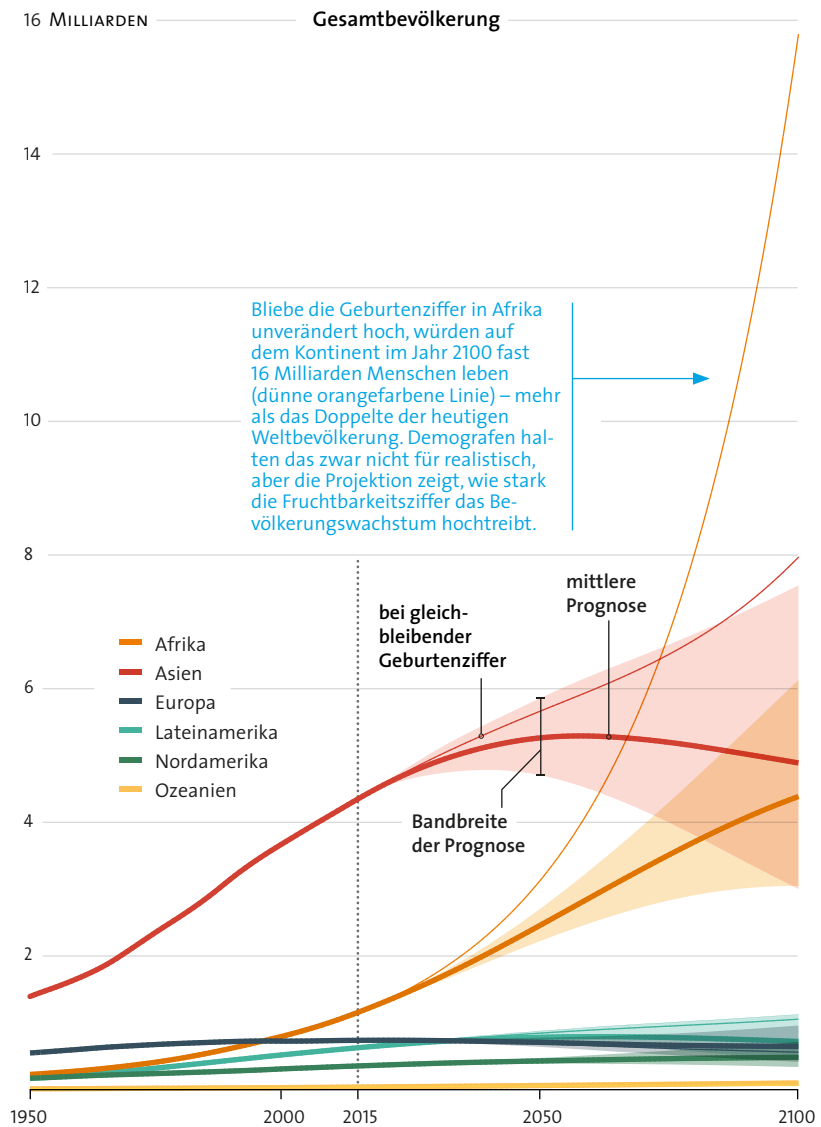
kanische Staaten – Sudan, Südsudan, Somalia und die Zentralafrikanische Republik – als die instabilsten Länder der Welt: Sie seien am unfähigsten, ihr Gebiet zu verwalten und ein Mindestmaß an Sicherheit zu gewährleisten.

Wie sähe der Erdteil erst mit zwei Milliarden Menschen aus – oder gar mit sechs Milliarden? Andere Kontinente bieten kaum vergleichbare Bedingungen. Asien hat zwar 2007 die Vier-Milliarden-Marke überschritten, verfügt aber über 50 Prozent mehr Landmasse und im Ganzen über ein beträchtlich höheres Entwicklungsniveau. Allerdings sind auch in Asien riesige Landflächen gekennzeichnet durch verarmte Ackerböden, fallende Grundwasserspiegel, mangelnde Ernährungssicherheit und gesundheitsschädliche Luftverschmutzung.

Ein enormer Wandel steht Afrika mit der unkontrollierten Ausbreitung riesiger Städte bevor. Durch Landflucht und Slumbildung verstädtert der Kontinent rapide. Heute leben fast 500 Millionen Menschen in Ballungszentren; bis 2050 könnte diese Zahl nach UN-Schätzungen auf mehr als 1,3 Milliarden steigen. Die Demografen Jean-Pierre Guengant

Afrika treibt das globale Bevölkerungswachstum an

Wegen des rapiden Wachstums in Afrika mussten die Vereinten Nationen ihre Prognose der Weltbevölkerung für 2100 drastisch nach oben korrigieren: von 9,1 auf 11,2 Milliarden Menschen. Fast die gesamte Zunahme verursacht Afrika (orange), wo die Prognose für 2100 zwischen 3 und 6,1 Milliarden liegt. Obwohl der Mittelwert der Schätzungen für Asien (dicke rote Linie) mit 4,9 Milliarden etwas höher ist als die 4,4 Millionen für Afrika, wird die Bevölkerung in Asien insgesamt abnehmen, während sie in Afrika immer weiter zu wachsen droht.



vom französischen Institut de Recherche pour le Développement in Marseille und John May vom Population Reference Bureau in Washington sagen ein explosives Wachstum afrikanischer Großstädte voraus: In Lagos, der größten Stadt Nigerias, werde die Einwohnerzahl von 11 Millionen im Jahr 2010 auf 40 Millionen bis 2050 steigen, und in Kinshasa, der Hauptstadt der Demokratischen Republik Kongo, im gleichen Zeitraum von 8,4 auf 31 Millionen.

Eine Szene aus dem Film »Der Ewige Gärtner« von 2005 veranschaulicht diese Zukunft durch Kameraschwenks über das Kibera-Viertel der kenianischen Hauptstadt Nairobi. Mit einer halben bis einer Million Menschen – niemand kennt die wahre Zahl – ist Kibera der größte Slum des Kontinents. In jede Richtung erstrecken sich Wellblechhütten bis zum Horizont. Nach heutigen Prognosen werden bis 2050 Hunderte solcher Armutssiedlungen aus dem Boden schießen.

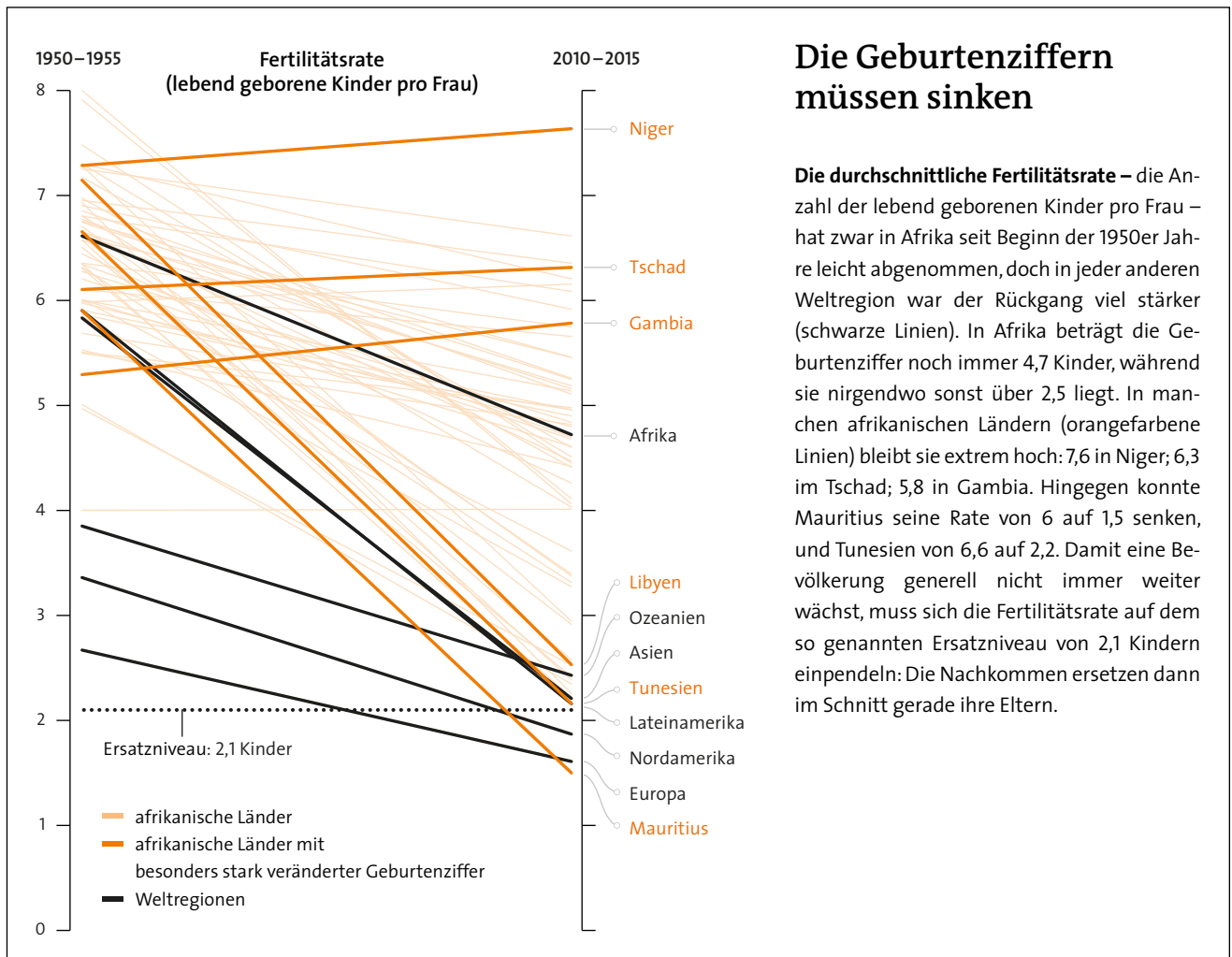
Die Aussicht auf einen überbevölkerten, zerstrittenen und verstädterten Kontinent gibt selbst den Staatsoberhäuptern zu denken, die traditionell große Familien befürworten. 2012 forderten die Präsidenten von Äthiopien und Ruanda mehr Familienplanung, »um Armut und Hunger zu reduzieren, natürliche Ressourcen zu schonen und den Folgen von Klimawandel und Umwelterstörung zu begegnen«. Die Kenianerin

Musimbi Kanyoro, Präsidentin des Global Fund for Women, verlangte kürzlich »zur Verlangsamung des Bevölkerungswachstums rechtmäßige, kulturell angepasste Maßnahmen, welche die Menschenwürde und eine umsichtige Entwicklung fördern«.

Derzeit verwenden nur 29 Prozent aller verheirateten Afrikanerinnen in gebärfähigem Alter moderne Verhütungsmittel; auf allen anderen Kontinenten übersteigt der Anteil durchweg 50 Prozent. Einen Übergang zu Wohlstand bis 2050 halten die Demografen Guengant und May nur dort für möglich, wo die Verhütungsrate 60 Prozent erreicht. Mehr als ein Drittel aller Schwangerschaften in Afrika sind unbeabsichtigt; in Schwarzafrika nutzen 58 Prozent der Frauen zwischen 15 und 49 Jahren, die sexuell aktiv sind und erklärtermaßen nicht schwanger werden wollen, keine modernen Verhütungsmethoden.

Erste Erfolge: Mauritius, Tunesien

An sich fördert Verstädterung den Trend zu kleineren Familien. In der Stadt kosten Kinder mehr Geld und tragen oft nichts zum Haushaltseinkommen bei, was die Eltern motiviert, sich für Familienplanung zu interessieren. Doch das allein reicht natürlich nicht. Wie Erfahrungen gerade in Afrika



TIERRY HABAUAT, GONZALEZ ANGELE, WORLD POPULATION PROSPECTS: THE 2016 REVISION, KEY FINDINGS AND ADVANCE TABLES, UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS, POPULATION DIVISION, 2016. (E.SA.UN.Org.DP.PPP.PUBLICATIONS.FILES.KEY_FINDINGS_2016.PDF)



JONATHAN TORCOVNIK / GETTY IMAGES REPORTAGE

Lokale Gesundheitsberater können alte Denkmuster besonders erfolgreich ändern. In Shompole (Kenia) erklärt eine Beraterin jungen Müttern vom Volk der Massai den Gebrauch von Kondomen (oben). In Laniar (Senegal) demonstriert eine Aktivistin, wie ein Intrauterinpressar funktioniert (rechts).

zeigen, müssen die Frauen mehr Kontrolle über ihr Leben und das ihrer Familie erlangen.

Im arabisch geprägten Norden Afrikas sowie in Südafrika und seinen Nachbarstaaten ist die Fruchtbarkeitsrate auf unter 3 zurückgegangen; sie hat dort quasi Weltdurchschnittsniveau erreicht. Doch im riesigen Bereich von Ost-, Zentral- und Westafrika liegen die Geburtenziffern zwischen 3 und 7 oder gar darüber. Die spärlichen Lichtblicke sind Resultat jahrelanger Arbeit.

Die niedrigsten Geburtenraten finden sich heute in einem halben Dutzend kleiner Inselstaaten. Auf der östlich von Madagaskar gelegenen Insel Mauritius überstieg die Fruchtbarkeitsziffer noch in den 1960er Jahren den Wert 6; heute beträgt sie 1,5 – vergleichbar mit Europa oder Japan. Am steilsten fiel die Familiengröße in den 1960er und frühen 1970er Jahren, obwohl die Wirtschaft stagnierte. Dafür genossen Frauen wie Männer auf Mauritius eine relativ gute Schulbildung, und Anfang der 1960er Jahre setzte die Regierung gegen zahlreiche Widerstände, vor allem von Katholiken und Muslimen, die Förderung der Familienplanung durch. Binnen zwei Jahrzehnten benutzten vier von fünf Frauen in gebärfähigem Alter Verhütungsmittel.

1957 verbesserte Tunesiens erster Präsident Habib Bourguiba den rechtlichen Status von Frauen und Müttern in ei-



JONATHAN TORCOVNIK / GETTY IMAGES REPORTAGE

nem für ein muslimisches Land kaum vorstellbaren Maß. Bourguiba gewährte den Frauen volle Bürgerrechte, einschließlich des Rechts, zur Wahl zu gehen und kein Kopftuch zu tragen. Er führte die allgemeine Schulpflicht ein, verbot die Vielweiberei, erhöhte das Heiratsalter für Mädchen auf 17 Jahre und gab Frauen das Recht zur Scheidung. Er legalisierte die Verhütung und subventionierte Abtreibungen für kinderreiche Frauen. Mitte der 1960er Jahre boten mobile Familienplanungskliniken im ganzen Land orale Verhütungsmittel an.

Bourguiba war gewiss kein Demokrat: Die von ihm streng kontrollierte Nationalversammlung wählte ihn 1975 zum Präsidenten auf Lebenszeit. Doch seine Sozialreformen blieben auch nach seiner Absetzung anno 1987 in Kraft. In Tunesien fiel die Geburtenziffer von vormals 7 Kindern auf nur noch 2 zu Beginn der 2000er Jahre; seitdem steigt sie allerdings wieder leicht an. Etwas weniger drastische präsidiale

Eingriffe haben auch in Kenia, Ghana und Südafrika die Ziffern gesenkt.

Wie diese Beispiele zeigen, liegt der Schlüssel zu kleineren Familien in der wirtschaftlichen Selbstständigkeit der Frau und ihrer rechtlichen Gleichstellung mit dem Mann. Bloßes Wachstum der Volkswirtschaft senkt die Geburtenziffer nicht nachhaltig.

Mehr Bildung schafft kleinere Familien

Wie lassen sich die Einzelerfolge auf ganz Afrika übertragen? Zunächst einmal: Nicht die Regierung, sondern die Frau hat das Recht, zu entscheiden, wie viele Kinder sie haben möchte. Eine von ihrer Regierung und den Mitmenschen als gleichberechtigt behandelte Frau legt eher selbst fest, ob und wann sie schwanger wird. Das hat automatisch kleinere Familien zur Folge.

Selbstständigkeit setzt vor allem Bildung voraus. In weiterführenden Schulen erfahren Mädchen und junge Frauen nicht nur etwas über Ernährung, Medizin und Impfung. Ihnen eröffnen sich ungeahnte wirtschaftliche, soziale, politische und künstlerische Entfaltungsmöglichkeiten. Je mehr sie über die Welt da draußen, ihren eigenen Körper und Möglichkeiten zur Gestaltung ihres eigenen Schicksals erfahren, desto stärker wächst ihr Wunsch nach einer kleineren Familie. Nach einer IIASA-Studie bekommen Afrikanerinnen, die nie zur Schule gegangen sind, im Durchschnitt 5,4 Kinder, Frauen mit Grundschulbildung hingegen 4,3. Der Abschluss einer weiterführenden Schule bringt einen Rückgang der Kinderzahl auf 2,7 – und Frauen mit Hochschulabschluss bekommen im Schnitt 2,2 Kinder.

Auch die Bildung der jungen Männer ist wichtig. Nach Absolvieren eines umfassenden Sexualkundeunterrichts vollziehen Mädchen und Jungen den ersten Geschlechtsverkehr später, wodurch es seltener zu frühen und ungewollten Schwangerschaften kommt. Im Gefolge der Aids-Pandemie verbreiteten sich Aufklärungsprogramme zumindest im südlichen und östlichen Afrika. Die Qualität solcher Programme schwankt aber stark, und in weiten Teilen des Kontinents fehlen sie ganz.

