

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

APRIL 2016

4/16 Spektrum
DER WISSENSCHAFT

ERNÄHRUNG

Gemüse enthält
heilsame Gifte

QUANTENGRAVITATION

Die Verschränkung
von Raum und Zeit

MESOPOTAMIEN

Die ersten Metropolen
der Geschichte

NEUE SERIE: GROSSFAHNDUNG NACH EXOPLANETEN

Leben auf fernen Welten?

Die Suche nach der zweiten Erde
fängt jetzt erst richtig an



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



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!





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Jenseits unseres Horizonts

Der 11. Februar markiert eines jener – leider recht seltenen – Ereignisse, bei dem ein Forschungsergebnis nicht nur in alle Zeitungen und Fernsehnachrichten gelangt, sondern sogar zur Topmeldung des Tages avanciert: Nach jahrelangen Vorarbeiten konnte die LIGO-Kollaboration die Existenz von Gravitationswellen nachweisen, die Albert Einstein bereits vor 100 Jahren mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt hatte (S. 12). Auch ich als Nichtphysiker ließ mich da gern von der allgemeinen Wissenschaftseuphorie mitreißen!

Der Nachweis gelang durch Beobachtung der Verschmelzung zweier mehr als eine Milliarde Lichtjahre von der Erde entfernter Schwarzer Löcher mit Hilfe aufwändiger Detektoren. Damit erlebte auch das Konzept von »Big Science«, den groß angelegten internationalen Forschungsprojekten, einen eindrucksvollen Erfolg – wie schon Anfang des Jahrtausends mit der Entschlüsselung des menschlichen Genoms und 2013 mit dem Nachweis des Higgs-Bosons am CERN. Für uns ein Anlass, einen Blick auf die verschiedenen Großprojekte der Vergangenheit und Gegenwart zu werfen und sich die dabei eingesetzten Finanzmittel zu vergegenwärtigen. Unsere Infografik auf S. 62 bietet hierzu eine Übersicht.

Apropos Schwarze Löcher in den Tiefen des Alls: Den Blick über den eigenen Horizont hinaus zu erheben, war schon immer ein wichtiger Grund, »Spektrum« zu lesen. Entsprechend rangieren Astronomie und Kosmologie bei Befragungen unserer Abonnenten zuverlässig ganz oben bei den Interessengebieten, was sich auch in der Auswahl unserer Titelthemen widerspiegelt.

In dieser Ausgabe finden Sie neben dem erwähnten Gravitationswellennachweis noch zwei andere Ausblicke in die Weiten des Universums. Ab S. 36 stellen die Physikprofessoren Kevin Heng und Joshua Winn die jetzt anlaufende nächste Phase der Exoplanetenforschung vor. Hier nehmen die Astronomen in mehreren parallelen Anstrengungen den gesamten Himmel ins Visier statt wie bisher nur einen kleinen Ausschnitt davon. Letztlich suchen sie aber auch nach Planeten mit Atmosphären, die unter Umständen Leben ermöglichen könnten. Und schließlich untersucht der Artikel ab S. 48 ganz grundsätzliche theoretische Zusammenhänge von Raum und Zeit. Möglicherweise ergeben sich diese nämlich aus quantenmechanischen Verschränkungsprozessen, und die Gravitation stellt dann nichts anderes als einen Quanteneffekt dar. Damit würde ein lange angestrebtes Ziel in Reichweite rücken: die Verknüpfung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik.

Herzlich grüßt Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Neurowissenschaftler **Mark P. Mattson** erforscht zelluläre und molekulare Mechanismen, die neurodegenerativen Erkrankungen zu Grunde liegen. Ab S. 28 erklärt er, warum viel Obst und Gemüse gegen Alzheimer helfen könnte.



Warum entstanden in Mesopotamien die ersten Städte der Welt? Der Freiburger Archäologe **Simon M. Halama** fasst ab S. 54 das Wissen darüber zusammen – und hofft auf ein baldiges Ende des Bürgerkriegs sowie neue Grabungen im Irak.



Wie lässt sich die Zeit und Energie fressende Arbeitsteilung zwischen Rechnen und Speichern bei Computern überwinden? Die Physiker **Massimiliano Di Ventra** und **Yuriy V. Pershin** beantworten die Frage ab S. 80.

3 Editorial

6 **Spektrogramm**

Verräterische Spalten auf Plutomon
Charon • Physik der Seifenblasen • Ohr
zum Ausdrucken • Neues Mikroskopie-
verfahren • Riesengürteltiere der Vorzeit •
Datenspeicher für die Ewigkeit?

9 **Bild des Monats**

Heißer Gürtel um die Sonne

10 **Forschung aktuell**

Die verkannten Bestäuber
Neben Bienen befruchten
auch überraschend
viele andere Insekten
unsere Nutzpflanzen

**Graphen paaren ist leichter
als gedacht**
Ein hocheffizientes
Lösungsverfahren für ein
prominentes Problem
der Komplexitätstheorie

**Gravitationswellen
nachgewiesen**
Forscher haben ein
neues Fenster zum
Universum aufgestoßen

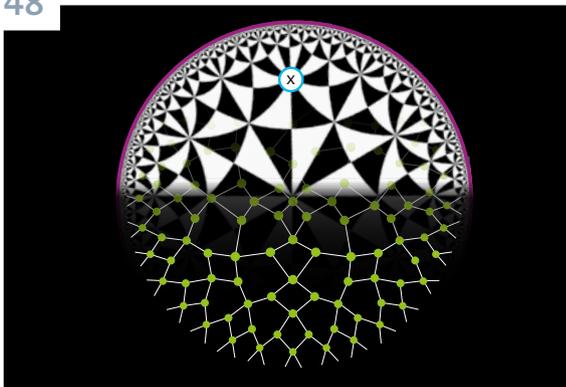
SPRINGER'S EINWÜRFE
Nachruf auf Moores Gesetz
Das Ende einer techno-
logischen Ära

20



FOTOLIA / CRISOD

48



NIK SPENCER / NATURE, COWEN, R., NATURE 527, S. 290-293, 2015

54



ARTEFACTS-BERLIN.DE; MATERIAL: DEUTSCHES ARCHÄOLOGISCHES INSTITUT

BIOLOGIE & MEDIZIN

20 **Haiwanderungen auf der Spur**

Im Ostpazifik verfolgen Forscher Aufenthalte und Routen
der teilweise bedrohten Fische. An den Tieren angebrachte
Sender liefern überraschende Erkenntnisse.

A. Peter Klimley

▶ 28 **Was dich nicht umbringt ...**

Pflanzliche Kost fördert unsere Gesundheit – nicht obwohl,
sondern weil sie den Körper unter Stress setzt.

Mark P. Mattson

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

46 **Hüpf, Steinchen, hüpf!**

Treffen flache Kiesel unter kleinem Winkel auf eine
Wasseroberfläche, wirkt diese wie eine Sprungchance.

H. Joachim Schlichting

▶ 48 **Raum – Zeit – Verschränkung**

Sind Raum und Zeit Folge quantenmechanischer Prozesse?

Ron Cowen

MENSCH & KULTUR

SERIE: »DIE GEBURT DER STADT« TEIL 2

▶ 54 **Die ersten Metropolen**

Nirgendwo entwickelten sich so früh schon so viele
urbane Zentren wie in Mesopotamien, nirgends erreichten
Verwaltung, Politik und Kultur eine solche Blüte.

Simon M. Halama

INFOGRAFIK

62 **Forschung in Zahlen: Big Science**

Ein Überblick über die in wissenschaftliche Großprojekte
investierten Finanzmittel und die Forschungsausgaben
der wichtigsten Länder.

► TITELTHEMA

SERIE: GROSSFAHNDUNG
NACH EXOPLANETEN TEIL 1

36 Auf der Jagd nach der zweiten Erde

Kevin Heng und Joshua Winn

Mit einer neuen Generation von Weltraumobservatorien weiten Astronomen die Suche nach Exoplaneten aus und fahnden nach Spuren von Leben in deren Atmosphären.

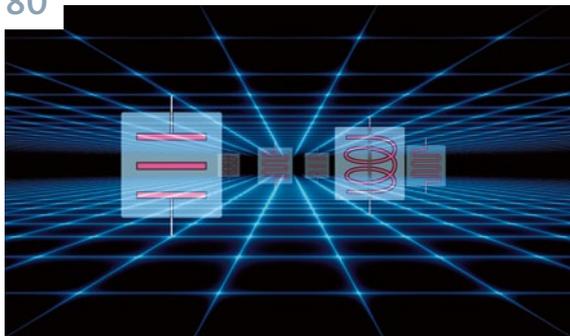


70



PAULA BRONSTEIN

80



FOTOLIA / DRHITCH; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

64 Und die Mondlandung fand doch statt!

Verschörungstheorien lassen sich mit statistischen Mitteln widerlegen.

Christoph Pöppe

ERDE & UMWELT

70 Gift im Trinkwasser

Arsenverseuchtes Grundwasser bedroht weltweit die Gesundheit von Millionen Menschen. Besonders heikel sind viele belastete Brunnen in Teilen Asiens.

Katy Daigle



TECHNIK & COMPUTER

80 Computerchips mit integriertem Gedächtnis

Neue Typen elektronischer Bauteile überwinden die klassische Trennung zwischen Rechnen und Speichern – und versprechen einen gewaltigen Leistungszuwachs.

Massimiliano Di Ventra und Yuriy V. Pershin

86 Rezensionen

Rüdiger Vaas: Jenseits von Einsteins Universum • Ehrhard Behrends: Der mathematische Zauberstab • Christian J. Meier: Eine kurze Geschichte des Quantencomputers u. a.

93 Wissenschaft im Rückblick

Vom Zeppelin zur Mondsonde, vom Rhinoceros zur Gehirnextraktion

94 Leserbrief/Impressum

96 Futur III

Aaron Moskalik: Der Geist in der Maschine

98 Vorschau

Titelmotiv: iStock / cemagraphics
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

ASTRONOMIE

Gesprengte Kruste auf Plutomond

Charon, der größte Mond Plutos, besaß früher wahrscheinlich einen unterirdischen Ozean aus Wasser. Darauf deuten Aufnahmen der NASA-Raumsonde New Horizons hin. Die Bilder zeigen eine Region mit der informellen Bezeichnung »Serenity Chasma«; sie liegt in der Nähe von Charons Äquator. Dort sind tief eingeschnittene Täler mit Steilhängen zu erkennen. Offenbar ist Charons Kruste hier gedehnt worden und riss auf großer Länge ein. Tatsächlich gehören die Klüfte einem riesigen Spaltensystem an, das sich entlang des Äquators über mindestens 1800 Kilometer erstreckt und bis zu 7,5 Kilometer tief ist.

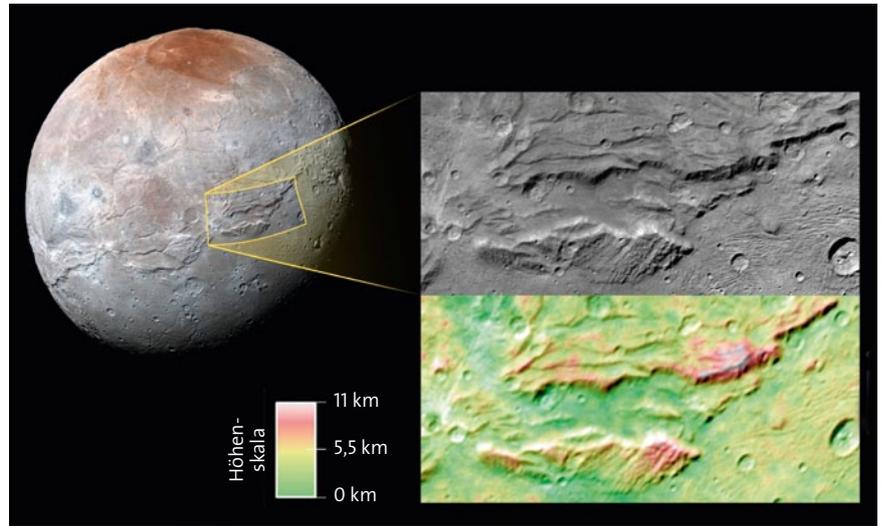
Charons Kruste besteht hauptsächlich aus Wassereis. Forscher nehmen an, dass sie sich in der Frühzeit des

Monds erwärmte – zum einen durch den Zerfall radioaktiver Elemente, zum anderen durch thermische Energie, die bei der Entstehung des Himmelskörpers frei wurde. In großer Tiefe schmolz das Eis wahrscheinlich, wobei ein unterirdischer Ozean entstand.

Als Charon später auskühlte und der Ozean gefror, dehnte dieser sich aus und sprengte die Oberfläche des Monds. Das ließ wohl die gewaltigen Spalten entstehen, die den Himmelskörper heute prägen.

Pressemitteilung der NASA, 18.2.2016

Das Spaltensystem auf Charon entlang des Äquators.



NASA / JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY



Mehr Aktualität!

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

FLUIDDYNAMIK

Physik der Seifenblasen

Wissenschaftler der Université de Rennes (Frankreich) haben untersucht, was beim Pusten von Seifenblasen passiert. Sie bauten eine Maschine, die Seifenlauge kontrolliert abfließen lässt und so einen dauerhaften Flüssigkeitsfilm erzeugt. In diesen hinein bliesen sie mit einer Düse sowohl Luft als auch andere Gase wie Helium und Schwefelhexafluorid. Die Größe und die Dicke des Films ließen sich verändern, ebenso der Durchmesser der Düse, ihr Abstand zum Seifenfilm und das Strömungstempo des Gases.

Laut den Ergebnissen bilden sich Seifenblasen erst, wenn der Gasstrom eine bestimmte Geschwindigkeit überschreitet, die von seiner Massendichte abhängt. Denn das Gas muss eine hinreichend große Kraft auf den Seifenlaugefilm ausüben, um diesen

so weit auszublenken, dass kugelförmige Gebilde entstehen. Die Blasen lösen sich außerdem leichter, wenn der Flüssigkeitsvorhang breiter und höher ist als der Durchmesser der Düse – und wenn der Düsenausgang sich möglichst nah am Seifenfilm befindet. Die Dicke des Flüssigkeitsfilms spielt hingegen keine Rolle.

Für praktizierende Seifenblasenmacher bedeutet das, sie sollten hinreichend stark pusten – und zwar aus kleiner Entfernung auf einen möglichst großen Ring, der zuvor in Lauge getaucht wurde. Den Ring hingegen ständig in die Flüssigkeit zu tunken, um möglichst viel Seifenlösung aufzunehmen – ein Verhalten, zu dem viele instinktiv neigen –, bringt eher wenig.