Sexualaufklärung und Schulbildung wirken jedoch auf Dauer nur, wenn Regierung und gesellschaftliche Umwelt die Familienplanung unterstützen. Selbst Akademikerinnen können schließlich ihre Verhütungsmittel nicht zu Hause fabrizieren.

Nach und nach sehen das immer mehr afrikanische Staatsoberhäupter ein. Ugandas Präsident Yoweri Museveni wollte lange nichts von Familienplanung wissen, doch im Juli 2014 veranstaltete er eine panafrikanische Konferenz zum Thema. In Kenia und Uganda ermöglicht ein staatliches Gutscheinsystem armen Frauen und Ehepaaren den Besuch von Familienplanungskliniken, und in Zimbabwe fördert die Regierung Familienplanung neben einer für Mutter und Kind kostenlosen Gesundheitsversorgung. In Malawi unterstützt ein Versuchsprogramm den regelmäßigen Schulbesuch, indem es für diesen Fall an die Mädchen oder ihre Erziehungs-

RONATHAN TOROGOVNIK / GETTY IMAGES REPORTAGE



Hausbesuche sind wichtig, um auch die Bewohner abgelegener Dörfer über Familienplanung zu informieren. Hier leistet eine Mitarbeiterin der William und Flora Hewlett Foundation im Dorf Mbale (Uganda) Aufklärungsarbeit.

berechtigten Bargeld auszahlt. Das Ergebnis: bessere Schulabschlüsse, spätere sexuelle Aktivität, höheres Heiratsalter – und weniger Teenagerschwangerschaften.

Die äthiopische Regierung rekrutierte kürzlich 38 000 Gesundheitshelfer, die nun von Dorf zu Dorf radeln und damit die ländlichen Gebiete erreichen, in denen 80 Prozent der Bevölkerung leben. Die Helfer bieten den Frauen – oder, falls der Mann mitmacht, den Paaren – Aufklärungsmaterial und Verhütungsmittel an. In den vergangenen drei Jahren sank dadurch die Fruchtbarkeitsziffer von 4,8 auf 4,1. Ähnlich eindrucksvolle Geburtenrückgänge erzielten manche Gemeinden Kenias und Ghanas und sogar die kongolesische Millionenstadt Kinshasa.

Doch vielerorts denken Afrikas Führungseliten nicht wirklich um. Die meist männlichen Staatschefs scheinen oft immer noch zu glauben, je mehr Kinder, desto besser; und Gleichberechtigung sei von Übel. »Die afrikanischen Präsidenten müssten einmal eine Familienplanungsklinik besuchen«, meint Demograf May. »Das würde ihre Einstellung ändern. Aber sie gehen lieber in die Impfkliniken.«

Die Gewalt der Männer

Im Leben einer Frau in Afrika hängt viel von ihrem Mann ab. Leider ist sie oft gezwungen, Familienplanung heimlich zu praktizieren, beispielsweise durch empfängnisverhütende Injektionen, weil der Mann die alleinige Entscheidung über die Kinderzahl beansprucht. Die Männer wünschen sich generell ein bis drei Kinder mehr als die Frauen – kein Wunder, wenn man bedenkt, wer schwanger wird, gebiert und sich hauptsächlich um die Kinder kümmern muss.

Solche Interessengegensätze äußern sich manchmal auf hässliche Weise. Einer Frau, die Verhütung anstrebt oder prak-

tiziert, droht Missbrauch durch ihren männlichen Partner. Gemäß einer nigerianischen Studie von 2011 berichten 30 Prozent aller verheirateten Frauen von sexueller, physischer oder emotionaler Gewalt in der Ehe. Besonders häufig tritt häusliche Gewalt dort auf, wo die Frauen Grundschulbildung besitzen und verhüten. Aber auch ohne physische Gewalt wird oft der Wunsch einer Frau nach weniger Geburten durchkreuzt, wenn etwa der Mann ihr untersagt, die Pille zu nehmen, und die örtliche Familienplanungsklinik keine brauchbare Alternative anbietet.

Die traditionelle Haltung ändert sich nur langsam. Doch viele Männer, die ich auf meinen Reisen durch Afrika interviewte, erzählten wehmütig von den Zeiten, als es weniger Menschen und mehr Wälder gab, und manchmal sahen sie in der Geburtenkontrolle ein Mittel gegen diese Entwicklung. Einige Gesprächspartner zollten Frauen kollegialen Respekt. »Die Frauen im Stadtrat sehen die Dinge anders, und sie äußern Ideen, auf die keiner von uns gekommen wäre«, meinte etwa ein männliches Ratsmitglied in Tansania. »Jetzt möchten wir sie nicht mehr verlieren.« Allmählich verbreitet sich dieses Umdenken. Tansania berät derzeit über einen Verfassungsentwurf, der den Frauen unter anderem gleiche Eigentums- und Erbrechte einräumt.

Frauen erobern sogar führende politische Positionen. Ruanda besitzt nun ein Gleichstellungsministerium sowie ein Parlament mit dem weltweit höchsten Frauenanteil: Fast zwei Drittel der Abgeordneten sind weiblich. Joyce Banda war von 2012 bis 2014 Präsidentin von Malawi, Ellen Johnson Sirleaf ist seit 2006 Präsidentin von Liberia. Als erste Frau weltweit leitete Ngozi Okonjo-Iweala in Nigeria sowohl das Außen- als auch das Finanzministerium, und die Südafrikanerin Nkosazana Dlamini Zuma ist Kommissionsvorsitzende der Afrikanischen Union. Solche Vorbilder machen afrikanischen Schulmädchen Mut, ihr eigenes Leben in die Hand zu nehmen.

Andererseits gibt es auch Beispiele für hartnäckige Stagnation. Der westafrikanische Staat Niger zählt zu den ärmsten Ländern der Welt. Die Fruchtbarkeitsziffer liegt bei bei 7,5 Kindern pro Frau und hat sich seit 1950, dem Beginn der Erhebungen, kaum verändert. In Umfragen sagen Frauen wie Männer, ihr Ideal wären noch größere Familien. Die riesige Kinderzahl hat vielfältige Ursachen, unter anderem religiöse Verhaltensregeln sowie die hohe Kindersterblichkeit.

Außerdem lebt die nigrische Bevölkerung zum großen Teil in ländlichen Gebieten mit schlechten Böden und bleibt auf die Mitarbeit der Kinder angewiesen. Für den Mann gilt eine Familie mit mehreren Frauen und vielen Kindern als Statussymbol, während die Frau ihren niedrigen Status nur durch große Fruchtbarkeit aufbessern kann. Wie der Demograf John Casterline von der Ohio State University in Columbus betont, übernimmt in der Regel die ganze Großfamilie die Kinderaufzucht – was es wiederum den Eltern erleichtert, noch mehr Kinder in die Welt zu setzen. Mamadou Tandja, der bis 2010 amtierende Präsident von Niger, illustrierte gern mit weit ausgebreiteten Armen, wie

riesig sein Land sei – größer als Texas – und dass darin noch Platz für viel mehr Menschen sei.

Anstöße geben, ohne Zwang auszuüben

Bevölkerungsexperte Guengant fordert eine mehrgleisige Strategie, die ein starkes Engagement der Regierung, die Beteiligung lokaler Behörden und finanzielle Unterstützung einschließt; doch oft halten die Regierungen ihre Versprechen nicht ein. 2012 erklärte ein hochrangiger Vertreter des ghanaischen Gesundheitsministeriums bei einer internationalen Konferenz in London, die staatliche Krankenversicherung werde die privaten Ausgaben für Familienplanung erstatten. Drei Jahre später berät die Regierung noch immer über die praktische Umsetzung. Dieses Versagen sei in Afrika fast die Regel, beklagt Guengant. »Es muss einen Anstoß geben, entweder von der Regierung oder aus der Gesellschaft heraus, oder beides. In Afrika fehlt der Anstoß.«

Damit ist keinesfalls staatlicher Zwang zur Geburtenkontrolle gemeint. Außer in China, wo auch die neue Zwei-Kind-Politik die Fortpflanzungsfreiheit noch immer einschränkt, fordert niemand eine scharfe Grenze der Familiengröße. Guengant wünscht sich aber Druck auf die Regierenden, damit sie mutig und öffentlich für ein langsames Bevölkerungswachstum eintreten.

Kulturelle Einstellungen sind veränderbar – oft sogar sehr schnell, wie der Geburtenrückgang in Tunesien und Mauritius beweist. Das Ziel ist klar: Alle Frauen müssen die soziale Unterstützung und die Mittel zur Vermeidung unerwünschter Schwangerschaften bekommen, ohne Druck oder Zwang. Das ist der einzige gangbare und ethisch vertretbare Weg, um auch in Afrika eines Tages das Bevölkerungswachstum zu stoppen und den Menschen ein Leben in Wohlstand und Einklang mit der Umwelt zu ermöglichen. ~

DER AUTOR



Robert Engelman leitet am Worldwatch Institute in Washington die Erforschung des Zusammenhangs zwischen Familienplanung und ökologischer Nachhaltigkeit. Er schreibt seit vielen Jahren für US-Zeitungen über Gesundheitsfragen, Naturwissenschaft und Umwelt und ist Autor des Buchs »More: Population, Nature, and What Women Want«, Island Press, Washington 2008.

QUELLEN

Casterline, J. B. und El-Zeini, L. O.: Unmet Need and Fertility Decline: A Comparative Perspective on Prospects in Sub-Saharan Africa. In: *Studies in Family Planning* 45, S. 227–245, 2014
Guengant, J.-P. und May, J. F.: African Demography. In: *Global Journal of Emerging Market Economies* 5, S. 215–267, 2013
Sippel, L. et al.: Africa's Demographic Challenges: How a Young Population Can Make Development Possible. Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung, 2011. Online unter www.berlin-institut.org/fileadmin/user_upload/Afrika/Africas_demographic_challenges.pdf

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408643

Die Batterie der Zukunft

Der Ausbau von Wind- und Solarkraftwerken birgt ein ungelöstes Problem: Wie lässt sich der unregelmäßig erzeugte Strom effizient zwischenspeichern? Redox-Flow-Akkus könnten die Antwort geben.

Von Neil Savage

Wenn es nach der Firma Avista Utilities in Pullman im US-Bundesstaat Washington geht, wurde Anfang 2015 die Tür zur Energiespeicherung der Zukunft aufgestoßen. Damals nahm das Unternehmen den neuesten Typ von Redox-Flow-Akku in der größten solchen Anlage der westlichen Welt in Betrieb. Wiederaufladbare Flussbatterien, wie die Geräte auch heißen, speichern Energie in flüssigkeitsgefüllten Tanks. Und es sieht so aus, als könnten sie das preiswerter erledigen als herkömmliche Akkus. Außerdem passen sie besser zu Stromnetzen, die zunehmend von schwankenden Energiequellen wie Solar- und Windkraft gespeist werden.

Die Anlage in Pullman besteht aus großen weißen Tanks im Gesamtvolumen von zwei Sattelschleppern und speichert vier Megawattstunden an Energie – genug, um vier Durchschnittshaushalte einen Monat lang mit Elektrizität zu versorgen. Zwar trägt die Installation nur einen kleinen Teil zur Kapazität des angeschlossenen Stromnetzes bei. Dennoch ist sie als neue, zukunftssträchtige Generation von Energiespeichersystemen von großer Bedeutung.

Da Wind- und Solarkraft immer mehr zur Stromversorgung der Welt beitragen, braucht es effiziente Wege, diesen unregelmäßig anfallenden Strom zwischenspeichern. Herkömmliche Systeme wie Lithiumionen- oder Bleiakkus

bieten dafür nicht die nötige Kombination aus hoher Kapazität und raschem Zugriff. So ist eine Autobatterie schnell erschöpft, wenn der Fahrer an einem kalten Morgen wiederholt den Anlasser betätigt. Und das Laden eines Elektroautos dauert mehrere Stunden.

Redox-Flow-Akkus stellen eine viel versprechende Alternative dar. Sie können große Energiemengen über lange Zeit verlustfrei speichern und bei Bedarf rasch wieder abgeben. Da die Energie in einer Flüssigkeit und nicht in einem Festkörper steckt, sind sie zudem sicherer als konventionelle Systeme. Und weil die Flüssigkeit in externen Tanks aufbewahrt wird, lässt sich die Speicherkapazität bei Bedarf problemlos erhöhen. Vor allem aber dürften Redox-Flow-Akkus über ihre Laufzeit gerechnet wesentlich preiswerter sein als traditionelle Batterien, wenn Forscher erst einmal die optimale Kombination von Chemikalien aufgefunden haben.

Letztlich handelt es sich um eine spezielle Art von Brennstoffzellen, die aus zwei Tanks bestehen. Jeder enthält ein energiereiches Material – in Form einer Metallverbindung oder eines Polymers –, das in einer Flüssigkeit gelöst ist. Der eine Tank bildet den negativen und der andere den positiven Pol der Batterie. Beim Laden und Entladen werden die Flüssigkeiten durch eine Vorrichtung gepumpt, die aus Elektroden und einer Membran dazwischen besteht. Letztere verhindert, dass sich die Lösungen vermischen, erlaubt aber den Übertritt von Ionen. Dabei findet eine so genannte Redoxreaktion statt – eine Kombination aus Oxidation und Reduktion –, in deren Verlauf Elektronen über einen externen Stromkreis von einem Tank zum anderen fließen.

Die Standardvariante des Redox-Fluss-Akkus arbeitet mit Salzen des Übergangsmetalls Vanadium (V), die in einer Säure gelöst sind. Beim Entladen werden an der negativen Elektrode zweifach positiv geladene Vanadiumionen (V^{2+}) zu dreifach positiv geladenen oxidiert (V^{3+}). Die dabei abgegebenen Elektronen wandern durch den externen Stromkreis, wo sie das jeweils angeschlossene elektrische Gerät mit Strom versorgen, zur positiven Elektrode. Dort gehen sie auf eine andere Art von Vanadiumionen über, die formal fünfmal positiv geladen sind (V^{5+}), und reduzieren diese zu viermal positivem V^{4+} . Beim Laden des Akkus kehren sich die beschriebenen Vorgänge um.

AUF EINEN BLICK

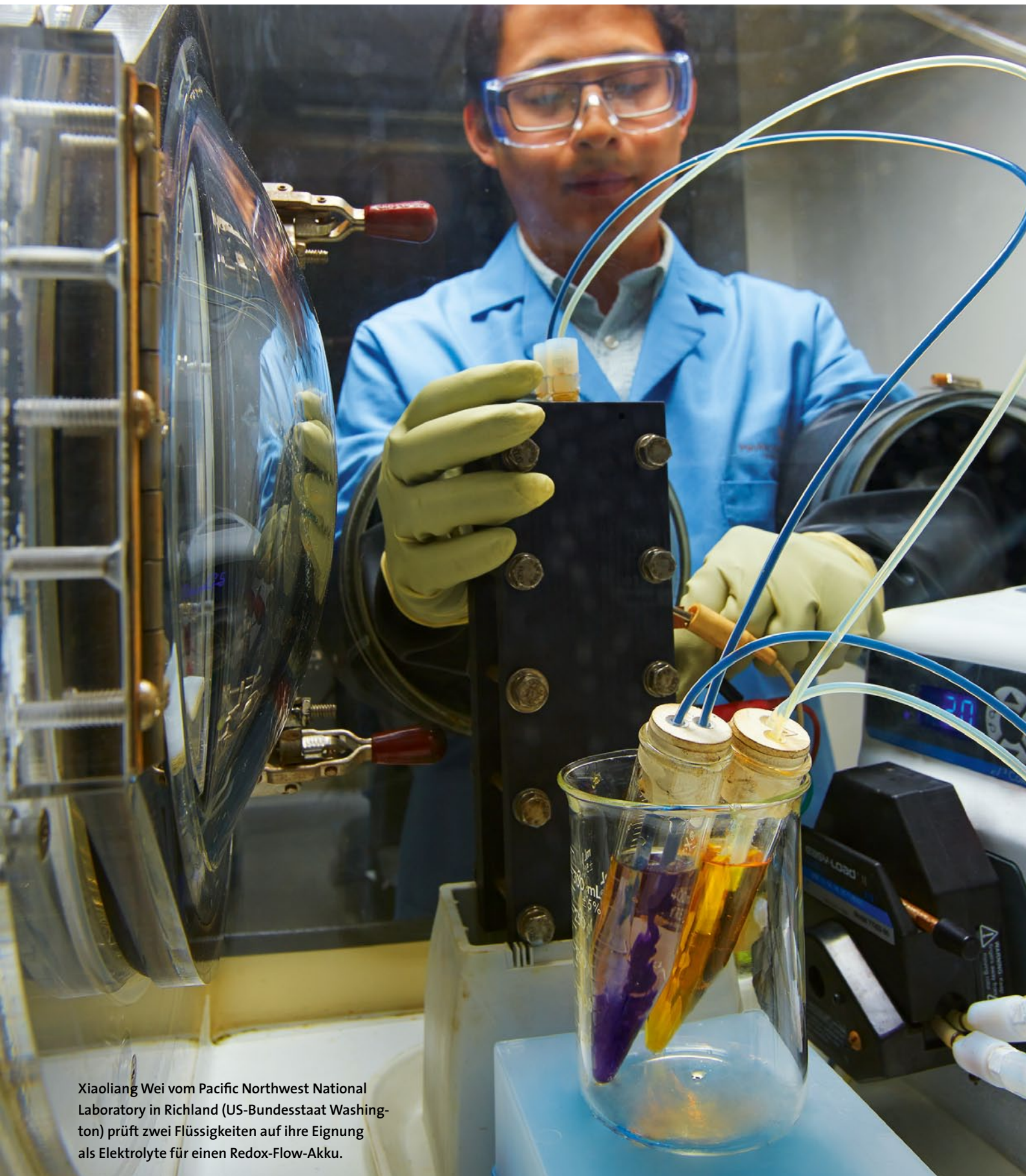
FLEXIBLE STROMPUFFER

1 Herkömmliche Lithiumionen- oder Bleiakkus haben nicht die nötige Kapazität und Leistung, um als Zwischenspeicher **Schwankungen im Stromangebot** regenerativer Energiequellen wirksam auszugleichen.

2 **Redox-Flow-Akkus** stellen eine viel versprechende Alternative dar. Sie können große Mengen an Elektrizität in Form energiereicher Lösungen über lange Zeit verlustfrei speichern und bei Bedarf rasch wieder zur Verfügung stellen.

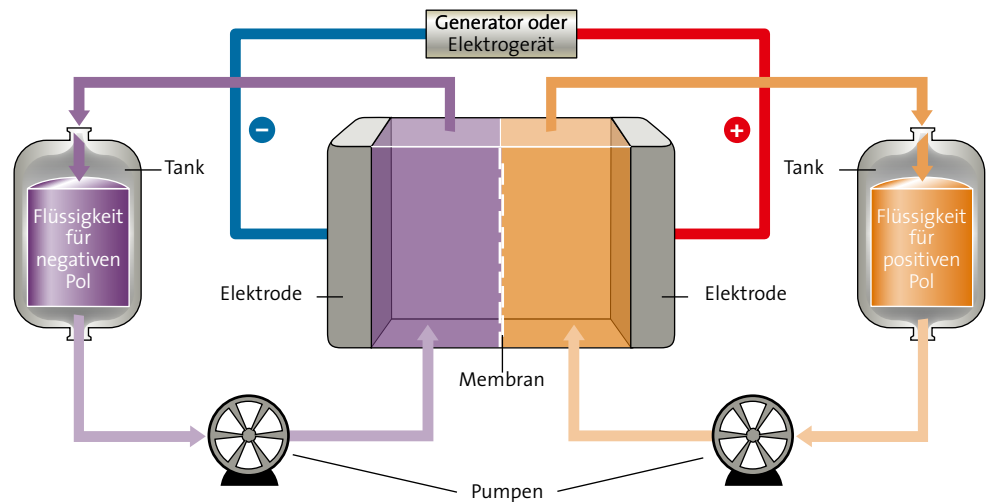
3 Außerdem sind sie **sicherer** als herkömmliche Batterien – und mit den richtigen Chemikalien, nach denen Forscher allerdings noch suchen, wohl auch **preiswerter**.

4 Auch als Batterien für **Elektroautos** böten Redox-Flow-Akkus Vorteile.



Xiaoliang Wei vom Pacific Northwest National Laboratory in Richland (US-Bundesstaat Washington) prüft zwei Flüssigkeiten auf ihre Eignung als Elektrolyte für einen Redox-Flow-Akku.

Die beiden Pole eines Redox-Flow-Akkus bestehen aus flüssigkeitsgefüllten Tanks. Die Flüssigkeiten werden, getrennt durch eine für Ionen durchlässige Membran, an Elektroden vorbeigepumpt. Dort gehen die enthaltenen Moleküle Reaktionen ein, bei denen sie Elektronen abgeben oder aufnehmen, die durch einen äußeren Stromkreis fließen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSSE-CORP/AMCH-LIQUID-ASSETS, IN: NATURE 526, S. 598-599, 2015

Dieser Aufbau bietet einige grundlegende Vorteile. So sind anders als bei herkömmlichen Akkus Energiemenge und Leistung nicht gekoppelt. Wie viel Energie gespeichert ist, hängt vom Volumen des Tanks ab. Über die Leistung bestimmt dagegen die Elektrodenfläche. »Wenn Sie mehr Speicherkapazität haben wollen, nehmen Sie einfach einen weiteren Tank und befüllen ihn mit den Chemikalien«, erklärt Adam Weber, Chemieingenieur am Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien. Höhere Leistung lässt sich dagegen mit großflächigeren Elektroden erreichen – oder indem man eine größere Zahl davon hintereinanderschaltet.

Die beiden Lösungen, fachsprachlich Elektrolyte genannt, separat aufzubewahren ist außerdem sicherer. Herkömmliche Batterien speichern eine Menge Energie auf kleinem Raum, die unvermutet freigesetzt werden kann. Bei Flussbatterien besteht kein solches Risiko. Zudem arbeiten die meisten mit wässrigen Lösungen, die nicht entflammbar sind – im Gegensatz etwa zu Lithiumionenakkus, die schon Handys oder sogar Flugzeuge in Brand gesetzt haben.

Ein anderes Problem mit herkömmlichen Batterien ist, dass die Elektroden sich ausdehnen oder schrumpfen, während sie Ionen aufnehmen beziehungsweise abgeben. Das führt mit der Zeit zu Materialermüdung und schlimmstenfalls zum Bruch des Gehäuses. Bei Flüssigkeiten passiert so etwas nicht, weshalb Flussbatterien unbegrenzt haltbar sind.

Attraktive Option für das Elektroauto

Zwar entwickeln die meisten Forscher Redox-Flow-Akkus für die Energiespeicherung in Stromnetzen. Doch gibt es auch Überlegungen, sie in Elektroautos einzusetzen. Weil sie sich einfach durch den Austausch der Lösungen aufladen lassen, muss man den Wagen nicht stundenlang an eine Stromquelle anschließen, damit er wieder fahrbereit ist. »Die Reichweite spielt keine so große Rolle mehr, sofern ein dichtes Netz von Nachfüllstationen existiert«, meint Carlo Segre vom Illinois Institute of Technology in Chicago. Die staatliche amerikanische Advanced Research Projects Agency – Energy (ARPA-E) hat dem Physiker Forschungsmittel bewil-

ligt, um eine Flussbatterie mit 800 Kilometer Reichweite für Autos zu entwickeln – deutlich mehr als die 640 Kilometer, die der Roadster von Tesla Motors nach Angaben der Firma fahren kann, bis sein Feststoffakku wieder aufgeladen werden muss. Segre verwendet für seine Batterie Nanoteilchen aus Nickel und Nickelhydroxid in einem Elektrolyten auf Kaliumbasis.

Die günstigsten chemischen Komponenten zu finden und sie geeignet zu kombinieren, um eine hohe Speicherkapazität, eine lange Lebensdauer sowie gute Werte für Stromstärke und Spannung bei niedrigen Kosten zu erreichen: Das ist die große Herausforderung beim Entwurf praxistauglicher Flussbatterien. Der Akku von Pullman sowie fünf andere Systeme mit noch höherer Leistung, von denen zwei in China und drei in Japan installiert sind, verwenden allesamt in Schwefelsäure gelöstes Vanadium. Allerdings kann die Säure nicht beliebig viele Metallionen aufnehmen, was die Speicherkapazität pro Volumeneinheit begrenzt. Zudem funktioniert die Batterie nur im Temperaturbereich zwischen 10 und 40 Grad Celsius. Darüber oder darunter fällt das Vanadium als Pulver oder Gel aus. »Diese Niederschläge würden die Pumpen verstopfen, und der Akku wäre tot«, sagt Wei Wang, Materialforscher am Pacific Northwest National Laboratory in Richland (US-Bundesstaat Washington). Sein Team hat herausgefunden, dass eine Mischung aus Schwefel- und Salzsäure Temperaturen zwischen –5 und 60 Grad Celsius verträgt und überdies 70 Prozent mehr Vanadium aufnimmt als herkömmliche Lösungen. Der Akku von Pullman nutzt diesen neuartigen Elektrolyten.

Dennoch hat Vanadium einen großen Nachteil: Es ist selten und teuer. Nach einer Schätzung des amerikanischen Energy Power Research Institute (EPRI) liegen die Kosten für einen Redox-Flow-Akku auf Vanadiumbasis bei über 3000 US-Dollar pro Kilowatt. Kalifornien mit solchen Batterien zu der bis 2020 angestrebten Speicherkapazität von 1,3 Gigawatt zu verhelfen, würde demnach Investitionen von rund vier Milliarden Dollar erfordern. Auf der Suche nach preiswerteren Alternativen forscht Wang über Zink-Brom-Batterien. Zink ist wesentlich billiger als Vanadium und kann pro Atom gleich zwei Elektronen aufnehmen oder abgeben statt

nur einem. Wang verwendet es als Feststoff, so dass eine Hälfte seiner Batterie nicht aus einer Lösung besteht. Dennoch erlaube seine Hybridflussbatterie, wie er beteuert, mehr Flexibilität als herkömmliche Systeme und besteche durch ihre geringen Kosten und hohe Leistung.

Weber arbeitet ebenfalls mit Brom, ersetzt das Zink aber durch ein Gas, nämlich Wasserstoff. Dieser wird beim Entladen an der negativen Elektrode unter Abgabe eines Elektrons zum einfach positiv geladenen Ion oxidiert, das sich nach dem Passieren der Membran mit Bromidionen verbindet, die an der positiven Elektrode bei der Reduktion des flüssigen Broms entstanden sind. Dieses System zählt zu den Redox-Flow-Akkus mit der höchsten unter Laborbedingungen erzielbaren Energiedichte. Und weil Wasserstoff billig ist, hat es auch bei den Kosten die Nase vorn.

»Flüssiger Draht« aus Kohlenstoffnanopartikeln

Lithium ist als Bestandteil herkömmlicher Batterien zwar der schärfste Konkurrent der Redox-Flow-Akkus, könnte bei diesen aber ebenfalls eine Rolle spielen. So entwickelt der Materialforscher Yet-Ming Chiang vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge eine Flussbatterie auf der Basis von Lithium und Schwefel. Die beiden Elemente wurden früher schon als Bestandteile herkömmlicher Akkus erprobt. Doch der Schwefel neigt dazu, kettenförmige, negativ geladene Polysulfide zu bilden, die zur Elektrode wandern, wo sie sich ansammeln und den Stromfluss unterbinden.

Was schlecht für konventionelle Batterien ist, könnte sich bei Redox-Flow-Akkus indes als vorteilhaft erweisen. Chiang nutzt Schwefel als Anode. Beim Entladen reagieren Lithiumionen, die von der Kathode kommen, mit ihm zu Polysulfiden. Diese lösen sich im Elektrolyten. Beim Laden der Batterie werden sie dann wieder zu Schwefel oxidiert, der ausfällt und die positive Elektrode zurückbildet.

Weil Schwefel im Überfluss vorhanden ist, sollte ein solcher Redox-Flow-Akku ausgesprochen preiswert sein. »Das Schöne ist, dass Schwefel praktisch nichts kostet«, freut sich Chiang. Als weitere Neuerung hat er den Stromabnehmer abgewandelt – normalerweise ein stationäres Netz aus Kohlefasern, das leicht verstopft, wenn die Elektrolyte hindurchströmen. Chiang ersetzt es durch ein Gel aus Kohlenstoffnanopartikeln, das sich mit der Lösung mitbewegt und so als eine Art flüssiger Draht fungiert, der die Elektronen aufnimmt und weiterleitet. Außer dem Vorteil, nicht zu verstopfen, bietet es auch eine größere Oberfläche für den Übertritt der Ladungen aus der chemischen Reaktion. Zudem verkürzt sich die Strecke, welche die Moleküle zurücklegen müssen, um Elektronen abzugeben oder aufzunehmen.

Eine andere kostengünstige Option eröffnen möglicherweise organische Materialien. »Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff werden uns nie ausgehen«, meint Michael Aziz, Werkstoffkundler an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts). Angeregt durch die Fotosynthese der Pflanzen, beschäftigt er sich mit Chinonen: einer Klasse organischer Verbindungen, die bei der Verwertung von Sonnenlicht

für die Synthese von Zucker in Blättern eine zentrale Rolle spielt. Vor zwei Jahren stellte er eine metallfreie Flussbatterie vor, die auf der einen Seite aus Brom bestand und auf der anderen aus Anthrachinon-2,6-disulfonat (AQDS) – einem Molekül, das unter anderem im Rhabarber vorkommt. Seither hat er weitere Chinone erprobt, um eines zu finden, das nicht nur gut funktioniert, sondern auch preiswert herzustellen ist. »Die Kosten zu senken ist ein zentraler Punkt, und es auf umweltfreundliche Weise zu tun, macht die Sache noch besser. Ich denke, wir haben eine reelle Chance, beides zu schaffen«, sagt Aziz. Doch in der organischen Chemie lauern auch Fallstricke. So können organische Moleküle eine Vielzahl an Reaktionen eingehen, darunter solche, die unlösliche Teilchen ergeben, was Gift für die Batterie wäre.

Kurzfristig dürften laut Chiang erst einmal größtenteils herkömmliche Lithiumbatterien zum Zwischenspeichern von Elektrizität für die Stromnetze dienen. Aber mehrere Typen von Redox-Flow-Akkus könnten ihnen durch eine attraktive Kombination aus Effizienz, Sicherheit und niedrigem Preis zunehmend Konkurrenz machen. Wenn es Segre oder anderen gelingt, praktikable Flussbatterien für Elektroautos zu entwickeln, sollten sich solche Systeme auch im Straßenverkehr durchsetzen, weil sie sich analog zum Tanken durch einfaches Nachfüllen aufladen lassen. Obwohl Forscher immer noch auf der Suche nach der optimalen Chemie und dem günstigsten Aufbau von Flussbatterien sind, ist Aziz optimistisch. »In zwei Jahren werden wir etwas haben, das an der Schwelle zum industriellen Einsatz steht«, beteuert er. »Ich denke, das wird die nächste ganz große Sache.« ~

DER AUTOR



Neil Savage ist Wissenschaftsjournalist in Lowell (Massachusetts).

QUELLEN

- Cho, K. T. et al.:** High Performance Hydrogen/Bromine Redox Flow Battery for Grid-Scale Energy Storage. In: Journal of the Electrochemical Society 159, S. A1806–A1815, 2012
- Dunn, B. et al.:** Electrical Energy Storage for the Grid: a Battery of Choices. In: Science 334, S. 928–935, 2011
- Fan, F. Y. et al.:** Polysulfide Flow Batteries Enabled by Percolating Nanoscale Conductor Networks. In: Nano Letters 14, S. 2210–2218, 2014
- Huskinson, B. et al.:** A Metal-Free Organic–Inorganic Aqueous Flow Battery. In: Nature 505, S. 195–198, 2014
- Li, L. et al.:** A Stable Vanadium Redox-Flow Battery with High Energy Density for Large-Scale Energy Storage. In: Advanced Energy Materials 1, S. 394–400, 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1408644

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 526, S. 598–599, 29.10.2015

Alice und Bob im Geheimraum

Kann man mit Zahlen rechnen, die man nur in verschlüsselter Form zu sehen bekommt?

Ja – aber noch ist es äußerst mühsam.

VON BRIAN HAYES

Alice gibt Bob einen verschlossenen Koffer und bittet ihn, das Geld darin zu zählen. »Kein Problem«, sagt Bob. »Gib mir den Schlüssel.« Alice schüttelt den Kopf; sie kennt Bob zwar schon seit vielen Jahren, aber sie vertraut einfach niemandem. Bob hebt den Koffer an, um sein Gewicht abzuschätzen, schüttelt ihn und hört es rascheln – aber das bringt es nicht wirklich. »Geht nicht«, sagt er. »Was ich nicht sehe, kann ich nicht zählen.«

Die Kryptografen kennen Alice und Bob schon seit vielen Jahren. Immer wenn es darum geht, vertrauliche Informationen auszutauschen, müssen sie als beispielhafte Kommunikationspartner herhalten. Echte Koffer mit echtem Geld sind normalerweise nicht ihr Ding. Deswegen geht die Geschichte auch eigentlich ein bisschen anders: Alice gibt Bob eine sicher verschlüsselte Liste mit Zahlen und bittet ihn, sie zu addieren. Aber in eine chiffrierte Datei kann man ebenso wenig hineinschauen wie in einen verschlossenen Koffer. »Geht nicht«, sagt Bob.

Aber diesmal irrt er sich. Weil Alice eine sehr spezielle Art der Verschlüsselung gewählt hat, kann Bob ihren Auftrag nämlich doch ausführen: mit Daten zu rechnen, die er nicht anschauen kann. Die Zahlen in der Datei bleiben die ganze Zeit verschlüsselt, und Bob erfährt auch nichts über sie. Trotzdem kann er Computerprogramme auf die verschlüsselten Daten anwenden, sie zum Beispiel addieren. Die Ausgabe des Programms ist dann ebenfalls verschlüsselt, Bob kann also auch sie nicht lesen. Erst Alice wendet ihren Dekodierungsschlüssel auf das Ergebnis an und erhält die Summe im Klartext.

Die für diesen Zaubertrick benutzte Technik heißt »fully homomorphic en-

ryption« (FHE), was als »total homomorphe Verschlüsselung« zu übersetzen wäre. Die Idee ist nicht ganz neu, galt aber lange Jahre als praktisch unrealisierbar. Das änderte sich 2009, als Craig Gentry, damals Doktorand an der Stanford University und heute bei IBM Research, eine bahnbrechende Entdeckung machte. Seitdem gab es in rascher Folge Verfeinerungen und neue Ideen.