Phys. Rev. Lett. 116, 077801, 2016

Ohr zum Ausdrucken

Ein neu entwickelter 3-D-Bioprinter produziert lebendes Gewebe in Abmessungen, die bisher nicht möglich waren. Forscher um Anthony Atala von der Wake Forest University in Winston-Salem (North Carolina, USA) drucken damit Knochen- und Skelettmuskelgewebe. Auch ein typisch menschliches Ohr in Originalgröße haben sie schon erzeugt. Kleinere Druckerzeugnisse hat das Team bereits erfolgreich in Nager übertragen. In diese Konstrukte wuchsen nach der Implantation nicht nur gewebespezifische Zellen ein, sondern auch Blutgefäße.

Die Wissenschaftler verwenden Hydrogele, welche die gewünschten Körperzellen enthalten, zusammen mit biologisch abbaubaren Polymeren, die den entstehenden Zellverband verfestigen. Beides gelangt zunächst in eine Stützstruktur, die dem Erzeugnis die erforderliche äußere Form verleiht. Wenn sich das künstlich hergestellte Gewebe hinreichend versteift hat, wird die Stützstruktur entfernt.

Bislang standen der Herstellung größerer Gewebestücke zwei Schwierigkeiten entgegen. Zum einen starben die Zellen im Innern ab, da nicht genügend Nährstoffe zu ihnen vordrangen. Zum anderen fehlte die nötige mechanische Stabilität. Das erste Problem lösen die Forscher, indem sie Kanäle in das Gewebe mit eindrucken. Durch diese gelangen Nährstoffe und Sauerstoff zu den Zellen, bis Blutgefäße einwachsen und die Transportfunktion übernehmen. Das zweite Problem erübrigt sich durch Hinzufügen des biolo-



WAKE FOREST INSTITUTE FOR REGENERATIVE MEDICINE

Verpflanzbare Gewebe lassen sich mit Hilfe des neuen Bioprinters in beliebiger Form herstellen – hier etwa eine Ohrmuschel.

gisch abbaubaren, formgebenden Kunststoffes Polycaprolacton (PCL).

Auf lange Sicht möchten die Wissenschaftler ihren Bioprinter klinisch anwendbar machen, um aus körpereigenen Zellen von Patienten passgenaue Körperteile und Organe herzustellen.

Nat. Biotechnol. 10.1038/nbt.3413, 2016

3-D-Bilder von Zellen in Gewebe

Eine neue Mikroskopietechnik bildet Zellen in räumlicher Darstellung ab – sogar innerhalb des Gewebeverbands. Es handelt sich um eine Variante der Lichtscheibenfluoreszenzmikroskopie (LSFM). Forscher fokussieren hierbei Laserstrahlen so, dass schmale »Lichtscheiben« entstehen, welche die Probe durchdringen. Der Beobachter schaut senkrecht auf diese Scheiben; das Bild wird also kaum von leuchtenden Strukturen ober- und unterhalb der Fokusebene gestört.

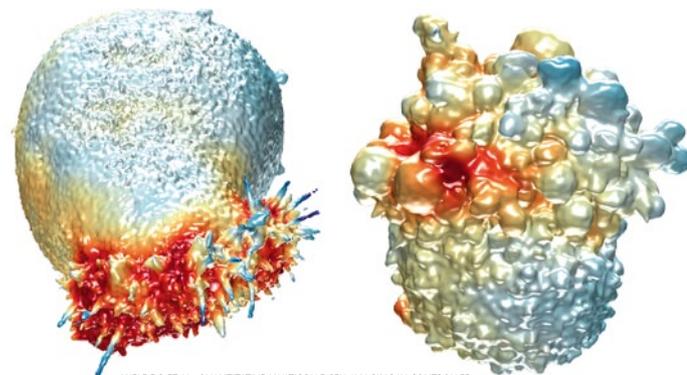
Gaudenz Danuser vom University of Texas Southwestern Medical Center (USA) und seine Kollegen haben die Technik nun weiter verbessert. Erstens setzen sie so genannte Besselstrahlen

ein, die ihre Form kaum verändern, während sie sich in der Probe ausbreiten. Zweitens erfasst das Kamerabild immer nur jene Teile der Probe, die im Zentrum des Strahls liegen, wo die Intensität am höchsten ist. So können die Forscher eine Region von 160·160·100 Mikrometern (millionstel Metern) in allen Raumrichtungen auf 0,3 Mikrometer genau abbilden.

Lungenkrebs- (links) und Melanomzelle. Die Farben stehen für die Aktivitäten des Proteins Aktin (links) und des Enzyms PI3K (rechts).

Das erlaubt es beispielsweise, Zellen räumlich darzustellen, die in Kollagen eingebettet sind, ein Protein des Bindegewebes.

Dev. Cell 36, S. 462–475, 2016



WELF, E.S. ET AL. QUANTITATIVE MULTISCALE CELL IMAGING IN CONTROLLED 3D MICROENVIRONMENTS. IN: DEVELOPMENTAL CELL 36, S. 462-475, 2016, FIG. 6 F+H

PALÄO BIOLOGIE

Riesengürteltiere der Vorzeit

Die ausgestorbenen Glyptodonten stellten eine Untergruppe der Gürteltiere (*Dasyopodae*) dar, die heute mit 21 Arten auf dem amerikanischen Kontinent verbreitet sind. Das hat ein Team um Frédéric Delsuc von der Universität de Montpellier (Frankreich) anhand eines DNA-Vergleichs nachgewiesen.

Glyptodonten waren gepanzerte Pflanzenfresser in Südamerika, deren größte Vertreter die Abmessungen eines Autos haben konnten. Sie faszinieren Biologen bereits seit



PETER SCHOUTEN

Würden sie noch leben, wären sie auf jeden Fall ein Hingucker: zwei Glyptodonten in rekonstruierter Darstellung.

dem 19. Jahrhundert. Obwohl sie ähnlich aussahen wie moderne Gürteltiere, waren ihre evolutionären Verwandtschaftsverhältnisse bisher unklar.

Delsuc und seine Kollegen haben sich dem Problem nun von molekularbiologischer Seite genähert. Sie extrahierten DNA aus 12000 Jahre alten Fossilien eines Vertreters der Gattung *Doedicurus*, die zu den Glyptodonten zählte und deren größte Exemplare hervorbrachte. Es gelang den Forschern, nahezu das vollständige mitochondriale Genom des Tiers zu rekonstruieren. Der Vergleich dieser Sequenz mit dem Mitochondriengenom heutiger Nebengelenktiere (Xenarthra) ergab, dass die *Doedicurus*-Spezies zu den Gürteltieren gehörte und sich als Untergruppe vor etwa 35 Millionen Jahren abspaltete.

Dem Fossilbefund zufolge entwickelten sich die Glyptodonten aus mittelgroßen Formen, die während des Miozäns lebten (23 bis 5 Millionen Jahre vor heute) und bis zu 80 Kilogramm schwer wurden, zu Riesenformen während des Pleistozäns (2,6 Millionen bis 12000 Jahre vor heute). Einige erreichten ein Gewicht von bis zu zwei Tonnen, eine Länge von fast vier Metern und besaßen neben dem auffälligen Panzer eine knöcherne Schwanzkeule. Vor ungefähr 10000 Jahren starben die Glyptodonten aus, ebenso wie die meisten anderen Vertreter der südamerikanischen Megafauna.

Curr. Biol. 26, S. R155–R156, 2016

TECHNIK

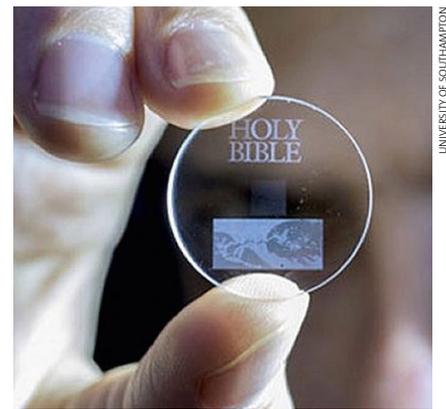
Datenspeicher für die Ewigkeit?

Forscher der University of Southampton (England) haben einen Datenspeicher vorgestellt, der ihren Angaben zufolge extrem beständig ist. Er besteht aus nanostrukturiertem Glas und hält Temperaturen bis zu 1000 Grad Celsius stand. Die Speicherdichte soll 360 Terabyte pro Datenscheibe betragen; eine solche Scheibe besitzt einen Durchmesser von wenigen Zentimetern. Bei Raumtemperatur geben die Forscher eine praktisch unbegrenzte Haltbarkeit des Speichers an.

Die Daten werden mit Femtosekunden-Laserblitzen in Quarzglas eingeschrieben. Dabei entstehen drei Ebenen von Nanostrukturen, die untereinander einen Abstand von je fünf Mikrometern (millionstel Metern) haben. Wenn

ein Lichtstrahl durch das so modifizierte Glas tritt, verändert sich seine Polarisation – abhängig von der jeweils abgelegten Information. Mit einem Mikroskop und einem Polarisator lässt sich das Medium auslesen. Über die Lese- und die Schreibgeschwindigkeit machen die Forscher in ihrer Mitteilung keine Angaben.

Bereits 2013 hat das Team mit dieser Technik einen 300 Kilobyte großen Text archiviert. Mit der weiter verbesserten Methode schrieb es jetzt die Allgemeine Erklärung der Menschenrechte, Isaacs Newtons »Opticks«, die Magna Carta und die King-James-Bibel als digitale Kopien in Quarzglas-scheiben ein. Ihr Verfahren haben die Wissenschaftler am 17. Februar auf



UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON

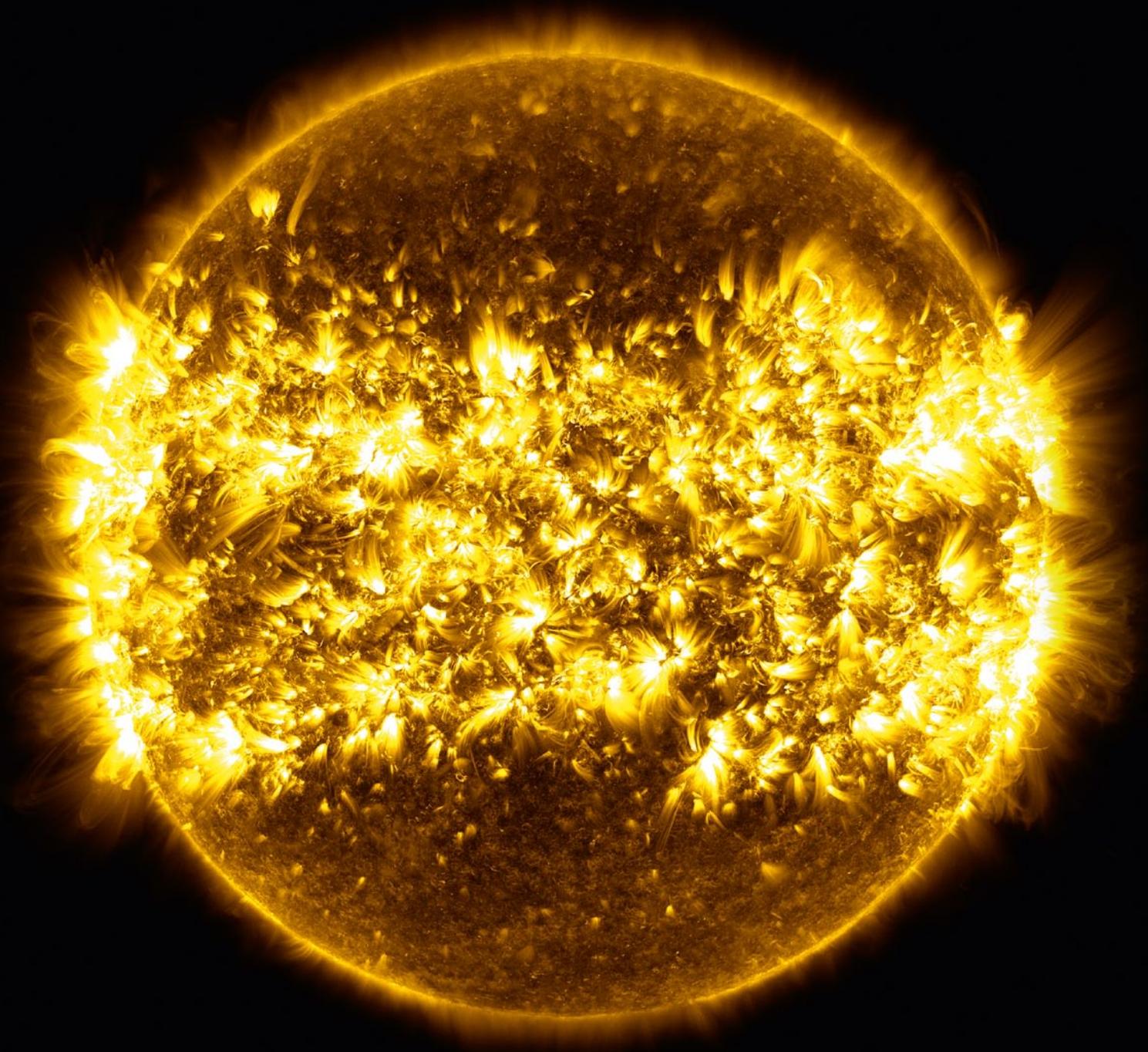
Diese Scheibe enthält eine digitale Kopie der King-James-Bibel.

einem Treffen der International Society for Optical Engineering in San Francisco, USA, vorgestellt.

Pressemitteilung der University of Southampton, 18. 2. 2016

HEISSER GÜRTEL UM DIE SONNE

Dieses Bild überlagert 23 Einzelaufnahmen der Sonne, die der NASA-Satellit Solar Dynamics Observatory zwischen Januar 2015 und Januar 2016 erstellte. Die verwendete Wellenlänge macht die Auswürfe von heißem Plasma besonders gut sichtbar. Je nach Sonnenaktivität, die sich in etwa elfjährigen Perioden verändert, erscheinen solche Bereiche in unterschiedlichen Breitengraden – gegen Ende eines Zyklus immer näher am Äquator.



Die verkannten Bestäuber

Ob Erdbeeren, Äpfel oder Raps – viele Nutzpflanzen sind für einen hohen Ertrag auf Befruchtung durch Insekten angewiesen. Bei diesen handelt es sich aber keineswegs nur um Honigbienen; eine Vielzahl anderer Tierarten ist ebenfalls an der Aufgabe beteiligt.

VON FRANK JAUKER UND EVA DIEHL

Wenn die Biene von der Erde verschwindet, dann hat der Mensch nur noch vier Jahre zu leben», soll Albert Einstein angeblich gesagt haben. Tatsächlich sind global 35 Prozent der Nutzpflanzen auf Bestäubung durch Insekten angewiesen oder erzielen dadurch höhere Erträge. Deshalb alarmieren die seit Jahren weltweit abnehmenden Populationen von Honig- und vielen Wildbienenarten Forscher und Politiker. Andere Insektengruppen erhalten in dieser »Bestäuberkrise« weniger Aufmerksamkeit – offenbar zu Unrecht, wie nun eine weltweite Studie zeigt, an der einer von uns, Frank Jaunker, beteiligt war (*PNAS 113, S. 146–151, 2016*). Er beobachtet schon seit Langem Schwebfliegen und Bienen auf Rapsfeldern nördlich von Frankfurt am Main.

Im Frühjahr 2013 nahm die Ökologin Romina Rader von der australi-

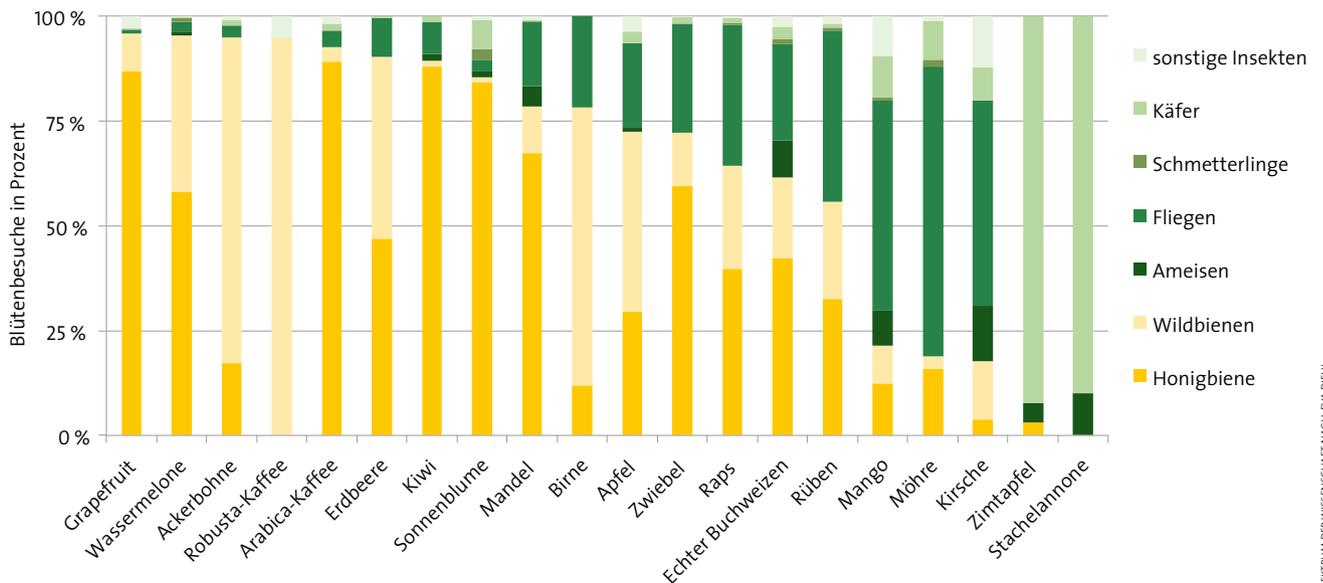
schen University of New England in Armidale mit rund 50 weiteren Forschern Kontakt auf, um für 20 wichtige Kulturpflanzen weltweit erstmals den Beitrag anderer Insekten zur Bestäubung zu berechnen. Die an der Kollaboration beteiligten Wissenschaftler trugen 39 Datensätze von insgesamt 480 Feldern auf fünf Kontinenten zusammen. Dafür hatten sie erfasst, wie oft Mitglieder verschiedener Insektengruppen die Pflanzen besuchen und wie gut sie dabei die Blüten befruchten. Unter diesen waren neben Bienen auch Fliegen, Käfer, Ameisen, Schmetterlinge, Wespen und andere.

Es zeigte sich, dass beispielsweise für Kaffee und Wassermelone vor allem verschiedene Bienen wichtig sind, während etwa Mango oder Möhre von den übrigen Arten stark profitieren (siehe Grafik unten). Hochgerechnet waren

die »Nichtbienen« für fast 40 Prozent der Blütenbesuche verantwortlich. Demnach erwies sich diese Gruppe aufs Ganze gesehen als genauso fleißig wie Honigbienen und übertraf sogar die Wildbienen, die gut 20 Prozent der Besuche tätigten.

Doch wie effizient befruchten die Tiere dabei tatsächlich die Blüten? Gemeinhin gilt die Honigbiene (*Apis mellifera*) als vielseitigster und bedeutendster Bestäuber in der industriellen Nahrungsmittelproduktion. Daneben gibt es in Deutschland rund 560 wilde Bienenarten, die hier ohne menschliches Zutun siedeln – von solitär nistenden Sandbienen (Gattung *Andrena*) bis zu den Staaten bildenden Hummeln (Gattung *Bombus*). Diese Wildbienen steigern laut einer aktuellen europäisch-amerikanischen Studie den wirtschaftlichen Ertrag um rund 3000 US-Dollar pro Hektar (*Nature Communications 6, 7414, 2015*). Das entspricht in etwa dem Beitrag der Honigbiene. Für

Blütenbesuche verschiedener Insektengruppen auf 20 Nutzpflanzen weltweit



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH EVA DIEHL



TOBIAS SMITH, UNIVERSITY OF QUEENSLAND

Schwebfliegen wie diese spielen eine bislang unterschätzte Rolle bei der Bestäubung von Kulturpflanzen.

andere Insekten gibt es bislang keine belastbaren Kalkulationen.

Unsere Berechnungen zeigen nun, dass auch die Bestäubungsleistung von Fliegen, Käfern und Co. zusammengenommen jener von Honig- beziehungsweise Wildbienen ungefähr gleichkommt. Ausschlaggebend dafür ist nämlich nicht nur, wie viele Blüten die Tiere ansteuern, sondern auch, ob sie den Pollen an der richtigen Stelle hinterlassen. Eine Wildbiene deponiert den Blütenstaub passgenau auf der Narbe und befruchtet daher sehr effektiv. Insgesamt bestäuben die Wildbienen daher ebenso viele Nutzpflanzen wie die Honigbiene oder die Gesamtheit der übrigen Insekten, obwohl sie weniger Blüten anfliegen.

Honigbienen und »Nichtbienen« befruchten hingegen nicht bei jedem Besuch. Die Honigbiene trifft die Narbe zwar sehr genau – allerdings nur dann, wenn sie beabsichtigt, Pollen zu sammeln. Ist sie eher am Nektar der Pflanze interessiert, berührt sie die Narbe beim Trinken oft nicht. So kommt es, dass die anderen Insektengruppen im Schnitt mit den bekannten Bienen gleichziehen können.

Darüber hinaus untersuchten wir, wie sich der Pflanzenwuchs in der Umgebung der Felder auf die Bestäubung auswirkt. Viele Wildbienen sind zum Nisten, Überwintern und für Futter auf geeignete Lebensräume angewiesen, etwa Hecken oder Blühstreifen in der Nähe der Äcker. Solche mussten aber in den letzten Jahrzehnten zunehmend landwirtschaftlichen Nutzflächen weichen. Das trägt nach Überzeugung vieler Experten heute maßgeblich zur Dezimierung zahlreicher Wildbienenpopulationen bei. Tatsächlich ergab die Studie: Je weiter entfernt der nächste naturnahe Lebensraum liegt, desto weniger Wildbienen besuchen die Felder.

Das gilt jedoch nicht für die übrigen Bestäuber. Manche ihrer Arten sind sogar ausgesprochen gut an das Leben in Agrarlandschaften angepasst: Die Larven der häufigsten Schwebfliegenarten etwa ernähren sich beispielsweise von Blattläusen, Kuhdung oder pflanzlichen Abfällen in stark überdüngten Gewässern.

Obwohl Einstein den eingangs zitierten Ausspruch in Wirklichkeit wohl nie gemacht hat – hätte er damit Recht ge-

habt? Der Rückgang vieler Wildbienenarten ist ohne Frage Besorgnis erregend; jedoch zeichnet dieses Szenario unsere Zukunft in zu düsteren Farben, denn dafür müssten gleichzeitig alle Bienenarten aussterben. Die weltweit fast 20 000 Wildbienenspezies sind aber an ein breites Repertoire von Umweltbedingungen angepasst.

Sollte dennoch etwa eine heimtückische Krankheit tatsächlich alle Bienen auf einen Schlag dahinraffen, so könnten die vielen anderen Insektengruppen Nutzpflanzen zumindest teilweise weiterhin bestäuben, wie unsere Ergebnisse zeigen. Es ist daher an der Zeit, nicht mehr allein auf die Honigbiene zu setzen, sondern die verkannten Bestäuber mehr ins Rampenlicht zu rücken und ihre Dienste bewusst zu nutzen. Wie auch die Wildbienen sollten wir sie nun weiter erforschen und schützen – quasi als Versicherung gegen das Bienensterben.

Frank Jauker forscht als Agrarökologe am Institut für Tierökologie und Spezielle Zoologie der Justus-Liebig-Universität Gießen. **Eva Diehl** ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Gießen.

KOSMOLOGIE

Gravitationswellen nachgewiesen

Forscher der internationalen LIGO-Virgo-Kollaboration haben erstmals Gravitationswellen direkt gemessen. Damit bestätigten sie das letzte der vier großen Postulate der allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein – und stoßen ein völlig neues Fenster zum Universum auf.

VON FELICITAS MOKLER

Als Bruce Allen am 14. September 2015 kurz vor der Mittagspause seine E-Mails durchsah, konnte er es erst nicht fassen: Die beiden LIGO-Detektoren in den USA sollen das Signal von Gravitationswellen gemessen haben? Mit seiner Arbeitsgruppe in Hannover ist der Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik maßgeblich an der Datenanalyse aller Detektoren des weltweiten Netzwerks beteiligt. Zwei seiner Mitarbeiter, Marco Drago und Andrew Lundgren, hatten das Signal als Erste auf ihrem Bildschirm bemerkt. Als es eintraf, war es in den USA Nacht, und die Kollegen dort schliefen.

»Es war selbst mit dem bloßen Auge so deutlich in den Rohdaten zu erkennen und sah so perfekt aus, dass wir anfangs Zweifel hatten, dass es echt war«, erinnert sich Allen. »Wir glaubten zunächst, jemand könnte ein Testsignal in die Detektoren eingespeist und dann vergessen haben, uns das mitzuteilen.« Auf diese Weise überprüfen die Physiker nämlich regelmäßig, ob alle Instrumentenkomponenten und Datenanalysemechanismen wie gewünscht funktionie-

ren. Doch nach eingehender Untersuchung war klar: Das Signal GW 150914 erreichte uns tatsächlich aus einer fernen Galaxie (*Phys. Rev. Lett.* 116, 061102). Vor mehr als einer Milliarde Jahren waren dort zwei Schwarze Löcher ineinandergestürzt und miteinander verschmolzen.

Gravitationswellen entstehen, so sagt es die allgemeine Relativitätstheorie voraus, wenn sich Materie beschleunigt bewegt. Der Effekt ist umso stärker, je massereicher und kompakter die Objekte sind und je schneller sie sich bewegen. So versetzen etwa Supernova-Explosionen, zwei miteinander verschmelzende Neutronensterne oder eben Schwarze Löcher die Raumzeit in Schwingung. Dennoch sind auch Gravitationswellen, wie sie von solchen turbulenten Ereignissen zu erwarten sind, extrem schwach – eine Herausforderung für die Messtechnik!

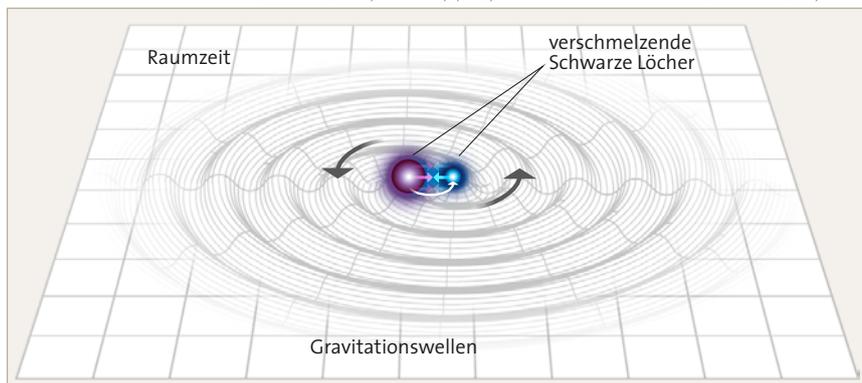
Deshalb hatten die Forscher des Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO) ihre beiden Detektoren, einen an der West- und einen an der Ostküste der USA, erst kürzlich

technologisch auf den neuesten Stand gebracht. Wie alle Experimente des Netzwerks arbeiten sie nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers. Nach der Modernisierung sollten sie nach und nach in der Lage sein, zehnmals schwächere Signale aus dem All einzufangen beziehungsweise weiter ins All hinauszuhorchen als zuvor. Damit erhöht sich die Ereignisrate mit potenziellen Signalen sowie die Chance, eines einzufangen.

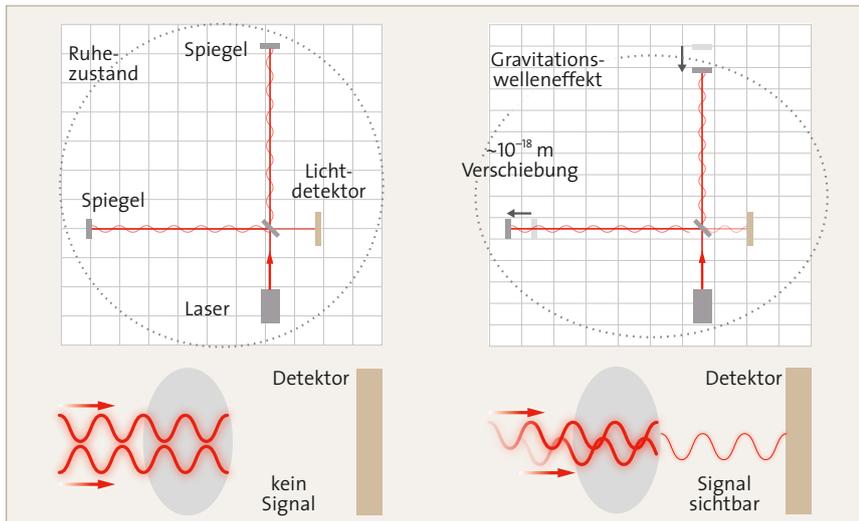
Die Wissenschaftler waren gerade dabei, die Testphase mit den erneuerten Instrumenten erfolgreich abzuschließen, als ihnen schon die ersten Gravitationswellen ins Netz gingen. »Das kam völlig unerwartet«, sagt Karsten Danzmann, ebenfalls Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, das mit der Leibniz Universität Hannover das deutsch-britische Experiment GEO600 betreibt, einen erdgestützten interferometrischen Gravitationswellendetektor in der Nähe von Hannover. Die Detektoren hätten alle wie geplant funktioniert, aber dass sie auf Anhieb so gut arbeiten und in der Lage sein würden, Gravitationswellen zu messen, damit habe niemand gerechnet.