Inzwischen ist nachgewiesen, dass die homomorphe Verschlüsselung prinzipiell funktioniert, aber für die Praxis sind die gegenwärtigen Verfahren noch viel zu langsam. Sollte sich das jedoch ändern, dann würden die Anwender alsbald Schlange stehen. Viele Organisationen würden ihre Rechenaufgaben lieber an externe Dienstleister delegieren, statt selbst stets die aktuelle Hard- und Software anzuschaffen. Das läuft darauf hinaus, die eigenen, höchst vertraulichen Daten in die »Cloud« zu geben – einen undurchdringlichen Verbund von Rechnern, von denen man nicht weiß, wer auf die dort verarbeiteten Daten Zugriff hat. Eine praktikable homomorphe Verschlüsselung würde die naheliegenden Bedenken ausräumen, indem sie die Daten vor Lauschern, Hackern und sogar vor den Betreibern des Cloud-Dienstes schützt.

In der romantischen Frühzeit ihrer Beziehung hatten Alice und Bob keinerlei Geheimnisse voreinander, sondern wollten sie nur vor dem Rest der Welt schützen. Ihnen ging es darum, über einen öffentlichen Kanal zu kommunizieren, ohne dass ein Lauscher ihre Daten abhören oder gar verfälschen kann. Zu diesem Zweck entwarfen die Frischverliebten eine ganze Reihe kryptografischer Verfahren. Bevor Alice eine Nachricht an Bob abschickte, verwandelte sie mit einem Geheim-

kode (dem »Schlüssel«) den Klartext in Chiffretext. Selbst wenn Eve – so heißt traditionell die Lauscherin – die Nachricht abfangen konnte, konnte sie nichts damit anfangen. Bob dagegen hatte den Schlüssel und konnte damit den ursprünglichen Text wiederherstellen.

Symmetrische und asymmetrische Schlüssel

Bei den gebräuchlichsten Verschlüsselungssystemen dient, wie bei einem gewöhnlichen Schloss, derselbe Schlüssel zum Auf- wie zum Zuschließen, also zum Ver- und zum Entschlüsseln. In diesem Fall stehen Alice und Bob allerdings vor dem heiklen Problem, sich über diesen Schlüssel zu verständigen, ohne dass er dabei Eve in die Hände fällt. Abhilfe schafft eine besonders raffinierte Methode, die asymmetrische Kryptografie oder Kryptografie mit veröffentlichtem Schlüssel (public-key cryptography). Jeder Schlüssel besteht aus zwei Teilen, einem veröffentlichten zum Zuschließen und einem privaten zum Aufschließen. Durch geschickte Kombination zweier solcher Schlüsselpaare können Alice und Bob sich sogar unter Eves Augen einen gewöhnlichen symmetrischen Schlüssel zulegen, den außer ihnen niemand kennt, und diesen für ihre vertrauliche Kommunikation nutzen.

Ein anderes Verfahren, das Alices und Bobs Liebesbriefe vor der Boulevardpresse abschirmt, ist die probabilistische Kryptografie, die Shafi Goldwasser und Silvio Micali, beide am MIT, zu Beginn der 1980er Jahre entwickelten. Alle früheren Systeme sind deterministisch: Aus dem gleichen Klartext wird stets der gleiche Chiffretext. Diese Verlässlichkeit macht die asymmetrische Kryptografie angreifbar. Eve könnte nämlich versuchen, den Inhalt einer

viel komplizierter aus, ist aber in der Praxis sogar bequemer, wenn man die Anwendung des Logarithmus und seiner Umkehrfunktion durch Nachschlagen in einer Tabelle ersetzt und die dabei auftretenden Rundungsfehler in Kauf nimmt. In der Tat haben Anwender aller Art das Multiplizieren mit der Logarithmentabelle oder deren mechanischem Äquivalent, dem Rechenschieber, erledigt, bevor der Taschenrechner derlei Hilfsmittel erübrigte.

Multiplikation neu definieren

Die homomorphe Kryptografie bietet ein ähnliches Paar von Wegen an. Entweder rechnen wir mit den unverschlüsselten Eingabedaten x und y . Oder wir verwandeln x und y durch Verschlüsseln in Chiffretext, wenden darauf geeignete Rechenoperationen an und entschlüsseln das Ergebnis; am Ende kommt dasselbe heraus. Die beiden Rechenwege verlaufen gewissermaßen in parallelen Universen. Diese sollen im Folgenden Klarraum und Geheimraum heißen.

Rechnen im Klarraum kennt jeder. Wenn eine Zahl computerüblich im Zweiersystem (Binärsystem) als Folge von Nullen und Einsen (Bits) dargestellt wird, dann bestehen Addition und Multiplikation aus einer Folge logischer Verknüpfungen; und mehr brauchen wir nicht. Alle anderen Rechenoperationen lassen sich aus Addition und Multiplikation zusammensetzen.

Die Mathematik im Geheimraum sieht dagegen völlig anders aus. Bei der Verschlüsselung werden nämlich die Bits einer Zahl gründlich durcheinandergewirbelt, während die klassischen Additions- und Multiplikationsverfahren nur dann die richtigen Ergebnisse liefern, wenn jedes Bit an der richtigen Stelle steht. Auf den ersten Blick erscheint es daher unmöglich, eine Operation im Geheimraum zu finden, die der gewöhnlichen Addition im Klarraum homomorph ist. Aber es geht.

Das möge zunächst ein extrem einfaches Beispiel demonstrieren. Der Klartext besteht aus ganzen Zahlen, und die Verschlüsselung ist schlicht die Verdopplung; zum Entschlüsseln muss

man also einfach durch 2 teilen. Die Addition im Geheimraum ist dieselbe wie im Klarraum. Addiert man nämlich die Chiffretexte $2x$ und $2y$, kommt $2x + 2y = 2(x + y)$ heraus; das entschlüsselt, also durch 2 geteilt, ist $x + y$, wie es sein soll.

Die Multiplikation ist allerdings etwas komplizierter. Wenn man einfach die Chiffretexte $2x$ und $2y$ auf die gewöhnliche Weise miteinander malnimmt, kommt $4xy$ heraus. Die Entschlüsselung (Division durch 2) ergäbe $2xy$ statt xy . Also müssen wir die Multiplikation zweier Zahlen a und b im Geheimraum definieren als $a * b = a \cdot b / 2$, wobei der Punkt die gewöhnliche Multiplikation bezeichnet.

Offensichtlich haben wir diese Definition so hingedreht, dass das gewünschte Ergebnis herauskommt. Das mag wie Schummelei wirken, kann aber die Mathematiker nur mäßig beeindrucken. Die sind noch viel willkürlicher erscheinende Definitionen der Multiplikation gewohnt, zum Beispiel für komplexe Zahlen und Matrizen.

Verschlüsseln durch Verdoppeln ist also ohne jeden Zweifel homomorph, aber leider zur Geheimhaltung völlig ungeeignet. Schließlich müsste Bob die Chiffredaten nur durch 2 teilen, um an die Klardaten zu kommen. Es hilft auch nichts, wenn man zum Verschlüsseln statt mit 2 mit einer beliebig komplizierten Zahl m multipliziert und m geheim hält. Denn dann wäre die Multi-

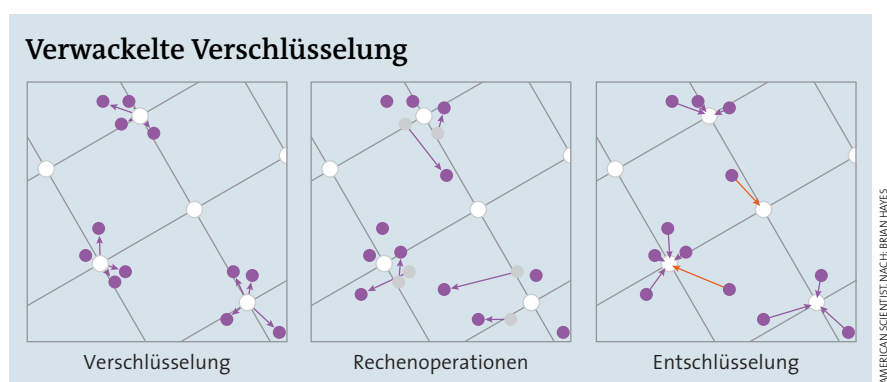
plikation im Geheimraum als $a * b = a \cdot b / m$ zu definieren. Also steht das m in dem Programm, das auf Bobs Computer läuft, und dort kann er es leicht ablesen.

Ein total homomorphes Verschlüsselungssystem, das einem derartigen Angriff standhält, ist sehr viel schwieriger zu entwerfen. Genau das gelang Gentry 2009 – im Prinzip. Nun gilt es, die Idee in ein praktikables Verfahren umzusetzen, was noch nicht gelungen ist.

Die erste Idee, mit verschlüsselten Daten zu rechnen, hatten 1978 Ronald L. Rivest, Leonard Adleman und Michael L. Dertouzos, alle damals am MIT. Nur wenige Monate vorher hatten Rivest und Adleman gemeinsam mit Adi Shamir die erste Realisierung eines asymmetrischen Verschlüsselungssystems vorgestellt, das unter ihren Initialen als RSA bekannt wurde. Übrigens hatten in dem entsprechenden Artikel Alice und Bob ihren ersten Auftritt als prominente Kommunikationspartner.

Das RSA-Schema in seiner Urform ist nur »teilweise homomorph«: Es gibt zwar eine Multiplikation verschlüsselter Daten, aber keine Addition. Darauf wiesen Rivest, Adleman und Dertouzos schon damals hin und nannten auch einige andere Möglichkeiten, zumindest partielle Homomorphismen zu konstruieren, die man geheim halten kann.

In den folgenden 30 Jahren gab es gewisse Fortschritte. So entwarfen Dan



Bei einem probabilistischen Kryptosystem werden die verschlüsselten Daten – hier als weiße Punkte eines regelmäßigen Gitters in einem abstrakten Raum dargestellt – durch kleine zufällige Abweichungen geringfügig verfälscht (violette Punkte). Beim Entschlüsseln ziehen die Gitterpunkte wie kleine Magneten die »Abweichler« auf den richtigen Platz zurück. Jede Rechenoperation wirkt im Prinzip fehlerverstärkend. Dadurch kann ein Punkt in den Anziehungsbereich des falschen Magneten geraten (rote Pfeile).

Boneh, Eu-Jin Goh und Kobbi Nissim ein homomorphes System, mit dem man im Geheimraum eine unbegrenzte Zahl von Additionen und anschließend eine einzige Multiplikation ausführen kann. Als Bonehs Doktorand Gentry 2009 sein völlig homomorphes Schemas präsentierte, war das trotzdem eine große Überraschung.

Verrauschte Arithmetik

Im Kontext von Gentrys Verfahren heißt die Verschlüsselungsfunktion, die Klartext in Chiffretext verwandelt, *encrypt*, und die umgekehrte Funktion, die den Klartext aus dem Geheimtext wiederherstellt, *decrypt*. Außerdem arbeitet Gentry mit einer dritten Funktion namens *evaluate* (»auswerten«); sie beschreibt die Ausführung einer Rechenoperation im Geheimraum, aber nicht wie üblich als ein der Reihe nach abzuarbeitendes Programm, sondern in Form einer Schaltung oder eines Netzwerks. Dabei durchlaufen die Daten eine Abfolge logischer Schaltelemente (»Gatter«). Üblicherweise vollführt ein Gatter eine der elementaren logischen Operationen AND, OR und NOT; es darf aber auch eine Addition oder Multiplikation sein.

Im Effekt ist die Funktion *evaluate* nichts weniger als ein kompletter Computer, der in das Verschlüsselungssystem eingebettet ist. Im Prinzip müsste er jede berechenbare Funktion auch berechnen können – vorausgesetzt, das Netz der logischen Schaltungen darf von beliebiger Tiefe sein. Die Tiefe eines Netzes ist definiert als die Anzahl der Gatter auf dem längsten Weg von der Eingabe bis zur Ausgabe. Und genau hier liegt das Problem. Die verschlüsselten Daten sind nämlich mit numerischem »Rauschen« verunreinigt, geringen Abweichungen von ihren Idealwerten. Jede arithmetische Operation verstärkt dieses Rauschen – im Extremfall so sehr, dass das eigentliche Signal darin untergeht.

Dieses Rauschen ist nicht etwa Folge eines Gerätefehlers oder physikalischer Prinzipien; vielmehr wurde es absichtlich in den Prozess eingeführt. Die Verschlüsselungsfunktion *encrypt* ist pro-

babilistisch, das heißt, sie versieht den Chiffretext mit etwas Zufall, um einen Lauschangriff zu erschweren. Man stelle sich den Chiffretext als Punkt in einem abstrakten, hochdimensionalen Raum vor. Die Funktion *encrypt* rückt den Punkt immer ein bisschen von der Position weg, die er in einem rein deterministischen System einnehmen würde (siehe »Verwackelte Verschlüsselung«, links). Die Funktion *decrypt* filtert das Rauschen heraus, indem sie jeden Punkt zur nächstgelegenen ungestörten Position verschiebt. Genauer: In dem abstrakten Raum gibt es ein – geheimzuhaltendes – Gitter »richtiger« Punkte. Die Funktion *decrypt* ersetzt jeden vorgelegten Chiffretext durch den nächstgelegenen Gitterpunkt und wendet auf diesen dann den Entschlüsselungsalgorithmus an. Wenn jedoch die homomorphe Berechnung die Abweichung verstärkt, schiebt *decrypt* das Ergebnis auf einen falschen Gitterpunkt, und die Entschlüsselung liefert nur noch Unsinn.

Grob gesagt verdoppelt jede homomorphe Addition das Rauschen, und jede Multiplikation quadriert es. Also muss die Anzahl der Operationen und damit die Schaltungstiefe beschränkt bleiben, damit die Fehler nicht beliebig anwachsen. Daher kann *evaluate* nicht alles Berechenbare berechnen, und das Verschlüsselungssystem ist nicht mehr homomorph, sondern bestenfalls »ein Stück weit homomorph« (»somewhat homomorphic encryption«, SWHE).

Der Fehlerfortpflanzung wäre abzuhelfen, indem man auf ein Zwischenergebnis erst *decrypt* anwendet – was die Fehler entfernt, bevor sie zu groß werden – und dann *encrypt* – was wieder einen hübschen kleinen Fehler einführt. Nur bräuchte man dafür den geheimen Schlüssel, und den will man ja gerade nicht zur Verfügung stellen.

Erfrischungspause

An dieser Stelle wird die Geschichte verwirrend und fantastisch zugleich. Die in das Verschlüsselungssystem eingebaute Funktion *evaluate* kann jede Berechnung ausführen, zumindest soweit sie eine gewisse Grenze für die

Schaltungstiefe nicht überschreitet. Also kann man *evaluate* auch anweisen, *decrypt* auszuführen. Und da *evaluate* auf verschlüsselten Daten arbeitet, ist der zugehörige Schlüssel die verschlüsselte Version des normalen Schlüssels: Der geheime Schlüssel für das von *evaluate* auszuführende *decrypt* ist das, was herauskommt, wenn man *encrypt* auf den geheimen Schlüssel anwendet. Und das Ergebnis der ganzen Aktion ist nicht etwa Klartext, sondern eine neue Verschlüsselung des bereits verschlüsselten Texts, allerdings mit verringertem Rauschen (siehe »Rauschunterdrückung im Geheimraum«, S. 82).

Alice gibt Bob also faktisch eine Kopie des Schlüssels, der für die Entschlüsselung der Daten gebraucht wird; aber die befindet sich im Innern einer sicher verschlossenen Kiste und kann auch nur dort angewandt werden. Tatsächlich wurde die Kiste sogar mit genau dem Schlüssel abgeschlossen, der in ihrem Innern aufbewahrt ist! (Gentry diskutiert eine noch abgedrehtere Version dieser ohnehin verwirrenden Geschichte, bei der Alice in der verschlossenen Kiste Schmuck herstellt.)

Diese »Erfrischungspausen«, die den Chiffretext durch Ent- und Verschlüsseln wieder sauber und leistungsfähig machen, lassen sich beliebig wiederholen. Auf diese Weise kann der Computer Schaltungen beliebiger endlicher Tiefe verarbeiten und insbesondere totale Homomorphie bereitstellen.

Damit das alles funktioniert, muss allerdings die Tiefe der *decrypt*-Schaltung selbst so gering sein, dass sie ohne Überschreiten der Rauschgrenze durchlaufen werden kann – noch deutlich geringer, um genau zu sein. Sonst würde der Computer nämlich die gesamte Zeit mit Erfrischungspausen zubringen, ohne zu seiner eigentlichen Arbeit zu kommen.

In Gentrys erster Version seines total homomorphen Schemas war diese Bedingung nicht erfüllt. Die Funktion *evaluate* konnte *decrypt* nicht verarbeiten, ohne zu viel Rauschen zu erzeugen. Abhilfe schaffte erst eine Technik, mit der es gelang, *decrypt* »flachzudrücken«; allerdings wurde der Schlüssel dadurch

länger und komplizierter. Mit dieser letzten Verbesserung war das Problem aber zumindest grundsätzlich gelöst.

Seit Gentry 2009 in seiner Dissertation sein System beschrieb, wurden zur total homomorphen Verschlüsselung Dutzende Variationen, Verfeinerungen und alternative Verfahren veröffentlicht. Außerdem gibt es bisher mindestens drei Versuche, homomorphe Verschlüsselung in einem arbeitsfähigen Computerprogramm zu realisieren.