Als Nächstes stand den Forschern eine aufwändige Datenanalyse bevor, die mehrere Monate in Anspruch nehmen sollte. Nachdem sie sämtliche externe Störquellen, so auch seismische wie Erdbeben, aber auch künstlich eingespeiste Testsignale als Ursache ausgeschlossen hatten, unterzogen sie ihre Messungen einem Signifikanztest. Dabei untersuchten sie die Wahrscheinlichkeit, mit der das Signal eine Fehlmesung auf Grund statistischer Schwankungen sein könnte. »Gerade bei Gravitationswellendetektoren sind solche

NIK SPENCER / NATURE; CASTELVECCHI, D., WITZE, A.: EINSTEIN'S GRAVITATIONAL WAVES FOUND AT LAST. NATURE NEWS, 11. FEB. 2016



Kreisen zwei Schwarze Löcher wie Doppelsterne umeinander, verlieren sie dabei Energie, die sie in Form von Gravitationswellen abstrahlen. Ihre Umlaufbahn wird dadurch immer enger; schließlich stürzen sie ineinander.



Die Gravitationswellendetektoren der LIGO-Virgo-Kollaboration arbeiten nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers: Zwei Laserstrahlen laufen senkrecht zueinander zwei Messarme entlang und werden an deren Enden von Spiegeln reflektiert. Zurück am Ausgangspunkt überlagern sich die beiden Strahlen und ergeben ein Signal bestimmter Helligkeit. In Ruhe ist es dunkel. Passiert eine Gravitationswelle den Detektor, staucht und dehnt sie den Raum im Interferometer. Die Laserstrahlen treffen dann in einer anderen Phase aufeinander, die Helligkeit am Ausgangssignal ändert sich.

Untersuchungen äußerst langwierig«, erklärt Danzmann. Denn zum einen sind statistische Ausreißer bei diesen Experimenten nicht nach dem typischen Muster einer Gaußkurve verteilt. Daher benötigt man besonders lange Messreihen, um die Wahrscheinlichkeit für einen Fehlalarm einschätzen zu können. Zum anderen lässt sich das Hintergrundsignal der Detektoren nicht frei von Gravitationswellen bestimmen. Denn anders als Fotodetektoren einer Kamera, die man in einem dunklen Raum testen kann, lassen sich die kosmischen Schwingungen niemals ausblenden.

Für das Ereignis GW 150914 liege die Wahrscheinlichkeit für einen falschen Alarm bei 1 in 200 000 Jahren, so Danzmann. Wissenschaftlich ausgedrückt entspricht das einer Signifikanz von mindestens 5,1. Damit gilt die Messung als zuverlässig. Oder wie es David Reitze von der LIGO-Kollaboration auf der Pressekonferenz am 11. Februar 2016 ausdrückte: »We did it!«

Selbst wenn oder gerade weil das Signal so markant ins Auge stach, lag es anfangs durchaus nahe, seinen kosmischen Ursprung zu bezweifeln. Denn gerade die allererste Detektion hatten sich die Forscher deutlich mühseliger vorgestellt. Sie waren davon ausgegangen, dass es selbst mit ausgeklügelten Algorithmen schwierig werden würde, das Signal aus den Daten herauszufiltern. Unter anderem vertrauten die Wissenschaftler aber auch deshalb letztlich in ihre Messungen, weil die De-

tektoren mittlerweile während des Wissenschaftsbetriebs von Mitte September 2015 bis Ende Januar 2016 noch weitere Male angeschlagen haben. Diese Signale stammen vermutlich ebenfalls von Gravitationswellen aus dem All. Allerdings werten die Forscher die Daten dazu derzeit noch aus – wir dürfen also gespannt sein.

Beinahe Lichtgeschwindigkeit

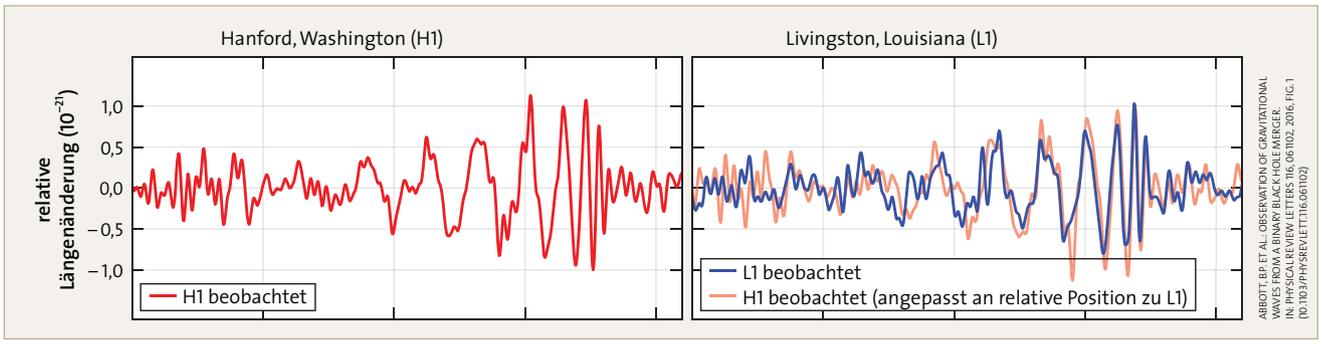
Aus der Wellenform, das heißt aus Frequenz und Amplitude der Messungen, von GW 150914 ermittelten die Wissenschaftler schließlich die astrophysikalischen Eigenschaften der Quelle, welche die Gravitationswellen ausgesandt hatte. Die Forscher hatten zwei Schwarze Löcher mit 29 beziehungsweise 36 Sonnenmassen dabei ertappt, wie sie einander gerade noch ein Dutzend Mal umrundeten, bevor sie miteinander verschmolzen.

Umkreisen sich solche kompakten Objekte in einem Doppelsystem, senden sie Gravitationswellen aus und verlieren dabei Energie. Dadurch laufen sie immer enger und schneller umeinander, Frequenz und Amplitude der emittierten Gravitationswellen nehmen zu. Während der letzten wenigen Orbits vor dem Crash sind diese Schwingungen der Raumzeit so stark, dass sie sich wie im Fall von GW 150914 auch noch in einer Entfernung von 1,3 Milliarden Lichtjahren messen lassen. Übrigens dauerte das Signal nur eine halbe Sekunde, denn die Schwarzen Löcher um-

kreisen sich zum Schluss mit nahezu Lichtgeschwindigkeit. Die vier Kilometer langen Messstrecken in den Detektoren änderten sich dadurch relativ zueinander um weniger als ein Tausendstel eines Protonendurchmessers. Bis das Signal die Erde erreichte, war es eine Milliarde Jahre unterwegs. Es stammt wahrscheinlich aus Richtung der Magellanschen Wolke, aber exakt lasse es sich nicht lokalisieren, so Gabriela González von der LIGO-Kollaboration. In der letzten Sekunde, bevor die beiden Schwarzen Löcher fusionierten, setzten sie 50-mal mehr Energie frei als alle Sterne des Universums zusammen zum selben Zeitpunkt.

Schwarze Löcher dieser Art können entstehen, wenn sehr massereiche Sterne am Ende ihres Lebens als Supernova explodieren. Dass die Überreste der Explosion aber eine derart große Masse haben könnten, hatten Fachleute bisher bezweifelt. Sie waren von weniger als 20 Sonnenmassen ausgegangen. »Mit dem Nachweis von Gravitationswellen haben wir zugleich die Existenz einer bestimmten Objektklasse bewiesen, von der wir zuvor gar nicht wussten, dass es sie gibt«, so Bruce Allen.

Anders als mit Gravitationswellen lassen sich Schwarze Löcher nämlich nicht beobachten. Denn ihre Schwerkraft ist so stark, dass aus ihnen nicht einmal Licht entweichen kann. Sind sie jedoch von Materie umgeben, wird diese extrem stark beschleunigt, bevor sie in das Schwarze Loch hineinstürzt, und



Am 14. September 2015 registrierten die LIGO-Detektoren, einer an der West- (H1) und einer an der Ostküste (L1) der USA, erstmals Gravitationswellen. Sie stammen von zwei miteinander verschmelzenden Schwarzen Löchern der 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernten Quelle GW 150914.

sendet dadurch energiereiche elektromagnetische Strahlung aus. Und die wiederum lässt sich mit gewöhnlichen Teleskopen messen. Derart machen sich Schwarze Löcher gelegentlich indirekt bemerkbar. Und wenn sie sich in einem Doppelsystem mit einem gewöhnlichen Stern befinden, können Astronomen aus der Bewegung der sichtbaren Komponente auf ihre Existenz schließen. Bei GW 150914 war aber beides nicht der Fall.

Bei ihrer Entdeckung hat den Forschern sicher auch das Glück ein wenig in die Hände gespielt. Denn dank der relativ hohen Masse des Systems huschten die Gravitationswellen von GW 150914 genau bei jenen Frequenzen durch die Detektoren, bei denen sie aktuell bereits fast zehnmal empfindlicher sind als vor dem Umbau – zwischen 60 und 250 Hertz. Ein gewaltiger Motivationsschub für die Physiker, die derzeit daran arbeiten, die Messgenauigkeit der Detektoren auch bei höheren Frequenzbereichen noch weiter zu verfeinern.

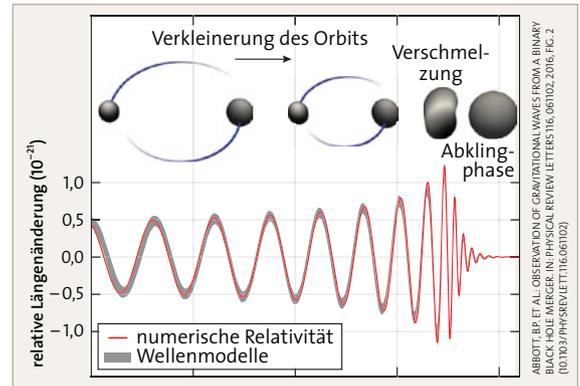
Während des nächsten sechsmonatigen Wissenschaftsbetriebs, der im Lauf des Jahres starten soll, erwarten die Forscher, regelmäßig Signale von Doppelsystemen mit stellaren Schwarzen Löchern wie GW 150914 in unterschiedlichen Entfernungen und damit aus verschiedenen Epochen einzufangen. Anhand einer ausreichend großen Stichprobe könnten sie dann etwas über die Geschichte solcher Systeme lernen. Vor allem hoffen sie darauf,

Der Verschmelzungsprozess der Schwarzen Löcher ist deutlich aus dem Verlauf des Gravitationswellensignals zu erkennen.

dann Gravitationswellen etwa von zwei miteinander verschmelzenden Neutronensternen oder von Doppelsystemen aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch einzufangen. Die Signale solcher Ereignisse liegen laut Berechnungen bei höheren Frequenzen als GW 150914.

Spätestens dann dürfte es auch für ihre Kollegen interessant werden, die im elektromagnetischen Spektrum nach einem Gegenstück zu Gravitationswellensignalen suchen. Denn theoretische Berechnungen sagen vorher, dass beim Verschmelzen zweier Neutronensterne energiereiche Gammastrahlung ausgesendet wird. Tatsächlich haben Astronomen bereits in der Vergangenheit helle Gammablitze beobachtet. Über deren Ursprung sind sie sich aber noch nicht einig. Ließen sich diese Beobachtungen mit einem Gravitationswellenergebnis in Verbindung bringen, könnten die Wissenschaftler ihre Theorien überprüfen.

Doch das wird nur der Anfang einer neuen Ära sein. Genau 100 Jahre ist es her, dass Albert Einstein die Existenz von Gravitationswellen vorhersagte. Jetzt ist es gelungen, diese Schwingun-



gen der Raumzeit experimentell direkt nachzuweisen. Damit ist das letzte von vier Postulaten der allgemeinen Relativitätstheorie bestätigt.

Physiker haben nun ein Werkzeug an der Hand, mit dem sie die Gesetze der Gravitation selbst unter extremen Bedingungen untersuchen können. Ob Einsteins Theorie in diesen Grenzbereichen konkurrierenden Ideen standhält, wird sich zeigen.

Für Astronomen tut sich mit dem Nachweis von Gravitationswellen jedenfalls ein weiteres Fenster zum Universum auf. Mit dem neuen Werkzeug können die Wissenschaftler auch die dunkle Seite des Kosmos erforschen – denn wir sehen nur einen winzigen Teil des Universums. 99 Prozent davon lassen sich nicht durch Beobachtungen im elektromagnetischen Spektrum (Licht, Radio-, Röntgen-, Gammastrahlung) erfassen. Dieser dunkle Anteil unterliegt aber der Wirkung der Gravitation. »Diesen nun endlich auch erforschen zu können, darin liegt unsere größte Hoffnung«, sagt Karsten Danzmann.

Felicitas Mokler ist Wissenschaftsjournalistin und freie Redakteurin in Heidelberg.

Graphen paaren ist leichter als gedacht

Die Entdeckung eines neuen, hocheffizienten Lösungsverfahrens für ein prominentes Problem der Informatik wirft neues Licht auf die Frage »P = NP?«.

VON ERICA KLARREICH



UNIVERSITY OF CHICAGO

László Babai, geboren 1950 in Budapest, zählt zu den weltweit führenden Forschern in der Komplexitätstheorie.

vielleicht ihm selbst, geglaubt hat, ein solches Resultat würde in den nächsten zehn Jahren herauskommen – oder überhaupt irgendwann.«

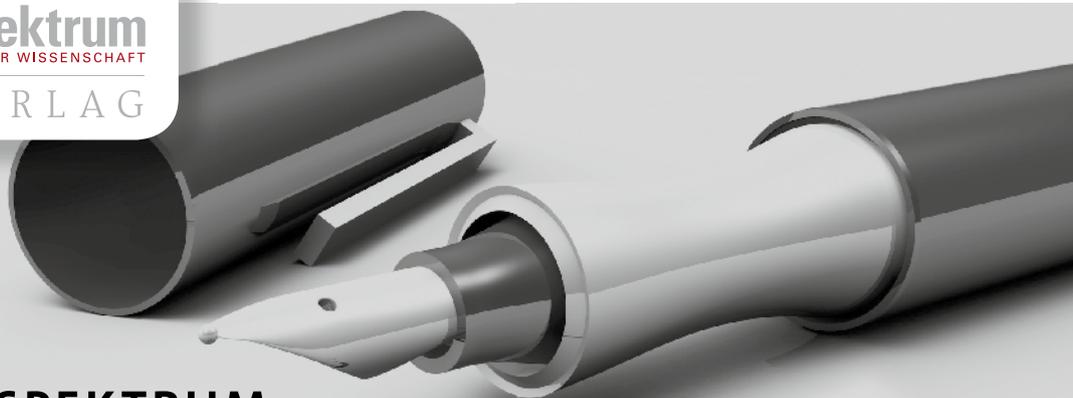
Babai selbst spricht nicht mit der Presse, solange die Fachkollegen seine Resultate nicht überprüft haben. Diese

In den undurchdringlichen Dschungel der Komplexitätstheorie ist allem Anschein nach eine bedeutende Schneise geschlagen worden: Der Informatiker László Babai von der University of Chicago hat einen neuen Algorithmus für eines der vertracktesten Rätsel der Informatik gefunden, das Graphenisomorphie-Problem (*»Graph Isomorphism in Quasipolynomial Time«, <http://arxiv.org/abs/1512.03547v2>, 19. Januar 2016*). So wie es aussieht, ist das

neue Verfahren um Klassen effizienter als sein Vorgänger, der immerhin mehr als 30 Jahre nicht übertroffen wurde.

Babais Ankündigung auf einem Vortrag am 10. November 2015 hat die Szene in helle Aufregung versetzt. »Wenn sein Werk der Nachprüfung standhält, dann ist es eines der großen Resultate des Jahrzehnts – oder sogar mehrerer Jahrzehnte«, so Joshua Grochow, ein Informatiker vom Santa Fe Institute. »Ich glaube nicht, dass irgendjemand, außer

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG



DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT

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

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

Ort: Heidelberg

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

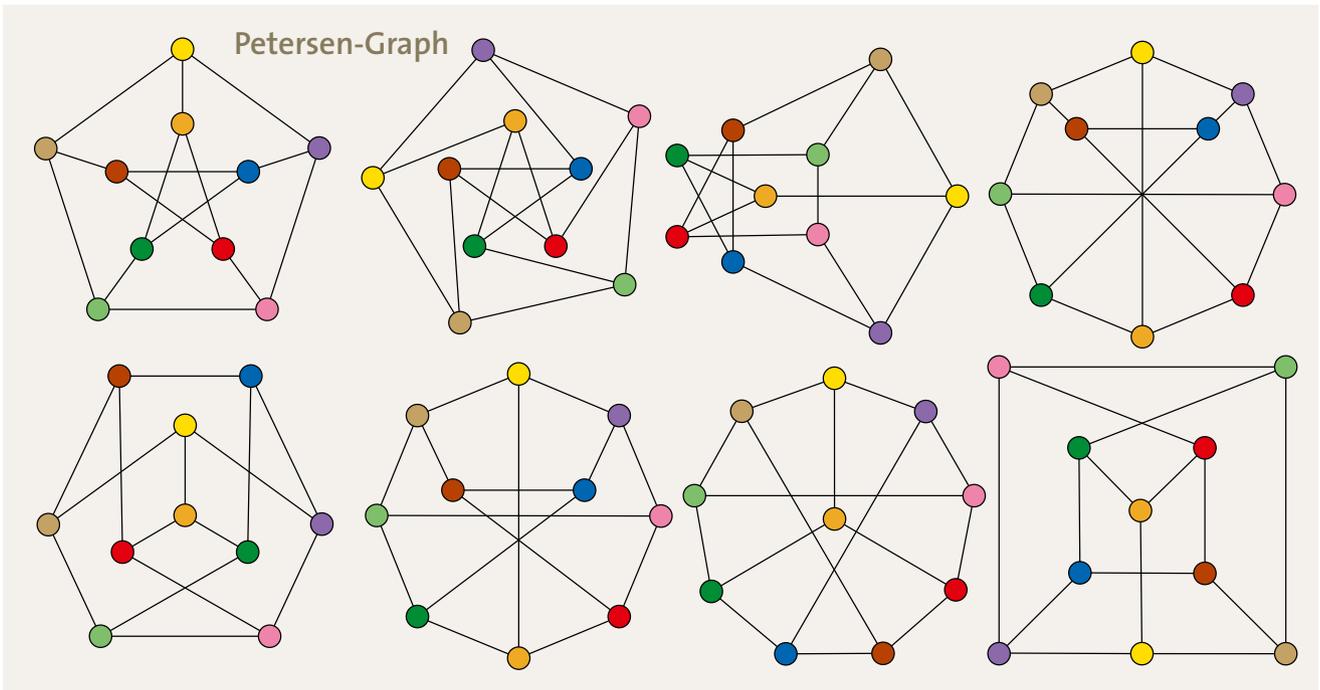
Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH POIPE

Diese so verschieden aussehenden Graphen sind sämtlich Erscheinungsformen des so genannten Petersen-Graphen und damit zueinander isomorph: Man kann jeden von ihnen in jeden anderen verwandeln, indem man die (durch Farben gekennzeichneten) Knoten samt anhängenden Kanten geeignet verschiebt.

sind allerdings optimistisch gestimmt, weil er sich mit seinen bisherigen Arbeiten einen erstklassigen Ruf erworben hat.

Partnervermittlung und das Graphenisomorphie-Problem

Die Komplexitätstheorie befasst sich mit der Frage, wie mühsam Probleme zu lösen sind, die man einem Computer anzuvertrauen pflegt. Genauer geht es um die Frage, wie der Aufwand zur Lösung eines Problems von dessen Größe abhängt, das heißt der Menge der zu seiner Beschreibung erforderlichen Daten. Um zwei große Zahlen zu addieren, muss ein Computer sich mit jeder Ziffer genau einmal befassen; also ist der Aufwand proportional der Problemgröße (Ziffernzahl) n . Multiplizieren erfordert bereits einen Aufwand in der Größenordnung n^2 , weil man jede Ziffer der einen Zahl mit jeder der anderen malnehmen muss. Aber Probleme dieser Klasse gelten noch als »leicht«, und zwar selbst dann, wenn der Aufwand »polynomial« ist, das heißt nicht nur

proportional zu n^2 , sondern zu irgend-einer Potenz n^k .

»Schwer« sind dagegen die Probleme, bei denen der Aufwand exponentiell mit der Problemgröße ansteigt, zum Beispiel proportional zu 2^n . Das ist typischerweise dann der Fall, wenn alle denkbaren Kombinationen (Reihenfolgen, paarweise Zuordnungen, ...) von n Elementen zu durchsuchen sind, wie bei dem berühmten Problem des Handlungsreisenden.

Das Graphenisomorphie-Problem, mit dem Babai sich befasst hat, scheint auf den ersten Blick zu den schweren zu gehören. Ein Graph ist eine Menge von Punkten (»Knoten«) auf dem Papier, von denen einige durch Linien (»Kanten«) verbunden sind. Auf die genaue Lage der Knoten kommt es dabei nicht an. Verschiebt man einen Knoten irgendwohin und nimmt die an ihm hängenden Kanten mit, so sieht das Gebilde auf dem Papier vielleicht ganz anders aus, ist aber eigentlich noch derselbe Graph: Beide Graphen sind »isomorph« – was ein Mensch nach eini-

gem Punkteverschieben kaum noch oder gar nicht mehr erkennen kann (Bild oben).

In der abstrakten Darstellung muss ein Graph nicht in einer seiner vielen Erscheinungsformen auf Papier gezeichnet sein. Es genügt, die Knoten zu nummerieren und in einer Liste aufzuführen, welcher Knoten mit welchem durch eine Kante verbunden ist. Das Graphenisomorphie-Problem (GIP) ist die Frage, ob zwei solcher Listen denselben Graphen beschreiben.

Man stelle sich vor, die Knoten des einen Graphen wären Männer, und zwischen zwei Männern besteht genau dann eine Kante, wenn die beiden befreundet sind. Entsprechend besteht der zweite Graph aus Frauen und deren Freundschaftsbeziehungen. Die Aufgabe ist nun, Männer und Frauen so zu verkuppeln, dass zwei Frauen genau dann miteinander befreundet sind, wenn das für ihre Ehemänner gilt. Wenn es eine solche Verpaarung (einen »Graphenisomorphismus«) gibt, dann sind die beiden Graphen isomorph.

Wollte man zur Lösung dieses Problems sämtliche möglichen Zuordnungen von Männern zu Frauen durchprobieren, wären das bei n Kandidaten $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n$ Möglichkeiten, was einem exponentiellen Wachstum des Auf-

wands mit der Problemgröße entspricht. Ganz so schwer ist GIP dann doch nicht. Es gibt nämlich Algorithmen zu seiner Lösung, die mit den allermeisten Graphenpaaren, auch per Zufall ausgewählten, schnell fertigwerden. Ihren theoretischen Rechenzeitbedarf schöpfen sie nur bei einigen Aufgaben aus, die man mühsam und böswillig zurechtbasteln muss. Darüber hinaus gibt es theoretische Indizien dafür, dass GIP im Niemandsland zwischen den beiden Klassen angesiedelt ist: leichter als die schweren Probleme und schwerer als die leichten. Außer dem GIP selbst liegt dort ein weiteres prominentes Problem: die Aufgabe, eine vorgegebene große Zahl in Primfaktoren zu zerlegen.

Babai hat nun den Schwierigkeitsgrad von GIP noch wesentlich besser

eingegrenzt. Es ist »fast leicht«, oder in Babais Worten: Sein Algorithmus erfordert einen »quasipolynomialen« Aufwand. Wenn P , die Klasse der leichten Probleme, eine Stadt wäre, dann wüssten wir jetzt, dass GIP »zumindest in einem Vorort dieser Stadt angesiedelt ist«, sagt Scott Aaronson, Komplexitätstheoretiker am Massachusetts Institute of Technology.

Es gibt gute Gründe für die Vermutung, dass es jedenfalls nicht in der anderen Stadt namens »NP-vollständig« liegt, in der die richtig schweren Probleme wohnen. GIP hat nämlich – unter anderem – eine merkwürdige Eigenschaft, die bisher bei keinem Einwohner von NP-vollständig nachgewiesen wurde: Es erlaubt einen »zero-knowledge proof« (siehe »Beweis mit null Ahnung«, unten).

Beweis mit null Ahnung

Wie kann ich beweisen, dass ich ein Geheimnis kenne, ohne das Geheimnis selbst preiszugeben? Wenn ich mich zum Beispiel gegenüber einer fernen Website legitimieren muss, aber mein Passwort nicht eintippen will, weil ich der anderen Seite misstrauere oder fürchte, dass die Leitung abgehört wird?

Ich kann mit meinem unbekanntem Geschäftspartner ein »zero-knowledge protocol« vereinbaren. Er stellt mir eine Folge von Fragen, die ich nur richtig beantworten kann, wenn ich das Geheimnis kenne; der Fragesteller kann jedoch aus den Antworten das Geheimnis nicht erschließen. Er erhält zwar den Beweis, dass ich das Wissen besitze, nicht aber das Wissen selbst (»zero knowledge proof«, siehe auch Spektrum der Wissenschaft 5/1995, S. 46).

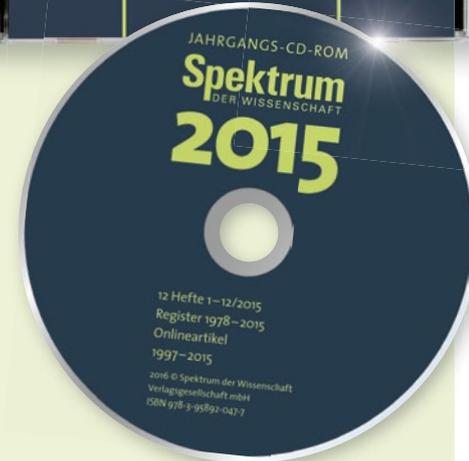
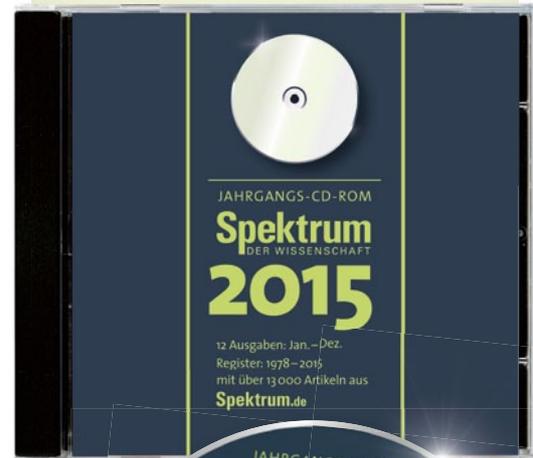
Vielleicht ist er sogar prinzipiell unfähig, das Wissen zu erwerben. Nehmen wir an, ein gewöhnlicher Mensch (»Arthur«) kann den Unterschied zwischen Coca-Cola und Pepsi nicht schmecken, bezweifelt sogar, dass es einen Unterschied gibt. Dem widerspricht ein weiser Mann (»Merlin«). Wenn Arthur Merlin sehr viele Proben brauner Brause in

neutralen Bechern zu trinken gibt, und Merlin nennt jedes Mal die richtige Sorte, dann bleibt Arthur nichts übrig, als einzugestehen, dass es einen Unterschied gibt – den er nach wie vor nicht wahrnehmen kann.

Ebenso kann Merlin nachweisen, dass er ein Graphenisomorphie-Problem im negativen Sinn gelöst hat – zwei vorgelegte Graphen sind nicht isomorph –, ohne vorzeigen zu müssen, wo genau sie sich unterscheiden. Arthur deformiert hinter einem schwarzen Vorhang beide Graphen A und B bis zur Unkenntlichkeit, indem er ihre Knoten verschiebt, und fragt Merlin, ob der Graph in seiner linken Hand A oder B ist. Wenn beide Graphen isomorph sind, kann Merlin es nicht wissen, weil die Frage sinnlos ist. Wenn er also immer wieder die richtige Antwort gibt, muss Arthur die Graphen als verschieden anerkennen, auch wenn er nach wie vor die Unterschiede nicht festmachen kann.

Noch nie wurde für ein NP-vollständiges Problem ein Verfahren gefunden, mit dem jemand beweisen könnte, dass er im Besitz einer Lösung ist, ohne diese Lösung preiszugeben.

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

Nachruf auf Moores Gesetz

Bisher verdoppelte sich die Leistung handelsüblicher Computerchips alle ein bis zwei Jahre. Damit ist es nun vorbei.

Es gibt Prognosen, die etwas augenzwinkernd zu verstehen sind – zum Beispiel Murphys Gesetz, benannt nach einem amerikanischen Raketeningenieur: »Alles, was schiefgehen kann, wird auch schiefgehen.« Schon ernster zu nehmen ist die Faustregel, die Gordon Moore, Mitgründer der Chipfirma Intel, 1965 formulierte: Alle ein bis zwei Jahre verdoppelt sich die Anzahl der Transistoren, die auf einen Mikroprozessor passen, und entsprechend steigt die Rechenleistung mit der Zeit exponentiell.

Ein derart explosives Wachstum muss unweigerlich irgendwann an seine Grenze stoßen, und zwar ziemlich plötzlich. Ein hypothetischer Teich, in dem sich der Algenbestand täglich verdoppelt, wird schon einen Tag, nachdem er halb zugewachsen ist, nur noch aus Algen bestehen. Für das scheinbar unaufhaltsame Wachstum der Computerleistung scheint nun dieser kritische Zeitpunkt gekommen zu sein: Mit dem Jahresbericht »International Roadmap for Devices and Systems« für 2016 nimmt die Halbleiterindustrie Abschied vom mooreschen Gesetz (*Nature* 530, S. 144–147, 2016).