Die meisten dieser Systeme arbeiten wie oben beschrieben mit einer ein Stück weit homomorphen Verschlüsselung, die dann zu einer total homomorphen nachgebessert wird. Sie unterscheiden sich im Verschlüsselungsmechanismus selbst.

Jede asymmetrische Verschlüsselung beruht auf einer mathematischen Aufgabe, die im Prinzip extrem schwierig zu lösen ist (damit Eve es nicht kann), aber sehr einfach, wenn man eine Zusatzinformation hat (weshalb Bob Alices Nachrichten effizient dechiffrieren kann). Beim RSA-Verfahren besteht das schwierige Problem darin, die Faktoren einer immens großen ganzen Zahl zu bestimmen (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 80); die Zusatzinformation ist die Kenntnis der Faktoren. Gentrys Algorithmus von 2009 arbeitet dagegen mit einem Problem aus der Theorie ganzzahliger Gitter; das sind diskrete Punktmengen, die in einem hochdimensionalen Raum regelmäßig angeordnet sind wie Atome in einem Kristall. Zu solchen Gittern gibt es eine Fülle schwieriger Berechnungsprobleme. So ist es schwer im Sinne von äußerst aufwändig, zu einem zufällig gewählten Punkt im Raum den nächstgelegenen Gitterpunkt zu finden. Es sei denn, man kennt spezielle Koordinaten, die dann als eine Art geometrischer Wegweiser zum Gitter dienen können.

Im Jahr 2010 fanden Marten van Dijk vom MIT, Gentry, Shai Halevi von IBM und Vinod Vaikuntanathan, heute an der University of Toronto, ein anderes homomorphes Verschlüsselungssystem. In diesem Fall stammt das schwierige Problem aus der Zahlentheorie. Für

Rauschunterdrückung im Geheimraum



Im Prinzip könnte man übermäßiges Rauschen in einem Geheimtext dadurch dämpfen, dass man ihn ent- und wieder verschlüsselt. Dazu müsste aber der Schlüssel zur Verfügung stehen. An seiner Stelle verwendet man die verschlüsselte Form des Schlüssels. Das Ergebnis ist ein neuer Chiffretext (hier durch arabische Ziffern wiedergegeben), der ebenso sicher wie das Original ist, aber weniger Rauschen aufweist.

zwei ganze Zahlen ist es nicht schwer, deren größten gemeinsamen Teiler (ggT) auszurechnen – schon Euklid gab einen effizienten Algorithmus dafür an, der heute seinen Namen trägt. Die »verrauschte« Version des Problems erweist sich demgegenüber als sehr viel komplizierter. Ändert man mehrere Zahlen mit dem ggT p durch Addition oder Subtraktion kleiner, zufällig gewählter Größen ein wenig ab, dann wird es sehr schwierig, p zu finden. In diesem Verschlüsselungssystem ist p selbst der geheime Schlüssel.

Gemeinsam mit Zvika Brakerski von der Stanford University hat Vaikuntanathan ein drittes FHE-System gefunden (»Learning with errors«, LWE). Das schwere Problem besteht hier darin, ein System von Gleichungen zu lösen, in dem jede Gleichung mit einer geringen Wahrscheinlichkeit falsch ist. Wie beim größten gemeinsamen Teiler ist das Problem im exakten (fehlerfreien) Fall leicht zu lösen; dagegen ist die Suche nach einer Teilmenge korrekter Gleichungen im Allgemeinen sehr aufwändig.

In einer neueren Variante dieses Systems gehen Brakerski, Vaikuntanathan und Gentry neue Wege, um den Rauschpegel zu begrenzen. Anstatt die Berechnung in gewissen Abständen durch Erfrischungspausen zu unterbrechen,

passen sie nach jedem Rechenschritt Parameter des Systems so an, dass der nächste Schritt die Berechnungen weniger stört als sein Vorgänger und der gesamte Rauschpegel nie die entscheidende Schwelle überschreitet.

Arbeitsfähiger Code

Rechnen im Geheimraum ist ja theoretisch ganz nett; aber ist es auch zu etwas nützlich? Bleibt der Gesamtrechenaufwand in erträglichen Grenzen? Diese Fragen sind bei der FHE drängender als bei der gewöhnlichen Verschlüsselung. Im Normalfall wird das Rechnen ja nicht dadurch mühsamer, dass die Daten auf dem Weg zum Rechner verwandelt und wieder zurückverwandelt wurden. Bei der homomorphen Verschlüsselung dagegen wird das Verschlüsselungssystem selbst zum Rechner; und wenn der ineffizient arbeitet, verlangsamt das den gesamten Vorgang.

Viele homomorphe Verfahren fordern einen hohen Preis für ihre Sicherheit. Während der Verschlüsselung durchlaufen die Daten eine Art »kosmischer Inflation«: Ein einzelnes Bit des Klartexts kann zu Tausenden oder sogar Millionen Bits im verschlüsselten Text heranwachsen. Das gilt auch für den Schlüssel – aus Megabyte können leicht Gigabyte werden. Schon die Übertra-

AMERICAN SCIENTIST, ILLUSTRATION: BRIAN HAYES

gung solcher Datenmengen wird teuer; mit dem aufgeblähten Chiffretext dann auch noch zu rechnen, macht die Angelegenheit nicht leichter. Während die Addition oder Multiplikation von Klartextbits mit einem einzigen Maschinenbefehl zu erledigen ist, erfordert dieselbe Operation mit dem aufgeblähten Chiffretext ausgefeilte Programme für hochpräzise Arithmetik.

Viele Forscher arbeiten aktuell an einer Minderung dieses Aufwands. So versucht man, nicht jedes Bit Klartext einzeln zu verschlüsseln, sondern mehrere gemeinsam zu verarbeiten.

Der entscheidende Härtestest ist die Schaffung einer arbeitsfähigen Implementierung. Das haben Nigel P. Smart von der University of Bristol und Frederik Vercauteren von der Katholischen Universität Leuven (Belgien) als Erste versucht. Sie entwickelten ein teilweise homomorphes System; es gelang ihnen aber nicht, es zu voller Homomorphie auszubauen. Das Haupthindernis bildete ein äußerst aufwändiger Prozess, bei dem Schlüssel gewaltiger Größe erzeugt werden.

Mit einer Variante des auf Gittern beruhenden Algorithmus gelang es Gentry und Halevi, ein total homomorphes System zum Laufen zu bringen. Dazu brauchten sie nicht einmal, wie ursprünglich geplant, einen Supercomputer; eine Workstation auf ihrem Schreibtisch genügte völlig. Auch dabei wuchs der Schlüssel allerdings auf 2,3 Gigabyte an; ihn zu erzeugen dauerte zwei Stunden und jede Erfrischungspause 30 Minuten.

In einem weiteren Implementierungsversuch zeigten Kristin Lauter von Microsoft Research, Michael Naehrig von der Technischen Hochschule Eindhoven (Niederlande) und Vaikuntanathan, dass große Fortschritte in Bezug auf die Effizienz möglich sind, sobald man die Forderung nach einem total homomorphen System etwas zurücknimmt. Sie versprechen nicht, Schaltkreise beliebiger Tiefe auswerten zu können, sondern beschränken sich auf eine relativ kleine, vorgegebene Anzahl von Multiplikationen, lassen jedoch beliebig viele Additionen zu. Prak-

tisch umgesetzt haben sie ein entsprechendes Verfahren auf der Basis des LWE-Algorithmus. Wenn man nicht auf dem höchsten Sicherheitsniveau besteht, kommt man mit Schlüssellängen von etwa einem Megabyte aus. Eine homomorphe Addition dauert Millisekunden, eine Multiplikation im Allgemeinen weniger als eine Sekunde – ein gewaltiger Fortschritt gegenüber früheren Varianten, aber immer noch eine Größenordnung langsamer als der ENIAC von 1946.

Patientendaten auswerten

Lauter, Naehrig und Vaikuntanathan diskutieren auch Anwendungen für homomorphe Berechnungen. Eine davon sehen sie im Aufbewahren und Auswerten medizinischer Patientendaten im Internet. Andere potenzielle Kunden finden sich an der Wall Street. Die »Quants« (kurz für quantitative Analysten), die ihre Investmententscheidungen auf der Grundlage von Computerberechnungen treffen, haben ein lebhaftes Interesse daran, nicht nur ihre Daten, sondern auch ihre Algorithmen geheim zu halten. FHE würde das für beide in einem Aufwasch erledigen.

Eine dritte Idee besteht darin, einen kryptografischen Sicherheitszaun zwischen Onlineanbietern und Konsumenten zu ziehen. Anbieter, die Personen mit speziellen Interessen oder Gewohnheiten ansprechen wollen, sammeln und verknüpfen Daten zu deren Aktivitäten im Internet oder anderswo. Ein Service, der auf homomorpher Verschlüsselung beruht, könnte jedem Kunden zielgerichtet auf ihn zugeschnittene Werbung zeigen und ihm dabei zugleich garantieren, dass der Anbieter nichts über ihn selbst in Erfahrung bringt.

Als ich Vaikuntanathan danach fragte, welche Anwendungen seiner Meinung nach wohl zuerst umgesetzt werden könnten, hatte er eine weitere Idee: Spamfilter. Wenn ich einen öffentlichen Schlüssel bekannt gebe, kann jeder mir verschlüsselte Nachrichten schicken, auch die lästigen und unseriösen Massenversender. Dagegen hilft dann kein Spamfilter, denn verschlüsselt ist die

aufdringliche Viagra-Werbung nicht von legitimer Mail zu unterscheiden. Andererseits möchte ich dem Betreiber des Spamfilters den geheimen Teil meines Schlüssels nicht anvertrauen. Homomorphe Verschlüsselung könnte dieses Problem lösen.

Meine eigene Fantasieanwendung wäre eine Bank, gerne auf den Cayman-Inseln, die vielleicht Homomorphic Trust Company heißen würde. Ihre Internetseite könnte genau so aussehen wie die einer gewöhnlichen Bank, aber bei ihr haben nicht nur die Lauscher keine Chance. Selbst die Angestellten der Bank können nicht erfahren, was ich mit meinem Geld anstelle. Und Alice könnte ihr den Koffer mit dem unzählbaren Geld bedenkenlos anvertrauen. ~

DER AUTOR



Brian Hayes ist Verfasser der Kolumne »Computing Science« in »American Scientist«, aus der dieser Artikel stammt. In seinem Blog <http://bit-player.org> präsentiert er ergänzendes Material zu seinen Kolumnen.

QUELLEN

- Brakerski, Z. et al.:** (Leveled) Fully homomorphic Encryption without Bootstrapping, 2011.
<https://eprint.iacr.org/2011/277.pdf>
- Gentry, C.:** A Fully Homomorphic Encryption Scheme. Dissertation, Stanford University 2009.
<http://crypto.stanford.edu/craig>
- Goldwasser, S., Micali, S.:** Probabilistic Encryption and how to Play Mental Poker Keeping Secret all Partial Information. In: Proceedings of the 14th ACM Symposium on Theory of Computing. ACM, New York 1982, S. 365–377
- Lauter, K., M. et al.:** Can Homomorphic Encryption be Practical? In: Proceedings of the Third ACM Workshop on Cloud Computing Security. ACM, New York 2011, S. 113–124
- van Dijk, M., C. et al.:** Fully Homomorphic Encryption over the Integers. In: Proceedings of Eurocrypt 2009. Springer Lecture Notes in Computer Science 5479. Springer, Heidelberg 2010, S. 24–43

© American Scientist

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1408646

1916

Neandertaler! Oder doch nicht?

»Hernandez-Pacheco (Madrid) und der Abbé Hugues Obermaier veröffentlichten eine Untersuchung über eine ›Mandibula Neandertaloide de Bañolas‹, einem im April

1887 gefundenen, der Neandertalrasse zuzurechnenden Unterkiefer. Da man nicht wagen konnte, das völlig versteinerte Fossil von dem Steinmantel zu befreien, sind die Innenflächen nicht zugänglich. Dagegen liegt der Alveolarteil mit 16 gut erhaltenen Zähnen frei. Die rechte Kieferhälfte ist ziemlich intakt, die Kieferäste sind niedrig und breit, auch der Kieferkörper ist niedrig und massig. Werkzeuge fan-

den sich nicht bei dem Fossil. Die Abbildungen gestatten kein abschließendes Urteil. Das Ende des Krieges wird hoffentlich gestatten, das Alter der Mandibula Bañolansensis und den Formenkreis, dem sie angehört, genauer zu bestimmen.« Die Umschau 23, 1916, S. 470–472

(Bis heute konnte die Spezies nicht eindeutig bestimmt werden. Der Zahnschmelz wurde auf $66\,000 \pm 7\,000$ Jahren datiert; d. Red.)



Ist dies ein Neandertalerunterkiefer?

Seifenfrei – stoppelfrei?

»Diese Frage behandelt G. Arbour-Stephens in einem Briefe an den Herausgeber der Zeitschrift ›Nature‹. Er weist darauf hin, daß bei den beschränkten Mitteln zur Seifenfabrikation, welche man in alten Zeiten besaß, die Griechen und Römer sich wohl ohne rasiert hätten, wie es heute noch die Japaner und Chinesen tun. Beim Gebrauch von Seifenschaum sei es nicht eigentlich dieser,

der die Haut geschmeidig mache, sondern das unter den Bläschen befindliche Wasser. Unter den heutigen Verhältnissen sei es anzuraten, einfach Wasser zu benützen. Dieses Verfahren werde bei den Orientalen allgemein angewandt; es sei billig und habe noch den Vorteil, daß Entzündungen nicht so häufig seien, daß das Rasiermesser nicht so leicht stumpf werde.« Die Umschau, 23, 1916, S. 456

Das Menschliche im Menschenaffen

»Über Menschenaffen berichtet R. L. Garner, der einen großen Teil seines Lebens dem Studium der afrikanischen Menschenaffen in ihrer natürlichen Umgebung gewidmet hat. In vieler Hinsicht sind diese vergleichbar den niederen Menschenrassen. Ihre Diät ist vorwiegend vegetarisch. Sie schlafen auf dem Rücken oder auf der Seite. Ihr Bett machen sie im Ast und Laubwerk hoch über dem Erdboden, es ist einem Storchnest vergleichbar. Gehör und Gesicht sind sehr scharf, während ihr Geruch nicht besser als beim Menschen entwickelt ist, und der Geschmack ist sogar weniger entwickelt. Die Weibchen sind mit 7 bis 9 Jahren geschlechtsreif, die Männchen ein bis zwei Jahre später. Das gewöhnliche Lebensalter ist etwa 20 Jahre. Es konnten Anerkennungen von Eigentumsrechten beobachtet werden.« Prometheus 1388, 1916, S. 575–576

Muskelstromprothesen

»Die Atomic Weapons Research Establishment in Aldermaston hat eine verbesserte Handprothese entwickelt, die durch einen Elektromotor angetrieben wird. Dieses neue Modell wird myoelektrisch, d. h. von Strömen gesteuert, die normalerweise den Muskeln die Befehle erteilen. Die Befehlsspannungen werden mit Oberflächenelektroden aus den im Unterarm verbliebenen Muskeln abgeleitet. Die Hand ist mit einem Gleichstrommotor ausgerüstet, der die ersten zwei Finger zusammen Richtung Daumen bewegen kann. Die übrigen sind biegsame Attrappen. Sobald der Amputierte die der Lenkung der Prothese dienenden Muskeln entspannt, nimmt die Hand eine halbgeschlossene Haltung an.« Die Umschau



Muskeln steuern Prothese.

11, 1966 S. 365

32 Millionen Bit in der Sekunde

»Die Leistungsfähigkeit des IBM Systems 360, Modell 44, das insbesondere für wissenschaftlich-technische Anwendungen bestimmt ist, ist durch erweiterte Ausstattungsmöglichkeiten wesentlich erhöht worden. Durch einen direkten Datenkanal erreicht die elektronische Anlage jetzt bei der Übertragung von Daten von oder zu externen Einheiten eine Geschwindigkeit von 1 Million Worte zu 32 Informationsbit in der Sekunde. Die Verarbeitungsorganisation kann äußerst komplex auf-

1966

gebaut werden: Das Modell 44 hat 32 unabhängige Unterbrechungsebenen und je Ebene 256 Unterebenen für eine Gesamtkapazität von 8192 Leitungen. Hinzu kommt eine Hauptspeicher-Schreib- und Lesesperre. Im Zuge der Erweiterung ist die maximale Hauptspeichergroße bis auf 65 536 Worte erweitert worden. Das entspricht 262 144 Bytes zu je 8 Informationsbit.« Automatik 6, 1966, S. 235

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO**



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo
E-Mail: service@spektrum.de

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





Margot und Roland Spohn
Bäume und ihre Bewohner
 Der Naturführer zum reichen Leben
 an Bäumen und Sträuchern
 Haupt, Bern 2016
 302 S., € 29,90

ÖKOLOGIE

Verborgen unter Blattwerk

Bei genauem Hinsehen zeigt sich auf Bäumen und Sträuchern allerlei Verblüffendes.

Ein Haselnussstrauch mit einem abgestorbenen Blatt, mitten im Sommer? Eine Birke mit eigenartig verwachsener Krone? Ein Maikäfer, aufgespießt auf einen Dorn in einem Strauch? Die Lektüre dieses Buchs macht Lust darauf, sich mit den Ursachen solcher Phänomene zu beschäftigen: Tiere, Pflanzen oder Pilze, die den Baum als Wohnstätte nutzen.