Die entscheidende Triebfeder steigender Rechenleistung war bisher die Miniaturisierung der Transistoren. Um im Beispiel zu bleiben: Könnten die Algen im Teich bei jeder Verdopplung auf halbe Größe schrumpfen, so würde ihnen der Platz nicht knapp – bis sie zu winzig wären, um noch als Lebewesen zu funktionieren. Eine ähnliche Miniaturisierungsgrenze erreicht die kommerzielle Chipproduktion gerade.

Die kleinsten Bauteile messen heutzutage rund 14 Nanometer – weniger als die meisten Viren. In einigen Jahren hofft die Industrie bis zu zwei bis drei Nanometern vorzustoßen; dann würden die winzigsten Strukturen nur noch zehn Atome umfassen. Damit gerät die Siliziumtechnologie an ihre absolute Grenze.

Spätestens an dieser Schranke kommen Quanteneffekte ins Spiel – genauer gesagt die heisenbergsche Unbestimmtheit des Elektronenverhaltens –, deren Zählung bis auf Weiteres Zukunftsmusik bleibt. Quantencomputer, die mit verschränkten Partikeln arbeiten, sind erst im frühen Laborstadium; ebenso wie Chips, denen die Elektronenspins als Datenträger dienen. Solche Geräte dürften eines Tages spezielle Aufgaben in Bereichen bewältigen, wo die Fabrikationskosten keine große Rolle spielen: in der Grundlagenforschung und beim Militär. Ob sie je für kommerzielle Anwendungen taugen werden, ist derart fraglich, dass die Computerindustrie momentan andere Prioritäten setzt.

Der Trend geht hin zu Chips, die Recheneinheiten und winzige Sensoren integrieren. Mit solchen Bauelementen arbeiten heute bereits tragbare Digitalgeräte und intelligente Steuereinheiten für das »Internet der Dinge«. In großen Speicheranlagen, bei denen es auf weitere Miniaturisierung wenig ankommt, residieren die immensen Datenmengen der Cloud, auf die vernetzte Nutzer mit handlichen Geräten zugreifen; auch diese Smartphones und Wearables kommen mit dem derzeitigen Endstand der Miniaturisierung recht gut aus.

»Unten ist eine Menge Platz«, versicherte der Physiker Richard Feynman 1959 in einem visionären Vortrag, in dem er die heutige Nanotechnologie und miniaturisierte Computer vorhersah. Diesen Platz hat die Siliziumtechnik seither in Riesensprüngen erobert, und ihr Tempo gehorchte dabei dem mooreschen Gesetz.

Mit dem absehbaren Ende der exponentiellen Miniaturisierung hört die Entwicklung neuer Digitalgeräte gewiss nicht auf (siehe auch den Artikel S. 80). Aber es kommt nicht oft vor, dass man den Abschluss einer technologischen Ära als Zeitzeuge miterlebt!



Michael Springer

Für die entgegengesetzte Behauptung »GIP ist in P« sind die Indizien weniger überzeugend. Einerseits sind, wie gesagt, die Algorithmen meistens besser, als die Beweise garantieren. Andererseits ist GIP das, was die Informatiker ein »universelles Problem« nennen. Jede Frage nach der Gleichartigkeit zweier kombinatorischer Strukturen kann als Graphenisomorphie-Problem ausgedrückt werden, bis hin zu der Frage, ob zwei Sudoku-Rätsel eigentlich ein und dasselbe sind. Ein schneller Algorithmus für das GIP würde alle diese Probleme mit einem Schlag erledigen. »Normalerweise läuft diese Art von Universalität darauf hinaus, dass die Sache schwer ist«, sagt Grochow.

Nicht etwas leichter als schwer, sondern etwas schwerer als leicht

»Quasipolynomial« bedeutet: Babais Algorithmus löst das GIP nicht mit einem Aufwand der Größenordnung n^k mit konstantem k (das wäre polynomial), sondern der Exponent k wächst seinerseits sehr langsam mit n an. Demnach ist das Problem ein bisschen schwerer als leicht.

Nach dem bisherigen Stand der Dinge ist GIP ein bisschen leichter als schwer: Die Rechenzeit steigt geringfügig langsamer als exponentiell an. Der zugehörige Algorithmus stammt ebenfalls von Babai – eine Arbeit von 1983 gemeinsam mit Eugene Luks, Professor an der University of Oregon und mittlerweile emeritiert. Babai »nagt seit 40 Jahren an diesem Problem herum«, sagt Aaronson.

Statt naiv alle Zuordnungen durchzuprobieren, greift Babais neuer Algorithmus nur wenige, zum Beispiel zehn Männer und ebenso viele Frauen heraus und versucht deren Paarung zu einem kompletten Graphenisomorphismus zu vervollständigen. Das muss er für alle denkbaren Auswahlen tun, aber das sind größenordnungsmäßig n^{10} statt $n!$ Möglichkeiten – für $n = 1000$ immer noch eine astronomische Zahl, aber sie wächst nur noch polynomial in n .

Jeden der ausgewählten Männer färbt der Algorithmus mit einer anderen Farbe ein und die zugehörige Frau

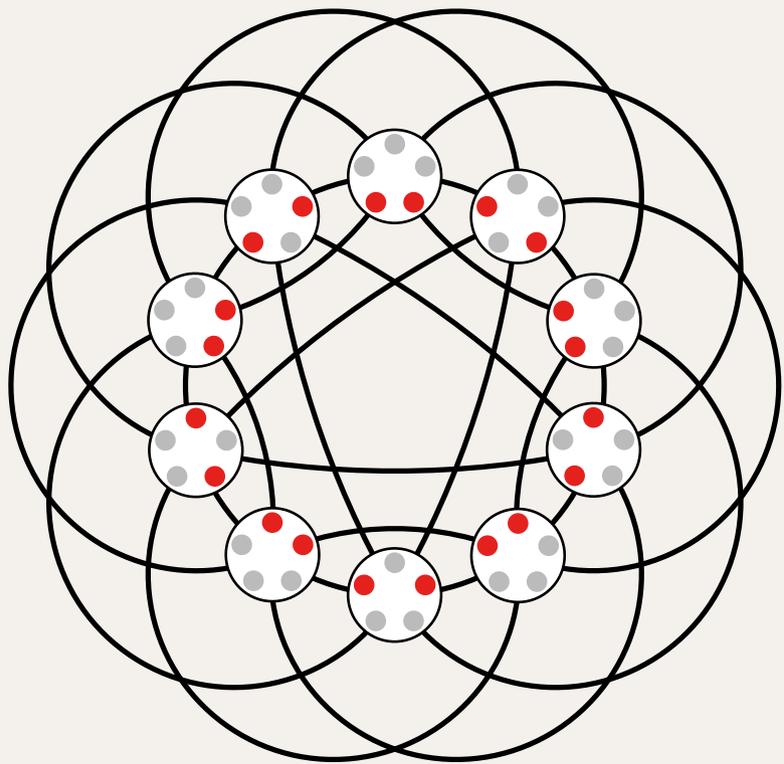
mit der Farbe ihres Partners. Damit nun ein Isomorphismus zu Stande kommen kann, sind gewisse Einschränkungen zu beachten. So darf der Algorithmus schon im ersten Schritt jedem Mann nur eine Frau zuweisen, die gleich viele Freunde hat wie er. Mehr noch: Für einen Freund des blauen Mannes kommt nur eine Freundin der blauen Frau als Partnerin in Frage. Um das zu dokumentieren, vergibt der Algorithmus neue Farben, zum Beispiel Gelb für jede Person, die mit einem blauen Menschen gleichen Geschlechts befreundet ist, Rot für jeden und jede mit einem blauen und zwei gelben Freunden und so weiter, bis jeder Mensch eine Farbe bekommen hat.

Quelle unaussprechlicher Trübsal: Die Johnson-Graphen

Jetzt gilt es, die noch Ungebundenen – alle bis auf die ursprüngliche Auswahl – zu verheiraten. Dabei sind nur Paare zulässig, deren Partner die gleiche Farbe tragen. Wenn es also sehr viele Farben und zu jeder Farbe nur wenige Kandidaten gibt, dann ist die Auswahl gering, und es gibt nicht viele Paarungen daraufhin zu überprüfen, ob sie Isomorphismen sind, das heißt nicht nur die durch die Farben ausgedrückten Bedingungen erfüllen, sondern alle.

Für den ungünstigen Fall, dass die meisten Knoten dieselbe Farbe bekommen, hat Babai ein anderes Verfahren entwickelt, um die Anzahl der Möglichkeiten zu reduzieren. Das funktioniert – es sei denn, die Graphen enthalten eine Struktur, die so symmetrisch ist wie ein so genannter Johnson-Graph (Bild oben). In diesem Fall liefern der Einfärbungsprozess und Babais zusätzliche Maßnahmen nicht genug Information, um dem Algorithmus den richtigen Weg zu weisen. Eine »Quelle unaussprechlicher Trübsal« seien diese extrem symmetrischen Gebilde für jeden, der versuche, das GIP durch Knotenfärben zu bewältigen. Doch es gibt einen Lichtblick: Mit anderen Methoden ist den Johnson-Graphen relativ gut beizukommen, und Babai konnte nachweisen, dass sie das Einzige sind, was seiner Färbungsmethode im Weg steht.

Johnson-Graph $J(5, 2)$



Der Johnson-Graph $J(n, k)$ hat als Knoten alle k -elementigen Teilmengen einer Menge mit n Elementen. Zwei Knoten sind durch eine Kante verbunden, wenn sie $k-1$ Elemente gemeinsam haben. Dieses Beispiel zeigt den Johnson-Graphen für $n=5$ und $k=2$.

Mit seinem neuen Algorithmus hat Babai das Problem sozusagen näher an die Klasse P herangebracht als je zuvor. Aber nach wie vor wissen wir nicht, ob es in der Stadt selbst liegt oder doch eher in einem Vorort. Letzteres »wäre die interessanteste Möglichkeit«, sagt Luca Trevisan, Informatiker an der University of California in Berkeley. Denn dann wäre GIP das erste echte (nicht eigens zu Beweiszwecken konstruierte) Problem, für das es einen quasipolynomialen, aber keinen polynomialen Algorithmus gibt, und »die Landschaft der Komplexität wäre viel reichhaltiger, als wir dachten«.

Wenn dem so sein sollte, wird der Beweis noch eine Weile auf sich warten lassen. Denn die Behauptung »GIP ist nicht in P« läuft auf die Aussage hinaus, dass GIP die Bereiche P und NP-vollständig trennt. Das wäre eine Lösung

des berühmten Problems »P=NP?«, auf die nicht umsonst eine Million Dollar Belohnung ausgesetzt ist.

Oder GIP befindet sich jetzt auf einer abschüssigen Bahn, an deren unterem Ende P liegt. Das, so Trevisan, sei das übliche Schicksal eines Problems, wenn man erst einen quasipolynomialen Algorithmus zu seiner Lösung gefunden habe. Aber: »Das Problem war bisher schon für viele Überraschungen gut. Vielleicht kommt da noch eine.«

Erica Klarreich hat in Mathematik promoviert und ist Wissenschaftsjournalistin in Berkeley (Kalifornien).



Nach der redigierten Fassung aus »Quantamagazine.org«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus der Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.

ARTENSCHUTZ

Haiwanderungen auf der Spur

Im Ostpazifik verfolgen Forscher die Aufenthalte und Routen der großteils bedrohten Fische mit Sendern. Die Signale erbringen überraschende Erkenntnisse.

Von A. Peter Klimley



Walhaie, die mit bis zu 15 Metern größten Fische, sind wenig ortstreu und schwimmen über riesige Distanzen. Doch zum Fressen und Gebären suchen sie ganz bestimmte flache Meeresgebiete auf.



Dieses Erlebnis steht mir nach über 30 Jahren vor Augen, als wäre es gestern gewesen. Mit einem kleinen Motorboot fuhren wir im Golf von Kalifornien in die Bahía de La Paz hinaus auf die ziegelroten Klippen der unbewohnten Insel Espíritu Santo zu, rund 150 Kilometer nördlich der Südspitze der Baja California. Auf dem Weg sahen wir in dem klaren, blauen Wasser keinen einzigen Fisch, doch plötzlich wurde es rundum lebendig. Überall spritzte es, weil sich unzählige Meerestiere über Rippenquallen, Krillkrebse und dergleichen hermachten. Mit einem surrenden Geräusch stieg ein fliegender Fisch auf der Flucht vor einer Goldmakrele in die Luft. Wir hatten den Unterwasserberg El Bajo erreicht, der aus über 1000 Meter Tiefe bis 20 Meter unter den Meeresspiegel aufragt.

Hastig legten mein Doktorvater Donald Nelson (1937–1997) und ich Schwimmflossen, Taucherbrillen und Schnorchel an und sprangen mitten hinein ins Gewühl. Die obere Wasserschicht wimmelte von kräftig gefärbten Makrelen, so weit das Auge reichte. Etwas tiefer tummelten sich Mangrovenschnapper (Graue Schnapper) von der Größe kleiner Hunde in einem riesigen ringförmigen Schwarm. Und schließlich begegneten wir einer Formation von über 100 Bogenstirn-Hammerhaien (*Sphyrna lewini*). Ich holte mehrmals tief Luft und tauchte dann durch ihren Schwarm hindurch ... die über drei Meter langen Kolosse wichen einfach ein wenig nach rechts und links aus. In 30 Meter Tiefe bewunderte ich ihre dunklen Silhouetten von unten. Als ich wieder zur Oberfläche kam, hinterließen laichende Zackenbarsche aufwärtsstoßend große weiße Wolken.

Warum versammelt sich eine solche Lebensfülle im Meer an einem Fleck, während weite Gebiete darum herum wie ausgestorben wirken? Das Phänomen hat mich seither nicht mehr losgelassen. Im Grunde ist es leicht erklärbar. Ähnlich wie die Windgeschwindigkeit an einem Gebirgspass zunimmt, weil die Luft da eine engere Passage zu überwinden hat, wird eine Meeresströmung dort schneller, wo das Wasser zwischen einem hohen Unterwassergipfel und der Wasseroberfläche hindurchfließt. Dadurch konzentriert sich hier viel Krill, der vorher locker verteilt war: ein Schlaraffenland für Plankton fressende Fische – von denen wiederum andere Arten leben.

Jedoch beobachten Meeresforscher schon länger, dass die Tierbestände an solchen »Hotspots« der Ozeane, auch im östlichen Pazifik, auf Grund menschlicher Aktivitäten bedenklich abnehmen: durch Überfischung und nicht zuletzt den massenhaften Beifang, der dann doch verworfen wird. Wegen der immer gebräuchlicheren riesigen Treib- und Stellnetze schrumpft insbesondere auch die Zahl und Vielfalt der Haie seit Jahrzehnten merklich. Der Bogenstirn-Hammerhai wird bereits als stark gefährdet eingestuft. Anderen Mitgliedern seiner Familie, wie dem bis sechs Meter langen Großen Hammerhai (*Sphyrna mokarran*) und dem vier Meter messenden Glatten Hammerhai (*S. zygaena*) geht es nicht viel besser. Der Handel mit diesen Arten unterliegt nach dem Washingtoner Artenschutzübereinkommen (CITES) strenger internationaler Kontrolle.

Allerdings ist zu befürchten, dass die Bestimmungen nicht ausreichen werden, um selbst die gegenwärtigen Bestands-

BARRY PETERS / CC-BY-2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.0/LEGALCODE) / HAMMER FROM COCOS ISLAND, COSTA RICA (WWW.FLICKR.COM/PHOTOS/71403236@N00/4242623174)



Bogenstirn-Hammerhaie kehren nach ihren nächtlichen Beutezügen gern zu vertrauten Felsen und Inseln zurück. Auf ihren Wegen orientieren sie sich an Magnetfeldlinien von Lavafeldern.

HAIFISCHPARKS IM OSTPAZIFIK

1 Die **Populationen** der Haie schrumpfen weltweit seit Jahrzehnten dramatisch. Viele Tiere werden nur wegen ihrer Flossen erlegt, noch mehr verenden aber als Beifang der Fischerei. Auf Grund ihrer **langsamen Fortpflanzung** können sich die Bestände von allein nicht erholen.

2 Die meisten Arten sind relativ **ortstreu** und halten sich bevorzugt an **ökologischen »Hotspots«** nahe Küsten und Inseln sowie auf dem Kontinentalschelfrand auf.

3 Haiforscher plädieren für einen **absoluten Schutz** in solchen ausgewiesenen Gebieten. Auch in Flachwasserbereichen, wo die Jungen zur Welt kommen und heranwachsen, sollte **Fischerei** nur eingeschränkt betrieben werden.

dichten zu bewahren. Wandernde Tiere halten sich nun einmal nicht an Staatsgrenzen. Die Bestände werden stärker reduziert, als sie sich erholen können, denn Haie vermehren sich sehr langsam. Viele Populationen sind schon zusammengebrochen. Für den Ostpazifik empfehlen meine Kollegen und ich deshalb, Schutzgebiete auszuweisen, in denen jegliche Haifischerei verboten ist, vor allem auch als Beifang. Das Ansinnen mag manchem widersinnig vorkommen. Schließlich sind Haie eher als blutdürstige Fressmaschinen verschrien und höchstens wegen ihrer Flossen geschätzt. Diese Geldquelle dürfte allerdings bald versiegen.

Unsere Idee von umrissenen »Haiparks« entstand, weil wir – rund ein Dutzend Forscher aus mehreren Ländern – seit mehreren Jahrzehnten Aufenthaltsorte und Routen verschiedener Arten dieser Knorpelfische, darunter sogar des riesigen Walhais, in diversen Gegenden im Ostpazifik aufgezeichnet und ausgewertet haben. Dabei entdeckten wir feste Muster, die erkennen lassen, dass relativ kleine Schutzzonen viel bewirken würden, welche die hauptsächlichen Ruhe- und Jagdgebiete sowie jene Regionen umfassen, wo die Jungen zur Welt kommen und die ersten Jahre leben.

Nach unseren Beobachtungen halten sich viele Haie vorzugsweise an bestimmten Küsten, festen Inseln oder Unterwasserbergen und im Umkreis von mehreren Kilometern dazu auf. Einen Großteil des Tages – oder der Nacht – verbringen diese Arten meist relativ ruhig nah am Land und oft sogar nur an einigen besonderen Stellen. Zu mehr oder weniger festen Zeiten ziehen sie von dort aus täglich auf Nahrungssuche. Ein Hammerhai beispielsweise schwimmt von seinem Ruheort zum Fressen bis zu 20 Kilometer weit und findet jedes Mal zu einem bestimmten Berg im Meer zurück. Doch wie gelingt ihm das? Optische Landmarken als Orientierungshilfe fallen aus. Im Ozean sieht man selbst in klarem Wasser und dicht unter der Oberfläche kaum 30 Meter weit. Und das Tier schwimmt auch nicht nah über dem Boden. Mit Unterstützung der National Science Foundation der USA haben wir diese Frage erforscht.

Des Rätsels Lösung: Hammerhaie richten sich nach der variierenden Stärke von magnetischen Feldern des vulkani-

schen Basalts. Die Polung des Erdmagnetfelds hat in der Erdgeschichte öfter gewechselt. Am Eisenerz Magnetit in Ablagerungen aus den entsprechenden Zeiten lassen sich solche Umpolungen ablesen. Derart spiegeln auch die Lavafelder rund um die meist vulkanischen Inseln sowie Unterwasserberge im Meer ihre Entstehungszeit. Typischerweise strahlen von ihnen am Meeresboden Lavazonen mit unterschiedlicher Polarisierung aus. Stammt der Basalt aus einer Phase, als das Erdmagnetfeld dem heutigen entsprach, so addiert sich die magnetische Intensität in diesem Bereich zu einem höheren Wert, und umgekehrt.

Solche Unterschiede können die von uns im Gebiet um den Berg El Bajo untersuchten Haie anscheinend erkennen. Wenn sie nämlich zum Fressen fortschwimmen und später wieder zurückkehren, folgen sie Linien entlang der magnetisch stärkeren oder schwächeren Bereiche des Untergrunds, als würden sie sich nach Bergzügen oder Tälern einer magnetischen Reliefkarte orientieren. Die britische Biologin Margaret Klinowska hatte bereits Mitte der 1980er Jahre vermutet, dass Wale Magnetfeldlinien folgen. Sie glaubte, wenn die Meeressäuger an der Westküste Großbritanniens stranden, würden sie von magnetischen Bändern irreführt, die dort wegen der tektonischen Plattenverschiebungen die Küstenlinie queren.

Nahkontakt zu Haien zum »Besendern«

Meine Kollegen und ich zeichneten die Bewegungen der Haie mit Hilfe von an den Tieren befestigten Sendern auf, die für jedes Individuum charakteristische Signale abgaben. An ihren Rückzugsorten bei Unterwasserbergen tauchten wir zu ihnen hinab und schossen die Sender mit einem speziellen Speer (pole spear) auf sie ab, wie man sie zum Fischfang benutzt. Der Sender blieb dann in der Haut haften. Zum Auffangen der Signale von Ultraschallsendern verwendeten wir Unterwassermikrofone, die an den Rändern der steilen, in die Tiefe ziehenden Berghänge verankert waren. So konnten wir auch deren Richtung bestimmen. Ebenfalls mit Ultraschallsendern erkundeten wir die im offenen Meer vom Hai zurückgelegten Distanzen. Dazu peilten wir den Fisch von einem Boot aus mit einem Unterwasserrichtmikrofon an und fuhren in die ermittelte Richtung. Sobald wir uns über dem Fisch befanden, bestimmten wir die Position mittels GPS.

Für weitere Fragestellungen nutzten wir das Satellitenortungssystem Argos, mit dessen Hilfe Forscher Wander- und Zugrouten vieler Tierarten aufzeichnen. Satellitensender verwendeten wir vor allem auch für Haie, die nicht oder unregelmäßig zum selben Berg zurückzukehren pflegen. So konnten wir sogar Walhaie (*Rhincodon typus*) verfolgen, die mit bis zu 15 Meter Länge größten Fische. Ein Sendertyp erfasste mit einem Chip zugleich die Lichtintensität, was auch Auskunft über die Wassertiefe gab. Nach einer bestimmten Zeit löste sich das Gerät, stieg zur Oberfläche und schickte seine Daten zu den Satelliten. Bei einem anderen Modell, das Signale einer sehr stabilen Frequenz aussendete, erfassten die Satelliten die Position des Hais anhand der Doppler-Ver-

schiebung, wenn die Funkantenne aus dem Wasser ragte und das Tier unter ihnen schwamm. Mit solchen Messungen erkannten wir: Auf ihren täglichen Zügen etwa vom Ruheort zu einem Jagdgebiet schwimmen Haie ungefähr 3,6 Stundenkilometer schnell oder einen Meter pro Sekunde.

Als erstes Tier hatten wir im Golf von Kalifornien bei Espíritu Santo einen Bogenstirn-Hammerhai 24 Stunden lang geortet. Er verließ den Unterwasserberg bei Einbruch der Dunkelheit und kam mit Tagesanbruch zu unserem Erstaunen schnurstracks an denselben Berg zurück. Dazwischen war er 20 Kilometer weit hinausgeschwommen und hatte später genau um 180 Grad kehrtgemacht. Sein Hin- und Rückweg führte ihn entlang einer Linie zwischen einem stark ansteigenden magnetischen »Bergzug« und einem magnetischen »Plateau«. Ähnlich wie dieses Tier verhielten sich alle anderen Hammerhaie, denen wir am selben Unterwasserberg folgten. Tagsüber blieben sie sämtlich an dem Felsen als Gruppe beisammen, nachts zogen sie bis zu 20 Kilometer weit fort. Den Hin- und Rückweg pflegten sie stets rasch auf erstaunlich gerader Strecke zurückzulegen, wobei sie allerdings wie ein Jojo öfter die Wassertiefe wechselten. Am entferntesten Punkt des Ausflugs schossen sie in ziemlicher Tiefe in einem kleinen Bereich hin und her. Wir vermuten, dass sie dort auf lumineszierende Tintenfische trafen, die sie jagten – ihre Hauptnahrung. Dafür spricht auch das von den Sensoren gemessene schwache Licht, welches die Geräte in dieser Tiefe sogar in mondlosen Nächten registrierten.

Uns interessierte, ob sich Haie andernorts ähnlich benehmen würden wie im Golf von Kalifornien. Dazu haben wir bei einer Anzahl weit voneinander und meist auch weit vom Festland entfernter Inseln im Ostpazifik viele dieser Fische

auf die gleiche Weise beobachtet (siehe Karte »Der Ostpazifische Korridor«). Bei den Galapagosinseln unternahm mein damaliger Doktorand James Ketchum und ich gemeinsam mit Alex Hearn von der University of California in Davis, der damals die Fischereiforschung der Charles-Darwin-Forschungsstation von Ecuador leitete, Expeditionen zur Wolf- und zur Darwininsel. Diese liegen 35 Kilometer auseinander ein paar hundert Kilometer nordwestlich des eigentlichen Galapagosarchipels.

Wo sich das Leben tummelt: Hotspots im Ozean

An der Wolfinsel konnte Ketchum etliche einzelne Haie bis zu 48 Stunden lang akribisch verfolgen. Einer der Hammerhaie etwa schwamm die meiste Zeit, die er in Küstennähe verbrachte, vor der Landzunge Shark Point im Osten. Einer der Galapagoshaie (*Carcharhinus galapagensis*) trieb sich zwar auch vorwiegend dort herum, verweilte aber zwischendurch am Abhang des Vulkankraters im Norden der Insel. Da an der erwähnten Landzunge überdies häufig Schulen von Delfinen sowie ganze Scharen von Makrelen, Schnappern und Gelbflossentunfischen anzutreffen sind, scheint es auch in diesem Gebiet eng umrissene Orte zu geben, wo sich das Leben bevorzugt tummelt.

Je mehr Daten wir von verschiedenen Inseln zusammentrugen, um so deutlicher wurde, dass sich die zahlreichen Haiarten in ihrem Ortsverhalten in wenigstens drei Gruppen einteilen lassen: Manche Spezies bleiben in der Regel rund um die Uhr nahe bei der Insel; einige Arten schwimmen während des Tages, andere vorzugsweise während der Nacht fort, kehren aber wieder zurück; und wieder andere sind nicht ortsfest, sondern vagabundieren umher.

Der Ostpazifische Korridor



Westlich von Mittel- und dem nördlichen Südamerika erstreckt sich ein ökologisch hochwertiges, artenreiches Meeresgebiet: der Ostpazifische Korridor. Biologische »Hotspots« bilden darin die weit verstreuten Inseln und Unterwasserberge, die meist vulkanischen Ursprungs sind. An ihnen halten sich Haie bevorzugt auf.



Dieser Bullenhai oder Gemeine Grundhai (*Carcharhinus leucas*) ist als Beifang verendet. Durch solche ungewollte Fischerei sind viele Haiarten inzwischen ernstlich bedroht.

FIONA AYERST / MARINE PHOTOBANK

Zur ersten Gruppe zählt der Weißspitzenriffhai (*Triaenodon obesus*) mit seiner auffallenden hellen Rückenflössenspitze. Mauricio Hoyos-Padilla, Direktor der mexikanischen Organisation Pelagios Kakunjá, hat diese Fische am Roca Partida bei den Revillagigedo-Inseln mit individuellen Markierungen versehen. Wie sich herausstellte, jagt der bis 1,60 Meter messende Fisch nachts und in der Dämmerung sehr agil, doch tagsüber liegen die erwachsenen Tiere ruhig auf schmalen Felsvorsprüngen. Sie müssen nicht wie viele ihrer Verwandten immerfort in Bewegung sein, um den Kiemen frisches Wasser zuzuführen.

Hammerhaie ziehen, wie schon erwähnt, über Nacht zur Jagd kilometerweit hinaus ins offene Meer. Bei der Wolfinsel trafen wir oft große Schulen von ihnen direkt am Absatz zur Tiefsee an. Manchmal verlässt ein einzelnes Tier den Schwarm, schwimmt auf die Insel zu und sucht bei einem großen Felsen eine »Reinigungsstation« auf. Dort hält der Hai ganz still, während kleine Fische seine Haut von Parasiten säubern.

Dagegen bleiben Galapagoshaie gewöhnlich rund um die Uhr an der Küste – auch wenn es vorkommt, dass sie des Nachts etwas weiter hinausschwimmen. Als Erwachsene sind sie rechte Einzelgänger, doch die Halbwüchsigen bilden Schulen, die uns oft umkreisten, wenn wir zum Markieren von Hammerhaien im Wasser waren. Diese Arten legen überdies manchmal sehr weite Strecken zurück. Von Wolf aus wanderte einer der sechs besenderten Hammerhaie im Verlauf von zwei Monaten 600 Kilometer weit nach Westen. Ähnlich weit und in die gleiche Richtung zog einer der zehn markierten Galapagoshaie.

Der bis über vier Meter lange Schildzahnhai (*Odontaspis ferox*) mit seinen auffälligen mehrspitzigen Zähnen bildet beim »Monsterriff« des Malpelo-Archipels, 500 Kilometer westlich von Kolumbien, in mehr als 30 Meter Tiefe kleine Gruppen. Zusammen mit Sandra Bessudo und German Soler von der Malpelo-Stiftung habe ich die Fische mit Sendern bestückt. Ein markiertes Exemplar pendelte den ganzen März lang tagsüber zwischen diesem und einem anderen Riff hin- und her. Im nächsten Monat wechselte sein Verhalten: Nun besuchte derselbe Hai stattdessen jede Nacht tiefe Gewässer rund um die Insel. Ebenfalls zu den vorwiegend am Tag jagenden Arten zählt der über drei Meter lange Seidenhai (*Carcharhinus falciformis*). Ein bei der Wolfinsel besendertes Exemplar verschwand von Mitte Mai bis Mitte Juli stets tagsüber ins offene Meer. Seidenhaie wandern auch große Strecken. Das wiesen wir an Individuen nach, die wir bei den Galapagosinseln, der Kokosinsel und den Revillagigedo-Inseln vor der Baja California markiert hatten.