In ihrem Naturführer stellen Margot und Roland Spohn die häufigsten hei-

mischen und exotischen Gehölze vor. Das Besondere an den Porträts von mehr als 50 Arten: Im Fokus stehen die Wechselbeziehungen zwischen Bäumen und Sträuchern einerseits und ihren Bewohnern andererseits – vor allem Vögeln, Insekten und Pilzen. Das eingangs erwähnte Blatt etwa nutzt der Haselblattroller (*Apoderus coryli*) als Kinderstube für seine Käferlarven, die verwachsene Baumkrone rührt von Pilzbefall her und den aufgespießten

Maikäfer hat ein Neuntöter (*Lanius colurio*) auf dem Gewissen – ein Vogel, der sich Vorratslager in Sträuchern anlegt.

Spohn und Spohn stellen die Gehölzbewohner in jeweils etwa halbseitigen Absätzen vor, wobei sie neben charakteristischen Eigenschaften auch faszinierende Besonderheiten erläutern. So erfährt man, dass der Gelbfüßige Glanzrüssler, ein Rüsselkäfer, eigentlich gern an Birkenblättern frisst, aber Bäume meidet, die neben Sumpfpfost (*Rhododendron tomentosum*) wachsen. Der Geruch dieser Pflanze, die zu den Heidekrautgewächsen gehört, vertreibt den Sechsheiner.

Die Autoren haben viele aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zusammengetragen. Beide sind ausgebildete Biologen, Roland Spohn zudem Naturfotograf und -maler. Sie besitzen reichlich Erfahrung darin, Naturführer zu verfassen, und ihr Buch zeugt von einem unvergleichlichen Talent, komplexe Sachverhalte einfach, spannend und dennoch fundiert darzustellen.

Zahlreiche hervorragende Fotos und Zeichnungen bebildern das Werk. Beachtlich, dass die Autoren fast alle der mehr als 400 Fotos selbst aufgenom-

Der Eichelbohrer (links) hat einen extrem langen Rüssel. Mit diesem bohrt das Weibchen ein Loch bis weit in das Samengewebe hinein. Anschließend dreht es sich um, dringt mit seiner Lege-

röhre ein und legt Eier ab. Auf Rosen spezialisiert haben sich dagegen die Larven mehrerer Blattwespen (rechts). Hier fressen die Afterraupen einer Bürstenhorn-Blattwespe an den Blättern.



ROLAND SPOHN, AUS SPOHN, M. & R. BÄUME UND IHRE BEWOHNER, MIT FREDL GEN. DES VERLAGS HAUPT, BERN



ROLAND SPOHN, AUS SPOHN, M. & R. BÄUME UND IHRE BEWOHNER, MIT FREDL GEN. DES VERLAGS HAUPT, BERN

men haben. Man kann nur erahnen, wie viele Stunden genauer Naturbeobachtung nötig waren, um die vielen Gehölbewohner aufzuspüren und abzulichten. Ebenso beeindruckend sind die exakten Zeichnungen, in denen sich des Künstlers Begeisterung für die Natur und seine Liebe zum Detail widerspiegeln. Zur rundum schönen Optik tragen zudem das ansprechende Layout und die hohe Druckqualität bei. Monatsangaben erlauben eine schnelle Übersicht darüber, wann die beschriebenen Fraßspuren, Pflanzengallen oder Pilzfruchtkörper in der Natur zu finden sind. Dies macht es den Lesern einfach, sich selbst auf Spurensuche zu begeben.

Das Buch richtet sich an alle Naturinteressierten und wird sowohl Laien als auch Experten begeistern. Einerseits benötigt man kein Fachwissen, um die Texte zu verstehen. Andererseits lernt man selbst als Biologe noch viel Neues. Welcher Fachmann weiß schon, dass Rotkehlchen die besten Verbreiter von Pfaffenhütchensamen sind? Oder dass Proteine des Kleinen Zangenbocks (*Rhagium inquisitor*), eines fichtenbewohnenden Käfers, dazu genutzt werden, die Kristallisation von Speiseeis zu hemmen?

Besonders Naturpädagogen und Fachleute, die Exkursionen leiten, finden in dem Band einen reichen Wissensfundus, mit dem sie ihre Teilneh-

mer begeistern können. Empfehlenswert ist die Lektüre vor allem während der warmen Jahreszeit, wenn die meisten Baumbewohner aktiv sind. Denn man kann es beim Lesen kaum erwarten, im eigenen Garten nach Spuren zu suchen, die man vielleicht früher schon bemerkt hat, aber nie zuordnen konnte. Jedem, der gern Natur entdeckt und sich für das Zusammenspiel von Organismen interessiert, sei das Buch wärmstens empfohlen.

Peter Biedermann

Der Rezensent ist Zoologe am Max-Planck-Institut für chemische Ökologie und Träger des »Klartext«-Preises der Klaus Tschira Stiftung.



Die Geheimnisse der Energie

Thermodynamik und Entropie

Dokumentation, England 2016
Komplett-Media, Grünwald 2016
DVD, Lauflänge zirka 60 Minuten
€ 19,99

THERMODYNAMIK

Wärmefluss und Ordnung

Die meisten Studenten zählen Thermodynamik nicht zu ihren liebsten Fächern. Dass die Disziplin trotzdem hochspannend ist, beweist diese Dokumentation auf DVD.

Die Physik kennt abstrakte Konzepte, die heute dermaßen vertraut klingen, dass man leicht die enorme wissenschaftliche Leistung dahinter vergisst. Wir meinen beispielsweise den Begriff »Energie« intuitiv zu verstehen: Energie ist eben nötig zur Beleuchtung, zur Fortbewegung, zum Heizen und so weiter. Selten machen wir uns jedoch bewusst, dass sich damit zwei fundamentale Naturgesetze verbinden: erstens die Energieerhaltung und zweitens die Tatsache, dass in einem geschlossenen System die Entropie nicht abnimmt (»Tendenz zur Unordnung«).

Mit Blick auf den letzten Umstand lautet der Originaltitel des Films treffend »Order and Disorder«. Der Physikprofessor Jim Al-Khalili von der University of Surrey (England) erzählt darin die Geschichte der Thermodynamik. Al-Khalili tritt seit Jahren in diversen Physikdokumentationen in Erscheinung und ist mittlerweile so etwas wie der Harald Lesch Englands.

Menschen haben seit jeher Energie angezapft, die in natürlichen Prozessen umgesetzt wird: Obst ernten, Holz sammeln, segeln oder Wasserkraft nutzen sind nur einige Beispiele dafür. Im Lauf

der Zeit verbesserte man »Energiesammelmaschinen« wie Wassermühlen immer weiter, ohne jedoch die dahinter stehenden Prinzipien zu begreifen. Der deutsche Universalgelehrte Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) spekulierte über eine »lebendige Kraft«, die etwa ausgetauscht werde, wenn zwei Billardkugeln kollidieren. Er erkannte auch, dass im Schießpulver enorme Kräfte vorhanden sein müssen, die dort quasi schlummern und beim Zünden frei werden. Welch großer Vorteil müsste es sein, wenn man diese Kräfte einfinge, überlegte Leibniz: Ein Mensch könnte die Arbeit von hunderten verrichten.

An der Stelle entführt uns die Dokumentation in die Pumpstation Crossness im Südosten Londons. Riesige Dampfmaschinen verwandelten dort im 19. Jahrhundert Wärme in mechanische Bewegung. Obwohl es jeden interessierte, der solche Maschinen betrieb, wusste lange Zeit niemand: Wie effizient können sie überhaupt sein? 1824 veröffentlichte der französische Physiker Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832) eine Abhandlung, in der er Wärme als eine Art Substanz beschrieb. Er erfand den Begriff des Wärmeflusses und entdeckte, dass der Temperaturunterschied in der Maschine über deren Effizienz entscheidet. Carnots Erkenntnisse mündeten letztlich in den ersten Haupt-

satz der Thermodynamik, dem zufolge sich Energie immer nur umwandeln, aber nie aus dem Nichts entstehen kann. Nach allem, was wir heute wissen, gilt das im gesamten Universum.

Der deutsche Physiker Rudolf Clausius (1822–1888) machte die einfache, aber wichtige Beobachtung, dass Wärme immer vom heißeren zum kälteren Körper übergeht. Claudius gilt als Entdecker des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik. Dieser besagt unter anderem, dass die Entropie in einem abgeschlossenen, wärmedichten System nicht abnehmen kann.

Ein mathematisches Modell für dieses Verhalten lieferte der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann (1844–1906). Al-Khalili stellt ihn als manisch-depressiven Menschen mit stark künstlerischem Einschlag vor. Boltzmanns genialer Ansatz bestand darin, die betrachteten Systeme als Ensemble zahlloser Atome anzusehen, deren Bewegungen man nicht individuell verfolgen muss, sondern deren Kollektiv-

verhalten sich mit statistischen Methoden beschreiben lässt. Diese Vorgehensweise rief allerdings den erbitterten Widerstand von Kollegen hervor. Der österreichische Physiker Ernst Mach (1838–1916) etwa nannte die Atome »nicht-reale Entitäten«. Heute wissen wir: Boltzmanns Ansatz war der richtige.

Wenn abgeschlossene Systeme immer zur Unordnung streben, wieso kann sich dann im Universum etwas so Geordnetes bilden wie das Leben? Wie Al-Khalili demonstriert, ist dies in nicht-abgeschlossenen Systemen möglich, bei denen Energie fließt. Genau das ist der Grund, warum Lebewesen Nahrung aufnehmen müssen: um ihren geordneten Zustand zu erhalten. Deshalb sind die Biosphäre im Allgemeinen und die Menschen im Besonderen permanent auf Energiequellen angewiesen.

In der letzten Szene besucht Al-Khalili folgerichtig die britische Einrichtung Culham für Kernfusionsforschung. Dort versuchen Physiker das Feuer zu zünden, das auch in der Sonne

brennt. Dem deutschen Publikum vertrauter sein dürfte das Projekt Wendelstein 7-X in Greifswald, das auf das gleiche Ziel hinarbeitet. An die schönen Aufnahmen aus dem Innern des (englischen) Reaktors knüpft Al-Khalili die Hoffnung, dass wir die Ordnung auf der Erde noch etliche Millionen Jahre bewahren können.

Der Film behandelt ein zentrales und spannendes Thema der Physik, und die Visualisierung ist ausgezeichnet wie so oft bei Dokumentationen mit Al-Khalili. Jedoch hat das Werk einige Längen und Redundanzen. Sie wären leicht zu vermeiden gewesen, hätte man weitere Physiker ins Drehbuch aufgenommen, die ebenfalls zur Thermodynamik beitrugen: Robert Mayer (1814–1878), James Joule (1818–1889) oder James Maxwell (1831–1879) etwa.

Stefan Gillessen

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.



Norbert Hermann Hinterberger
Die Fälschung des Realismus
Kritik des Antirealismus in Philosophie
und theoretischer Physik
 Springer Spektrum, Berlin 2016
 225 S., € 19,99

WISSENSCHAFTSTHEORIE

Ist das alles wirklich wahr?

Sagen wissenschaftliche Theorien etwas über die Natur aus – oder sind sie bloß einstweilige Übereinkünfte unter Forschern? Eine anregende Streitschrift.

Wer auf die Idee kommt, praktizierende Naturwissenschaftler zu fragen, ob sie wirklich die Natur erforschen oder bloß mit abstrakten Ideen herumspielen, wird wahrscheinlich höflich des Labors verwiesen. Trotzdem ist die Frage als so genanntes Realis-

musproblem ein Dauerthema der Philosophie und Wissenschaftstheorie. Sind individuelle Sinneseindrücke das einzig Wahre, um Theorien zu beweisen oder zu widerlegen? Sagt die Quantentheorie etwas über die Wirklichkeit aus oder nur über die Wahrscheinlichkeit

von Versuchsergebnissen? Sind Mathematiker Erfinder oder Entdecker?

Auf solche und ähnliche Fragen gibt Hinterberger – laut Klappentext freier Schriftsteller mit Schwerpunkt Philosophie der Naturwissenschaften – eine eindeutige Antwort, die er sperrig als fallibilistischer Falsifikationismus bezeichnet. Gemeint ist die Lehre des österreichisch-britischen Philosophen Karl Popper (1902–1994), eine Spielart des kritischen Realismus.

»Realismus« meint jene Auffassung, die wohl jeder Mensch in der Praxis vertritt: Die Dinge existieren unabhängig von unserer Anschauung. Wie Einstein anlässlich des Streits um die Deutung der Quantentheorie sagte: Der Mond ist auch da, wenn keiner hinschaut. Diese alltägliche Ansicht schmähen Philosophen als »naiven Realismus«; sofern sie den Realismus dennoch verteidigen, adeln sie ihn zum »kritischen Realismus«.

Popper gesteht naturwissenschaftlichen Theorien einen Bezug zur Wirk-

Bei Angst ist Wissen ein **guter Berater.**

GEO WISSEN

Den Menschen verstehen

NR. 57 Deutschland € 9,50 Schweiz 18,80 sfr Österreich € 10,80 Benelux € 11,50 Portugal € 12,90 Italien/Spanien € 12,90 Griechenland € 13,50

Ängste
überwinden,
**innere
Stärke**
gewinnen

Was uns verunsichert –
und wie wir damit
umgehen können

**Jetzt
im Handel.**



**Auch mit
DVD erhältlich**

Therapien
Wege zu mehr
Lebenskraft

Eltern
So lernen Kinder
Zuversicht

Zukunft
Eine Gesellschaft
im Umbruch

Selbstvertrauen
Wie wir neuen
Mut fassen

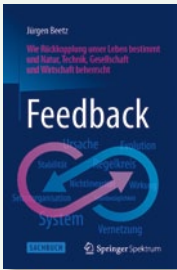


Alastair Fothergill, Huw Cordey

Die Jagd – Der Kampf ums Überleben

Aus dem Englischen von Jorrun Wissmann, Monika Niehaus, Coralie Wink
National Geographic, Hamburg 2016. 312 S., € 39,99

Bei einer Jagd geht es um Leben und Tod, und das nicht nur für die Beute. Jeder missglückte Angriff kostet den Jäger wertvolle Energie und lässt ihn noch mehr hungern. Diese dramatische Beziehung zwischen Greifern und Ergriffenen beleuchten die Autoren mit Hilfe detailreicher Texte und atemberaubender Fotos. Beide sind erfahrene Naturfilmer. Neben Großkatzen präsentieren Fothergill und Cordey auch Spinnen, die ihre Fangnetze quer über Flüsse spannen, sowie meterbreite Armeen von Wanderameisen, die den Wald durchkämmen. Die potenziellen Opfer, erfahren wir, wehren sich mit kollektivem Hören und Sehen, mit dem Schutz der Masse, mit Tarnung oder mit Defensivmaßnahmen wie betonharten Termitenhügeln. Das Werk überzeugt mit klarer Sprache und faszinierendem Bildmaterial, es ist lesens- und sehenswert für alle einschlägig Interessierten. FRANZISKA MÜSCHENICH



Jürgen Beetz

Feedback – Wie Rückkopplung unser Leben bestimmt

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2016. 298 S., € 19,99

Der Systemanalytiker Jürgen Beetz zeigt überraschend viele Zusammenhänge auf, in denen Rückkopplungen eine zentrale Rolle spielen. Sie sind stets unmittelbar und ohne Mühe nachzuvollziehen, auch wenn sie einem vorher nicht bewusst waren. Das Buch bietet zahlreiche Aha-Erlebnisse, getrübt nur von wenigen sachlichen Ungenauigkeiten. Im vorderen Teil des Werks klärt der Autor begriffliche Grundlagen: Was ist Rückkopplung, was ein System? Was versteht man unter Chaos und was unter Selbstbezüglichkeit? Gelegentlich fordert Beetz seinen Lesern etwas Durchhaltevermögen ab, gibt aber interessante Anregungen in Sachen Philosophie. Es folgen zahlreiche Beispiele zu Rückkopplungsprozessen, sei es aus Evolution, Klima, Psychologie oder menschlichem Sozialleben, aus Politik, Wirtschaft, Geschichte oder Technik. Leider weist das Buch jene Unzahl an Rechtschreib- und Druckfehlern auf, die bei modernen Druckerzeugnissen mittlerweile üblich geworden ist. MARKUS NEUROHR



Iain Stewart

Planet Oil – Die Geschichte des Öls

Dokumentation, Großbritannien 2016. Polyband, München 2016. Laufzeit 150 Minuten, DVD € 16,-

Diese dreiteilige BBC-Dokumentation zeigt spannend aufbereitet die Geschichte des Erdöls. Geologieprofessor Iain Stewart führt uns zu einschlägigen Schlüsselorten: Zu den ersten Förderstellen in den USA, zu modernen Bohrplattformen in der Nordsee sowie nach Vorderasien, von wo aus die Ölkrise in den 1970er Jahren ihren Ausgang nahmen. Die Filme machen überdeutlich: Moderne Gesellschaften sind abhängig vom Öl, und dies durchdringt alle Lebensbereiche und bestimmt wesentlich die Politik. Eine Botschaft, die wieder und wieder unterstrichen wird, was auf Dauer die Geduld strapaziert und vielleicht dem Seriencharakter der dreiteiligen Doku geschuldet ist. Das Werk behandelt auch den anthropogenen Klimawandel und die Suche nach neuen Ölvorkommen und liefert hier für Laien eine brauchbare Zusammenfassung. Alles in allem ist es sehenswert. TIM HAARMANN



Thomas Pfeifer

Treffen sich zwei Knochen – Fit und gelenkig bis ins hohe Alter

Westend, Frankfurt a. M. 2016. 224 S., € 14,99

Viel Bewegung, aber wenig Belastung: So heißt die Zauberformel für gesunde Gelenke. Thomas Pfeifer ist seit über 20 Jahren Orthopäde in eigener Praxis und spricht aus Erfahrung. Sein Buch richtet sich an medizinische Laien und erklärt, wie unsere Gelenke aufgebaut sind, was ihnen guttut und was nicht, und wie man Gelenkverschleiß vorbeugen und behandeln kann. Fast jeden wird es irgendwann treffen. Sobald die Gelenke anfangen, hier und da zu zwicken, sollte man sich Pfeifers Ratschläge zu Herzen nehmen. Dann wird man auch noch eine ganze Weile mit den eigenen Körperteilen leben können. Pfeifer versucht den Stoff aufzulockern, indem er Gelenke und Muskeln bisweilen sprechen lässt und einen konstruierten Dialog mit dem Leser führt. Auch wenn das manchmal etwas gewollt wirkt, ist sein Buch gut lesbar, ausgesprochen unterhaltsam und informativ. TANJA NEUVIANS

lichkeit zu, ist also Realist. Doch woher weiß man, ob eine Theorie stimmt? Popper antwortet: Sie muss sich dem Falsifikationskriterium stellen, das heißt widerlegbar sein; sie gilt, solange sie nicht falsifiziert worden ist.