Ausgesprochene Nomaden sind die hell gefleckten Walhaie. Bei den Inseln im Ostpazifik erscheinen sie immer nur kurzfristig – deswegen und auf Grund ihrer Größe trägt die Darwininsel, wo sie oft zu sehen sind, bei Tauchern den Spitznamen »Bushaltestelle«. Ein solcher Riese, den wir dort kurzzeitig beobachteten, hielt sich an einem Tag acht und am nächsten zwölf Stunden auf, danach ward er für den Rest des Jahres nicht mehr gesehen.

Es war eine besondere Herausforderung, Walhaie mit Satellitensendern auszustatten. Da sie Krill und höchstens kleine Fische fressen, betrachten sie Menschen zwar nicht als potenzielle Beute, und mit der Schwanzflosse schlagen sie eher

langsam, aber sie können ziemlich schnell abtauchen. Alex Hearn von der University of California in Davis hatte die Idee, an seiner Taucherflasche einen Propeller zu befestigen, mit dem er viel schneller vorwärtskam. Es gelang uns schließlich, 2011 und 2012 fast 40 Walhaie bei den Galapagosinseln mit Sendern zu versehen und längere Zeit zu verfolgen.

Wie sich dabei herausstellte, legen sie tatsächlich oft Entfernungen von teils einigen tausend Kilometern zurück (siehe Karte »Walhaie auf Wanderschaft«). Einige von ihnen zogen nach Westen bis weit in nährstoffarme Regionen des Ostpazifiks. Andere wanderten Richtung Südamerika und parallel zur Küste nach Süden, vermutlich in den nährstoffreichen Humboldtstrom. Unerwarteterweise suchten diese Tiere plötzlich wieder küstenfernere planktonarme Gewässer auf. Und zwar waren das fast nur Weibchen mit deutlich geschwellenem Bauch, die wohl kurz vor der Geburt standen.

Über 50 Walhaie markierte Héctor Guzmán vom Smithsonian Tropical Research Institute in Panama-City in den Jahren 2009 bis 2012 bei der Insel Coiba und bei den Perleninseln. Dort sammeln sie sich alljährlich für mehrere Monate zum Fressen. Viele der Haie von Coiba wanderten anschließend nach Westen und Süden in Richtung der Kokos- und Malpelainseln, näherten sich den Galapagosinseln im Norden bis auf 300 Kilometer und zogen dann wieder nach

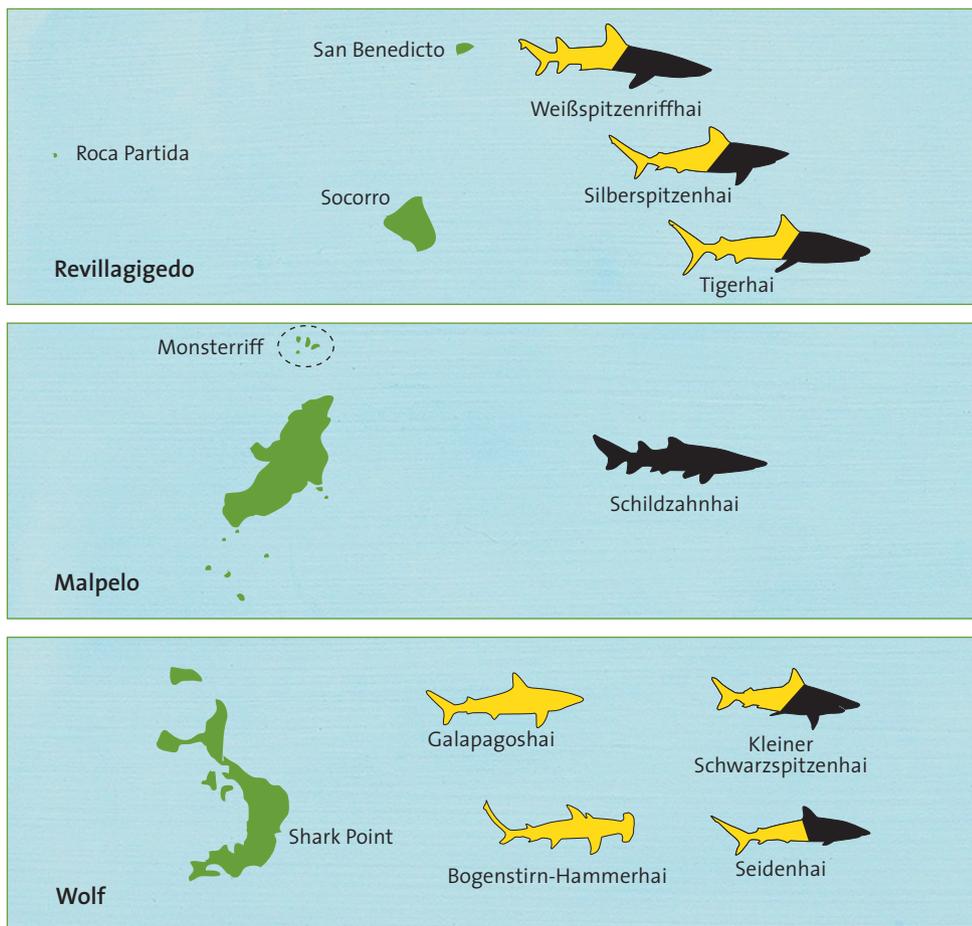
Nordosten an der Insel Gorgona vorbei bis dicht vor die Küste Kolumbiens. Andere von Guzmán markierte Walhaie schwammen entlang der mittelamerikanischen Küste bis zum Golf von Tehuantepec im südlichen Mexiko.

Wirtschaftsfaktor Haiökotourismus

Ein Walhai bewegt sich in dieser Region somit durchaus im gesamten Gebiet des so genannten Ostpazifischen Korridors, der das Meer von Mexiko bis Peru mitsamt allen Inseln einschließlich Galapagos umfasst. Ökologisch ist dies wegen seiner hohen biologischen Diversität und den hier zusammen treffenden teils warmen, teils nährstoffreichen kalten Meeresströmungen ein »Hotspot« ersten Ranges.

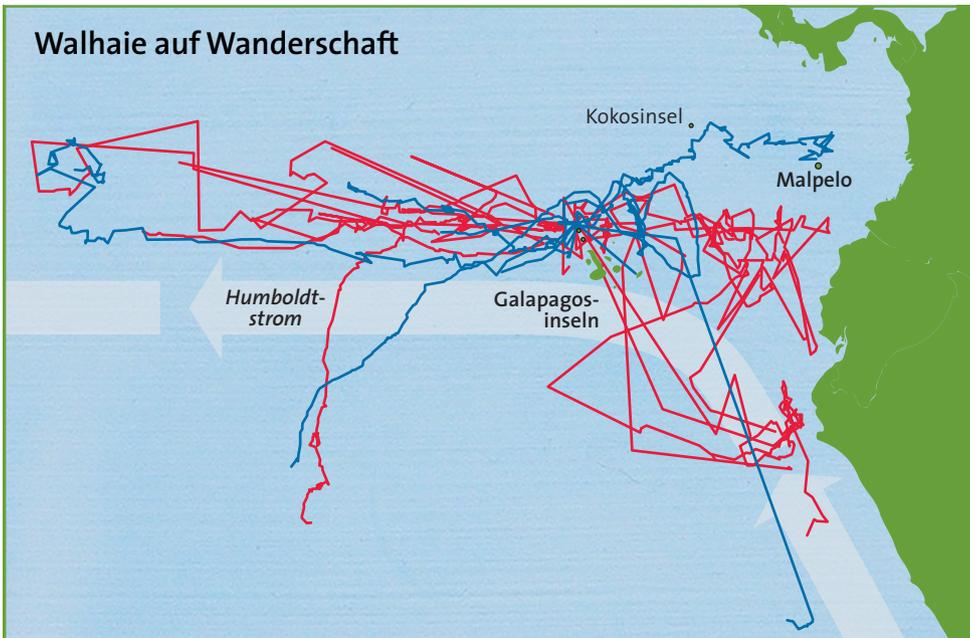
Fast alle erwähnten Inseln sind inzwischen beliebte Ziele für Hobbytaucher, und Haiökotourismus stellt vielerorts einen bedeutenden – und wachsenden – Wirtschaftsfaktor dar. Im Gegensatz dazu war und ist Haifischerei selten auf Dauer nachhaltig. Die sehr langsam wachsenden, in der Regel lebend gebärenden Tiere vermehren sich viel zu langsam, als dass sich ihre Bestände rasch von Eingriffen erholen könnten. Bogenstirn-Hammerhaie etwa werden erst mit 10 bis 15 Jahren geschlechtsreif, und die Weibchen bekommen dann nur alle zwei Jahre zwischen 15 und 31 Junge. Bei einigen Arten ist deren Zahl noch niedriger.

Nachtschwärmer und andere



Die einzelnen von den Forschern beobachteten Haiarten hatten unterschiedliche Aktivitätsmuster. Manche hielten sich an dem jeweils ausgewählten Archipel sowohl tags als auch nachts auf (gelb / schwarz), andere nur am Tag (gelb) oder fast nur in der Nacht (schwarz).

Walhaie auf Wanderschaft



Bei den Galapagosinseln markierte Walhaie schwammen in wenigen Monaten mehrere tausend Kilometer weit (rot: Daten von 2011; blau: 2012). Manche von ihnen zogen nach Osten oder Südosten zu anderen Inseln oder in die Nähe der Festlandküste. Andere kamen weit nach Westen. Das Galapagosarchipel liegt rund 1000 Kilometer vom südamerikanischen Festland entfernt.

Die meisten Haie, die in Netze gehen, sind entweder schwangere Weibchen auf dem Weg zu Geburtsorten in Landnähe oder neugeborene Jungfische an Mangrovenküsten oder in Flussmündungen des Festlands. Der Nachwuchs ist bei der Geburt voll ausgebildet, selbstständig und wehrhaft und hatte daher früher nicht viele Feinde. Heute fällt ein großer Teil davon der Langleinen- und Treibnetzfisherei zum Opfer. Wir konnten uns lange nicht erklären, wieso während fünf Jahren kein einziger der vielen von uns bei den Galapagosinseln markierten Haie an der Panamaküste im Golf von Chiriqui auftauchte, wo Guzmán 14 Signalempfangsstationen betreibt. Unser Kollege gibt den unzähligen Netzen vor Ort die Schuld, welche die Küsten und sogar die Mündungsgebiete weitgehend abriegeln. Zu befürchten ist, dass es anderswo vor Mittel- und Südamerika nicht viel besser aussieht, so dass Haie dort praktisch keine Überlebenschance haben.

Ihr Fortbestand ließe sich sichern, wenn in ihren Hauptaufenthaltsgebieten komplettes Fangverbot herrschte – im Umkreis der Rückzugplätze, Jagdregionen, Geburtsorte und Kinderstuben; also überall dort, wo sie gute Lebensbedingungen vorfinden. Viele Haiarten würden im Ostpazifik bereits von Schutzgürteln um die Inseln zwischen Mexiko und Südamerika profitieren. Ein Fangverbot müsste außerdem an Festlandküsten gelten, die Haiweibchen zum Gebären aufsuchen und wo die Jungfische die ersten Jahre leben.

Nun dürfen Haie im Galapagos-Meeresschutzgebiet zwar auch gegenwärtig offiziell nicht gefangen werden, also in einem Umkreis von 70 Kilometern um jede der Inseln. Andere Fischerei mit Stellnetzen und Langleinen ist allerdings erlaubt, und zahlreiche Haie verenden so als Beifang. Wir plädieren dafür, Haiarks einzurichten, in denen jegliche Form von Jagd auf sie, auch als Beifang, ganz untersagt ist. Bei den Galapagosinseln etwa müsste das geschützte Gebiet um die Darwin- und Wolfinsel für Hammerhaie nach unseren Daten 25 Kilometer weit hinaus reichen sowie noch einen breiten

Streifen zwischen den Inseln umfassen, denn wir stellten fest, dass die Fische regelmäßig zwischen den beiden pendeln.

Erreichbar ist dieses ambitionierte Ziel nur unter Beteiligung und verstärkter regionaler und internationaler Zusammenarbeit großer Organisationen wie der Comisión Permanente del Pacífico Sur, der UN-Seerechtskommission und der Süd-pazifischen Regionalen Fischereimanagement-Organisation. Auch die interamerikanischen Kommissionen, die sich mit Tunfischen und Meeresschildkröten befassen, gilt es einzubeziehen. Denn Hai-fischparks kämen zugleich vielen anderen bedrohten Meeresbewohnern zugute. Noch ist eine Menge Aufklärungsarbeit erforderlich. Wenn es gelingt, diese einmaligen marinen Lebensräume in ihrer Vielfalt zu bewahren, bleiben uns auch ihre unersetzlichen Ökosystemdienste erhalten. ~

DER AUTOR



A. Peter Klimley ist Direktor des Labors für Biotelemetrie an der University of California in Davis. Dort hat er eine außerordentliche Professur am Institut für Wildtiere, Fische und Naturschutz.

QUELLEN

Acuña-Marrero, D. et al.: Whale Shark (*Rhincodon typus*) Seasonal Presence, Residence Time and Habitat Use at Darwin Island, Galapagos Marine Reserve. In: PLoS One, e115946. doi: 10.1371, 2014
Ketchum, J.T. et al.: Inter-Island Movements of Scalloped Hammerhead Sharks (*Sphyrna lewini*) and Seasonal Connectivity in a Marine Protected Area of the Eastern Tropical Pacific. In: Marine Biology 161, S. 939–951, 2014

© American Scientist

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400763

Was dich nicht umbringt ...

Chemische Verbindungen, mit denen Pflanzen Schädlinge abwehren, machen das Gehirn weniger anfällig gegenüber Alzheimer, Parkinson und anderen neurodegenerativen Erkrankungen.

Von Mark P. Mattson

Warum gilt es als gesund, viel Obst und Gemüse zu essen? Viele nehmen an, dafür seien Antioxidantien verantwortlich, die in diesen Lebensmitteln enthalten sind. Zunächst klingt das einleuchtend, denn Antioxidantien neutralisieren reaktionsfreudige Atome und Moleküle wie die berüchtigten reaktiven Sauerstoffspezies (ROS), die Körperzellen schädigen können und bei Krebs-, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes eine wichtige Rolle spielen.

Auch für meine Arbeit als