Diese trügerisch einfache Antwort hat unter Poppers Schülern, etwa Imre Lakatos und Paul Feyerabend, sowie unter Kritikern wie dem amerikanischen Wissenschaftsphilosophen Thomas Samuel Kuhn (1922–1996) einen Rattenschwanz weiterer Fragen nach sich gezogen. Hinterberger hält all diese Diskussionen jedoch für verfehlt und lässt nur Meister Popper gelten: Wer von der reinen Lehre des Falsifikationismus abweiche, mache sich ausnahmslos verdächtig, Antirealist zu sein.

Hinterbergers Verdikt trifft auch den deutschen Philosophen Bernulf Kanitscheider (* 1939), obwohl der in seiner Zunft fast schon als naiver Realist gilt. Dieser hat unter anderem untersucht,

wie es kommt, dass sich mathematische Begriffe so gut zur Naturbeschreibung eignen – laut Einstein ein wahres Wunder. Kanitscheider antwortet: Die Mathematisierbarkeit muss bereits in der Natur selbst angelegt sein. Die Dinge müssen von Natur aus gewisse Zählbarkeiten, Symmetrien und Strukturen aufweisen, damit Mathematiker sie auf den Begriff bringen können.

Diese, wie mir scheint, plausible Annahme verdammt Hinterberger als antirealistische Verirrung – allerdings ohne das Problem einer Lösung näherzubringen. Er betont nur, auch der abstrakteste mathematische Begriff existiere letztlich als neurophysiologischer Hirnprozess, sei also real. Doch damit bleibt die Ausgangsfrage, wie Mathematikerhirne natürliche Strukturen entdecken, völlig offen.

Als Leser von »Spektrum der Wissenschaft« ist Hinterberger der Artikel »Was ist real?« von Meinard Kuhlmann

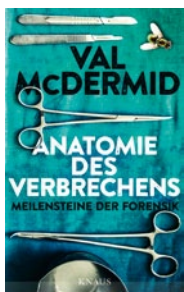
(SdW 7/2014) aufgefallen. Den Strukturrealismus, der dort angesichts der Quantenfeldtheorie propagiert wird (real sind nicht Felder und Teilchen, sondern Strukturen), bezeichnet Hinterberger als – Sie erraten es sicher – antirealistisch. Hingegen lobt er den Theoretiker Lee Smolin, der in seinem Buch »Im Universum der Zeit« über eine zeitliche Evolution der Naturgesetze spekuliert, als wahren Realisten.

Hinterbergers Polemik ist durchaus anregend und kenntnisreich, dennoch habe ich einen Einwand: Man sollte der Realität keine Vorschriften machen, außer dass es sie schon gegeben haben muss, als noch kein Wissenschaftler auf der Welt war. Ob die Natur letztlich aus Teilchen oder Feldern oder Strukturen besteht, das steht nicht bei Popper.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger

Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.



Val McDermid

Anatomie des Verbrechens

Meilensteine der Forensik

Aus dem Englischen von Doris Styrön

Knaus, München 2016

384 S., € 14,99

FORENSIK

Auf den Spuren der Straftäter

Seit zwei Jahrhunderten helfen Forensiker dabei, Verbrechen aufzuklären. Intime Einsichten in ihre oft unappetitliche Arbeit.

Val McDermid, Journalistin und Dozentin für englische Literatur, schreibt normalerweise Krimis und Thriller. Die gebürtige Schottin ist bekannt dafür, ihre fiktiven Helden in äußerst ungewöhnlichen Fällen auftreten zu lassen. Doch ihre blühende Fantasie wird von der Realität oft noch weit in den Schatten gestellt. Im vorliegenden Sachbuch verlässt McDermid daher das

fiktionale Genre und führt ihre Leser in 200 Jahre Forensikgeschichte ein. Sie richtet ihren Blick auf echte Opfer, reale Täter und wirkliche Ermittler. In zwölf Kapiteln, die jeweils einem forensischen Arbeitsgebiet gewidmet sind, lässt sie zahlreiche Experten zu Wort kommen. Darunter finden sich Brandermittler, Entomologen, Pathologen, Computerspezialisten und viele mehr.

Die Autorin versteht es, ihrem Werk gekonnt Atmosphäre zu verleihen. Die Abbildungen, meist Fotos beteiligter Personen, sind durchweg schwarz-weiß. Auf jeder Doppelseite ist eine Fliege zu sehen, aber stets an etwas anderer Stelle, als würde sie sich mit dem Leser durch das Buch bewegen. Im Mittelteil findet sich eine bunte Bildersammlung mit Fotos, Grafiken und Schemata zu den besprochenen Kriminalfällen.

Im Lauf der Zeit, schreibt McDermid, ist zwischen Ermittlern und Tätern eine Beziehung entstanden, die an Räuber-Beute-Dynamiken der Tierwelt erinnert. Die Ersten entwickeln stetig mehr Fantasie, Kreativität und dauernd bessere technische Verfahren, um Fälle aufzuklären. Die Zweiten bringen immer mehr Einfallsreichtum auf, um der Polizei zu entkommen. So lernen wir einen Mörder kennen, der ein Regenschirmgewehr konstruierte, mit dem er seinem Opfer tödliches Rizin an einer Bushaltestelle injizierte.

Bis sich die Forensik zur heutigen Wissenschaft entwickelte, war es ein langer Weg. 1247 verfasste der chinesische

Beamte Song Chi erste »Aufzeichnungen zur Tilgung von Ungerechtigkeit« als Grundlage für die Untersuchung von Leichen. Erst im 19. Jahrhundert wurde Beweismaterial vor Gericht zur Regel, und 1892 verurteilte ein Gericht zum ersten Mal eine Täterin auf Grund ihrer Fingerabdrücke. Seit 1918 gibt es das erste gerichtsmedizinische Institut in New York, und 1988 wurde erstmals ein Verbrechen anhand eines genetischen Fingerabdrucks aufgeklärt. Heute suchen forensische Computerspezialisten auch im Internet nach digitalen Spuren von Gewaltverbrechen.

Um Verdachtsmomente zu erhärten, müssen die Ermittler oft viele Puzzleteile miteinander kombinieren. Fingerabdrücke, Aussagen von Zeugen und Sachverständigen, DNA-Analysen und Untersuchungen an Insekten fügen sich als Mosaiksteinchen in ein forensisches Gesamtbild ein. So erfahren wir von einem Entomologen, dass sich anhand von Kerbtieren ermitteln lässt, wie lange eine Leiche am Fundort liegt – das Fressen beziehungsweise Eierablegen richte sich bei den Sechsfüßern nach dem zeitabhängigen Zustand des Kör-

pers. Während dieser allmählich austrocknet, erscheinen erst Schmeißfliegen, gefolgt von Käfern, Mottenlarven und Milben, die das Fleisch verzehren.

Laut der forensischen Anthropologin Sue Black gleicht kein Verwesungsprozess dem anderen, denn er hängt unter anderem von der Körpermasse, Bekleidung und dem Fettgehalt des Toten ab sowie von Medikamenten und Drogen, die dieser eingenommen hatte. Wie sich diese und weitere Variablen auf den Zersetzungsprozess auswirken, untersuchen Wissenschaftler an der anthropologischen Forschungsanstalt der University of Tennessee. Sie setzen Leichname unterschiedlichen Umweltbedingungen aus und überlassen diese dann sich selbst. Ziel ist es, die große Menge an unbekanntem Einflüssen zu erfassen und zu kategorisieren. Dabei haben die Forscher unter anderem 400 verschiedene Verwesungsgerüche identifiziert. Das Wissen darüber, wann und unter welchen Bedingungen ein toter Körper diese abgibt, kann helfen, den Todeszeitpunkt genauer zu bestimmen. Zurzeit werden dafür vor allem die Temperatur der sterblichen Überreste, der

Grad der Leichenstarre sowie der Zersetzungsfortschritt analysiert, wie aus dem Band hervorgeht. Forensiker und Kriminalbeamte geben schließlich ihre Untersuchungsergebnisse in die Hände der Justiz, wo sie neutral und gewissenhaft abgewogen werden sollen, um ein gerechtes Urteil zu ermöglichen.

Der sachliche Stil des Buchs erlaubt es den Lesern, sich von den behandelten Verbrechen und den damit verbundenen Schicksalen emotional zu distanzieren. Die zahlreichen Fallbeispiele sind facettenreich dargestellt in Bildern, Zitaten und gut verständlichen Erläuterungen wissenschaftlicher Methoden und Erkenntnisse. Für fachlich näher Interessierte fallen sie stellenweise etwas zu oberflächlich aus, ansonsten aber ist das Werk interessant und lehrreich. Freunden abendlicher Krimiserien bietet es die Möglichkeit, die Sendungen beim nächsten Mal mit einem kritischeren Blick zu verfolgen.

Franziska Müschenich

Die Rezensentin hat Biologie und Kognitionswissenschaften studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Köln.



Norman MacLeod

Arten sterben

Wendepunkte der Evolution

Aus dem Englischen von Iris Newton

Theiss, Darmstadt 2016

240 S., € 39,95

PALÄONTOLOGIE

Triumphe des Todes

Im Zuge der Evolution kam es mehrmals zu massenhaftem Artensterben. Mancher glaubt, jetzt sei es wieder so weit.

Ökorumantiker verbinden Natur gern mit Harmonie. Blickt man zurück in die Erdgeschichte, erscheint das allerdings ziemlich absurd. Natur war und ist oft alles andere als harmonisch.

So kam es in der Vergangenheit mehrfach zu Massenaussterben: Perioden, in denen der weltweite Artenschwund extreme Ausmaße erreichte. Im späten Perm etwa, vor rund 252 Millionen Jah-

ren, verschwanden in weniger als drei Millionen Jahren bis zu 97 Prozent (!) der marinen wirbellosen Arten.

Gewiss sind solche Zahlen mit Fragezeichen behaftet. Sie hängen von den Unsicherheiten des Fossilbefunds und der Datierung ab. Zudem beziehen sie sich nur auf Arten, die fossile Spuren hinterlassen haben – über die anderen wissen wir nichts. Trotzdem ist klar: Irendetwas Drastisches muss im Perm passiert sein. Das irdische Leben steckte damals in einer schweren Krise, stand vielleicht sogar ganz auf der Kippe.

Norman MacLeod, Paläontologe am Natural History Museum in London, befasst sich in diesem Band mit den fünf bekannten Massenaussterben der Erdgeschichte. Er umreißt für jedes davon, wie es ablief, welche Ursachen ihm zu Grunde lagen, welche Organismengruppen es betraf und was für Folgen es hatte.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen

Für kundige Autoren wie MacLeod ist das eigentlich dankbarer Stoff. Ohne große Mühe können sie die Aufmerksamkeit eines breiten Publikums gewinnen. Umso erstaunlicher, wie wenig populär der Wissenschaftler sein Thema präsentiert. Nicht nur, dass er seine Leser hemmungslos mit Fachsprache konfrontiert, weit gehend ohne sich zu erklären. Er quält sie auch mit endlosen Schachtelsätzen, extremem Nominalstil und furchtbar umständlichen Formulierungen. Die Übersetzung mag ihren Anteil daran haben; sie könnte jedenfalls besser sein. Nach wie vor besteht kein zwingender Grund, den Strahlstrom als Jetstream zu bezeichnen und die Stoßwelle als Schockwelle.

Man täte dem Buch trotzdem Unrecht, würde man es als schlecht bezeichnen. MacLeod hat Interessantes mitzuteilen, und wenn er sich in den hinteren beiden Buchdritteln mit vergangenen Erdzeitaltern und längst ausgestorbenen Lebewesen befasst, geht davon fraglos Faszination aus. Es ist spannend zu erfahren, dass sich die großen Aussterbeereignisse mehr oder weniger ohne extraterrestrische Einflüsse erklären lassen – ob im späten Ordovizium (vor 444 Millionen Jahren), Devon (vor 360 Millionen Jahren), Perm (vor 252 Millionen Jahren), der späten Trias (vor 200 Millionen Jahren) oder Kreide (vor 66 Millionen Jahren). Die damaligen ökologischen Krisen, so die These, entstanden vermutlich, weil irdische Faktoren unglücklich zusammentrafen. Dazu gehörten Änderungen des Mee-

resspiegels, Vereisungen, tektonische Vorgänge, Vulkanismus, Klimaschwankungen, Veränderungen von atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationsmustern sowie marine Sauerstoffarmut.

MacLeod geht zudem auf außerirdische Faktoren ein, insbesondere den großen Meteoriteneinschlag in der späten Kreide, der den Chicxulub-Krater hinterließ. Er äußert begründete Zweifel daran, dass dieser Impakt das damalige Artensterben allein verursachte. Das Aufprallereignis habe vielmehr eine bereits krisenhafte Situation weiter destabilisiert, schreibt der Paläontologe. Ebenfalls erhellend sind seine Betrachtungen kleinerer Aussterbeereignisse in den vergangenen 65 Millionen Jahren.

Dass wir heute ein anthropogenes »sechstes Massenaussterben« erleben, wie vielfach behauptet wird, kann der Autor nicht bestätigen. Solche Thesen beruhen ausnahmslos auf Extrapolationen kleiner Datensätze, die sich auf vergleichsweise kurze Zeitintervalle oder begrenzte Regionen beziehen oder von Organismen stammen, die fossil eher schlecht vertreten sind. Daher ließen sie sich kaum mit dem Fossilbefund vergangener Aussterbeereignisse vergleichen. Man wisse schlicht zu wenig, um die Tragweite des derzeitigen Artenschwunds einzuschätzen. In dem Zusammenhang stellt MacLeod verschiedene Methoden vor, um künftige Aussterberaten abzuschätzen.

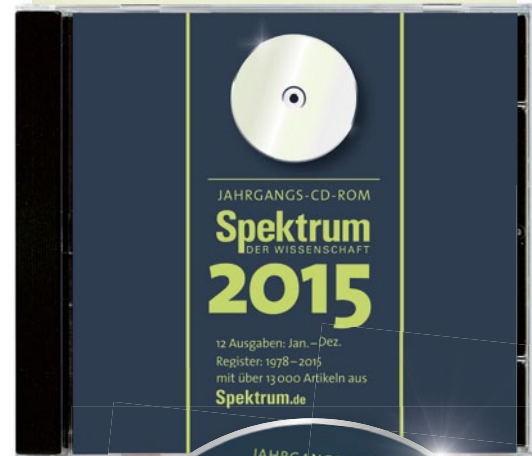
Das Buch ist üppig bebildert und mit Grafiken versehen. Es fehlt ihm jedoch eine zentrale Übersicht über alle besprochenen Zeitabschnitte. Und das Glossar, immerhin vorhanden, erklärt nur wenige der verwendeten Fachbegriffe.

Alles in allem präsentiert sich »Arten sterben« als Werk aus kompetenter Hand, das leider viel von seinem Potenzial verschenkt. Das ist schade, hat der Autor doch Substanzielles beizutragen – speziell wenn es darum geht, den anthropogenen Artenschwund mit erdgeschichtlichen Krisen zu vergleichen.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

JAHRGANGS-CD-ROM 2015



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland).

So erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/recherche

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.de



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.de

Störungen eliminieren

Felicitas Mokler erklärte, wie Forscher zum ersten Mal die von Einstein vorhergesagten Gravitationswellen maßen (»Gravitationswellen nachgewiesen«, Forschung aktuell, April 2016, S. 12).

Walter Langel, Greifswald: Der Beitrag zu Gravitationswellen erklärt das Michelson-Interferometer (mit dem man ursprünglich den Äther finden wollte, in dem sich die Lichtwellen fortbewegen sollten wie Schall in der Luft), ohne aber auf die entscheidende Frage einzugehen, wie man dort eine Längenänderung von 10^{-21} sauber von thermischer Fluktuation zu trennen glaubt.

Weitere Frage: Wie häufig verschmelzen eigentlich große Schwarze Löcher? Falls das ein Jahrtausendereignis ist, ist es extrem unwahrscheinlich, dass die Wellen genau dann eintreffen, wenn der Detektor angeschaltet wird.

Es ist zudem gute Praxis in der Wissenschaft, die Achsen einer Grafik zu beschriften. Dann könnten nämlich die Zeitachsen der Messung und Simulation mit dem angegebenen Frequenzbereich (60–250 Hz) verglichen werden.

Antwort der Autorin Felicitas Mokler: Wie die Forscher versuchen, die im Michelson-Interferometer auftretenden Störungen zu minimieren, beschrieb der Artikel »Warten auf die Welle« in der Ausgabe 12/2015 von »Spektrum der Wissenschaft«. In diesem Kurzbeitrag der Rubrik »Forschung aktuell« war leider nicht genug Platz für eine angemessene Darstellung der technischen Maßnahmen. Thermische

Störungen begrenzen die Messempfindlichkeit, können aber kein Signal der Intensität von GW150914 und zudem synchron in beiden Detektoren hervorrufen.

Verschmelzungen massereicher steller Schwarzer Löcher sind nach aktuellen Schätzungen keinesfalls ein Jahrtausendereignis, sondern eher ein wöchentliches – im Mittel, versteht sich.

Vielen Dank für den Hinweis auf die fehlende Beschriftung der Zeitachse in der Grafik, die wir unten noch einmal vollständig abdrucken.

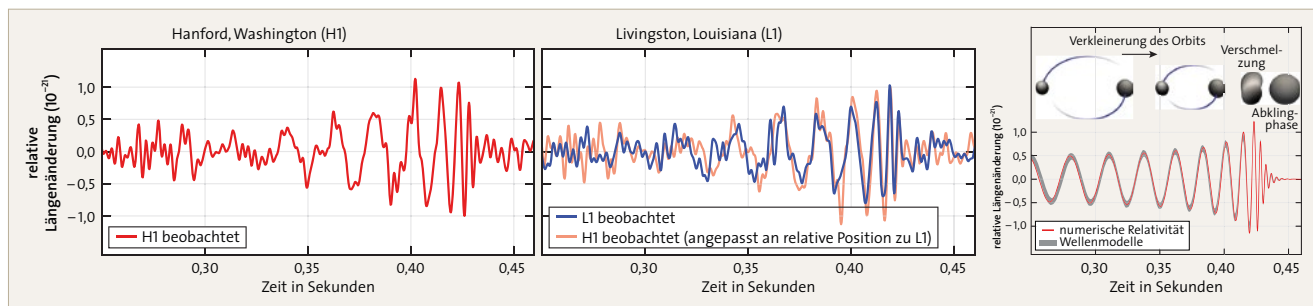
Findiges Umrüsten

Michael Springer erinnerte am Beispiel China daran, dass Recycling Ressourcen schon und die Umwelt weniger belastet (»Keine Zukunft ohne Kreislaufwirtschaft«, Springers Einwürfe, Mai 2016, S. 18).

Hans-Peter Nicolai, Schwäbisch Gmünd: Ich bin auch der Ansicht, dass es ohne eine Kreislaufwirtschaft mit unserem Lebensstil nicht mehr lange so weiter funktionieren kann.

Gestolpert bin ich über den letzten Satz: »In einigen Städten surrten Mopeds und dreirädrige Motorrikschas ausnahmslos mit Elektroantrieb dahin.« Mein Eindruck von China ist, dass sogar in jeder größeren Stadt (zu sehen an 20- bis 30-stöckigen Wohnsilos) ausschließlich solche Fahrzeuge unterwegs sind. Nur noch auf dem Land (wo maximal vierstöckige Plattenbauten stehen) findet man eine Mehrzahl von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.

Am 14. September 2015 registrierten die LIGO-Detektoren der USA (H1, L1) erstmals Gravitationswellen. Sie stammen von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher.



ABBOTT, B.P. ET AL.: OBSERVATION OF GRAVITATIONAL WAVES FROM A BINARY BLACK HOLE MERGER. IN: PHYSICAL REVIEW LETTERS 116, 061102, 2016, FIG. 1 UND 2 (10.1103/PHYSREVLETT.116.061102)

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

Google+

www.spektrum.de/googleplus

twitter

www.spektrum.de/twitter

LESERBRIEFE

... sind willkommen! Schicken Sie Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach an die E-Mail-Adresse www.leserbriefe@spektrum.de oder geben Sie Ihren Kommentar direkt unter dem zugehörigen Artikel auf Spektrum.de ab. Die individuelle Webadresse ist stets am Ende des Artikels im Heft in Rot abgedruckt.

Ich habe selbst Dreiradlastenfahräder gesehen, die von Pedal- auf Elektroantrieb umgebaut waren.

Erratum

Editorial, Mai 2016, S. 3

Die kosmische Höhenstrahlung wurde nicht 1930 entdeckt, sondern 1912, und zwar von Victor Franz Hess. Vielen Dank an Ludwig Devrient, der uns auf den Fehler aufmerksam machte.

DER GEISTERFÄNGER

Wer die Geografie fremder Planeten erforschen will, sollte über die Gebräuche der Aliens Bescheid wissen.

VON S. R. ALGERNON

Zuerst hielt ich es für Donner, dann begriff ich, dass unzählige Beine an meinem Zelt vorbeitrampelten: Die Prozession hatte begonnen. Ich stopfte mir die Ohren zu und konzentrierte mich wieder auf das Display meines Smartphones. Nach zwei Wochen auf diesem öden Planeten hatte ich nicht einmal die Hälfte der Daten für meine Dissertation zusammen. Das Thema klang interessant: eine Welt, deren drei Monde sich zu einer bestimmten Zeit hintereinander am Firmament aufreihen. Nach Meinung meines Doktors sollte dies die Atmosphäre aufwühlen und der perfekte Test für meine Hypothese sein, der zufolge bestimmte kristalline Formationen auf Planetenoberflächen von spektakulären Magnetstürmen erzeugt werden.

Aber niemand hatte mir gesagt, dass diese Zeit für die insektoiden Eingeborenen der Monat der Synergie war. Das ganze Dorf war erfüllt von Umzügen, Glockenschlägen und vom Quieken der Puppen. Obendrein unterbrach das Unwetter die Verbindung zu den Satelliten; ich brauchte aber die Sicht auf die Formationen der Oberfläche. Also wollte ich ins Gebirge, aber die einheimischen Träger weigerten sich, meine Ausrüstung zu schleppen, selbst für doppelten Lohn. »Wir können nicht«,

sagten sie. »Der Geistersturm wird stärker. Der Geisterfänger ruft.«

Wie sollte ich das meinem Doktorvater erklären?

Da mir nur noch wenige Tage blieben, besorgte ich mir Zelt und Schlafsack und brach allein auf. Natürlich musste ich auf die Scanner verzichten, die waren viel zu schwer, aber die Apps auf meinem Smartphone würden zur Not reichen. Ich hoffte, die Daten später ordnen zu können.

Und jetzt hatten mich die Pilger eingeholt. Draußen schlug ein Blitz ein, so nahe, dass er Schatten von Exoskeletten und mehrgliedrigen Beinen an die Zeltwand warf.

Ein stachliges Bein stach wie ein Speer durch die Plane und bohrte sich in meinen Schlafsack. Panisch raffte ich meine Sachen zusammen, stopfte mein Smartphone in den Rucksack und stürzte hinaus. Die Prozession wälzte sich langsam vorbei.

Der Insektoid zog sein Bein aus meinem Zeltdach und schlängelte sich durch die Menge zu mir.

»Verzeihung«, sagte er. »Hoffentlich habe ich Sie nicht verletzt.«

»Nur ein paar Kratzer.«

»Sie sollten sich der Prozession anschließen. Der Geisterfänger wird einen Geist finden, der Ihre Wunden heilt.«

»Ich verlasse mich lieber auf die Klinik am Raumhafen«, sagte ich, während ich mir den Staub abwischte.

»Raumhäfen kommen und gehen, die Geister bleiben für immer«, sprach der Pilger und reihte sich wieder in die Prozession ein. »Ich wünsche eine sichere Reise.«

Ich kletterte bergauf und beobachtete das Gewitter. Interessant, die meisten Blitze sammelten sich hinter einem Hügelkamm. Nach gut einer Stunde stand ich am verwitterten Rand eines Einschlagkraters. Blitze hatten das Gestein verfärbt und geschmolzen, so dass es abwechselnd pockennarbig oder glitschig aussah.

Ich fotografierte das Kraterinnere. Drei Blitzschläge ätzten ein Spinnennetz von Linien durch meine geschlossenen Lider. Meine Haut kribbelte. Meine Ohren sangen. Die Blitze sammelten sich irgendwie dort unten im Krater. Was zog sie an?

Ich aktivierte eine App und zielte mit dem Smartphone auf den Fokus der Einschläge. Vorsichtig stieg ich währenddessen hinunter. Der Abhang war steiler als gedacht, aber ich hielt das Gleichgewicht. Ich blieb eigenartig ruhig. Mein Gefühl sagte mir: Lauf davon, aber der Krater zog mich magisch an. Nachdem ich noch ein Dutzend Blitze

aufgenommen hatte, beschloss ich umzukehren.

Ich rutschte aus, fiel auf die Knie und stützte mich mit den Händen ab. Als ich wieder aufstand, hafteten Fäden an meinen Fingern. Wie Spinnweben.

Wieder blitzte es. Die Fäden glühten. Jeder Muskel meines Körpers krampfte sich zusammen, und ich stolperte rückwärts. Als mein Kopf aufschlug, machte mich der Schmerz benommen. Fäden umspannen mich und bildeten einen Kokon – einen silbrig schimmernden faradayschen Käfig.

Als ich erwachte, hing ich in einem Netz über dem Kraterboden. Ich war eingesponnen in einen Kokon, der jeden Fuß, Arm und Finger so umhüllte, dass ich sie bewegen konnte.

Ein Blitz schlug ein. Das Netz über mir glühte auf, als Strom hindurchfuhr.

Ich hörte ein Rascheln und drehte den Kopf. In einer dunklen Nische erschien eine Art Spinne, die auf zwölf Beinen krabbelte. Während sie sich näherte, zogen sich meine Arme eng vor der Brust zusammen, als wäre ich eine ägyptische Mumie. Fäden strafften sich und hoben mich weiter vom Boden, bis ich wie eine Marionette in der Luft schwebte. Ich hörte, wie die unverkenn-

baren Geräusche des Pilgerzugs näherkamen.

»Sie sind der Geisterfänger«, sagte ich, dankbar, dass der Kokon mir zu sprechen erlaubte.

Die Spinne inspizierte die Ränder ihres Netzes. Jetzt sah ich, dass darin hunderte ramponierter Maschinen und Dutzende nichtmenschlicher Skelette hingen.

Ein verbeulter, alter Roboter rollte auf mich zu. Ein rotes Kreuz wies ihn als medizinischen Assistenten aus.


»Du kannst das bedienen, ja?«

Ich nickte. Alle Feldforscher mussten damit trainieren. Im Notfall konnte dieser Roboter sogar einen Blinddarm entfernen.

Der Geisterfänger war anscheinend zufrieden und krabbelte wieder seiner Nische zu. Das Gewitter hörte auf.

»Wenn die anderen kommen«, befahl er, »folge meinen Anweisungen und sag kein Wort.« Der Kokon zog sich plötzlich um meinen Hals zusammen, so dass ich kaum Luft bekam, dann lockerte er sich wieder. »Wage nicht, mich zu täuschen.«

Dann erhob er die Stimme und erfüllte das Tal mit ihrem Echo.

»Preiset den Geisterfänger, ihr Pilger. Bringt mir die Verletzten und Gebrechlichen.« 

DER AUTOR

S. R. Algernon hat Biologie an der University of North Carolina in Chapel Hill studiert. Derzeit lebt er in Singapur.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

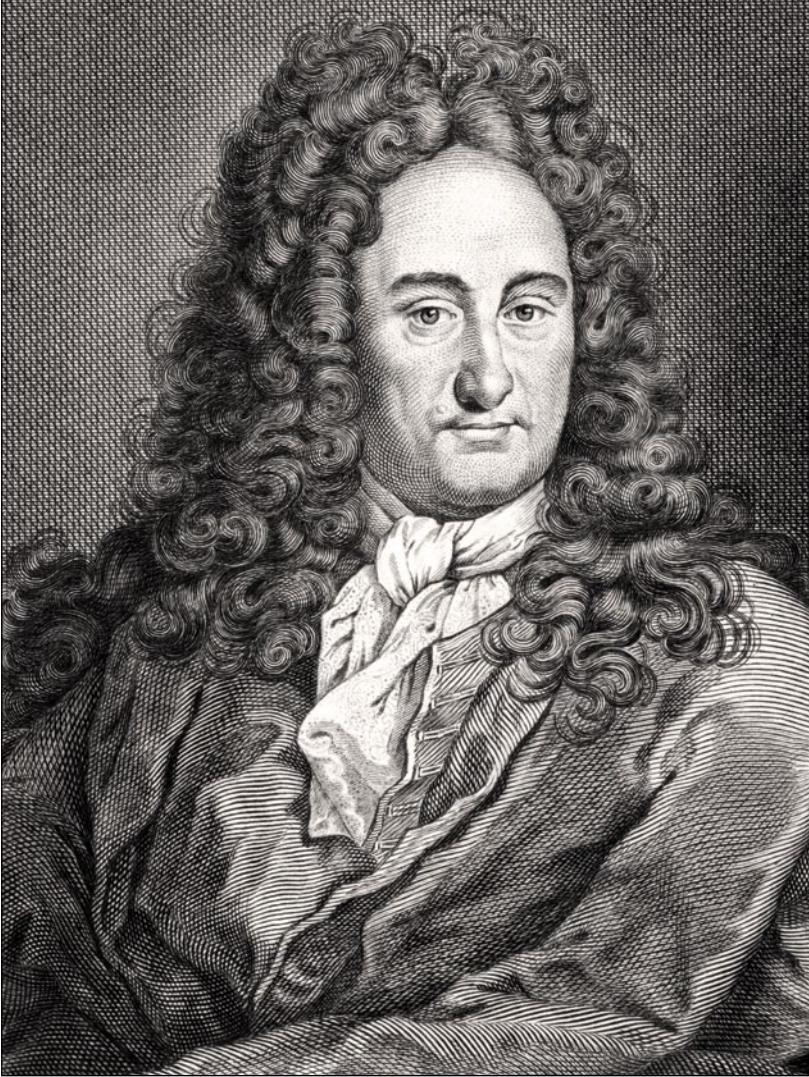
© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature Nature 531, S. 408, 17. März 2016

Gottfried Wilhelm Leibniz

Vor 370 Jahren geboren, vor 300 Jahren gestorben: Aus Anlass des Doppeljubiläums widmen wir dem Universalgelehrten eine Artikelserie. Er entwarf für das gesamte Themenspektrum vom Binärsystem und der mechanischen Rechenmaschine bis hin zu der Idee von der besten aller möglichen Welten einen umfassenden philosophischen Rahmen.



FOTOLIA / GEORGIOS KOUIDAS (BISCH VON 1859)

Wer war *Homo naledi*?

Erst am genauen Alter der frühmenschlichen Fossilien aus Südafrika wird sich sagen lassen, wohin die neue Art im Hominenstammbaum gehört. So lange bleibt strittig, wie die vielen Individuen in die schwer zugänglichen Höhlen kamen – und ob sie dort vielleicht sogar absichtlich beerdigt wurden.

Archäologie aus der Luft

Ein LiDAR-Gerät sendet von einem Flugzeug Hunderttausende von Laserpulsen in der Sekunde aus, um ein hoch aufgelöstes Profil des Bodens zu gewinnen. Das hilft Archäologen bei der Suche nach den Spuren der Vergangenheit, selbst in Urwaldgebieten.



FOTOLIA / OUTDOORSMAN

Unsichere Zukunft

Die Eisbären sind nahe Verwandte des Braunbären, die sich an das Leben auf dem Packeis angepasst haben. Jetzt gefährden Umweltverschmutzung und schrumpfender Lebensraum ihr Überleben. Aber wie genau wirken sich solche Schadfaktoren auf die Population dieser Tiere aus?



FOTOLIA / DENIS JUNKER

Das Neutronenrätsel

Physiker haben mit zwei Präzisionstests untersucht, wie schnell Neutronen zerfallen – und erhalten verschiedene Werte. Steckt dahinter bloß ein unentdeckter Fehler oder offenbart die Diskrepanz ein noch unbekanntes Phänomen von fundamentaler Bedeutung?

NEWSLETTER

Möchten Sie immer über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.de/newsletter

JETZT BESTELLEN:
DAS ABO VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



Buch »Die verborgene Wirklichkeit«

Brian Greene zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind.

JAHRES- ODER GESCHENKABO

- ✓ **ERSPARNIS:**
12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger als der Normalpreis.
- ✓ **WUNSCHGESCHENK:**
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.
- ✓ **KEINE MINDESTLAUFZEIT:**
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.
- ✓ **AUCH ALS KOMBIABO:**
Privatpersonen erhalten für nur € 6,-/Jahr Aufpreis Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

NEU!



DVD »Die Zelle – Unser geheimes Universum«

Eine fesselnde, erstaunliche und aufwändig inszenierte Reise durch 300 Jahre Forschung rund um die Geheimnisse der Zelle. Spieldauer ca. 150 Minuten

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

E-Mail: service@spektrum.de



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69.

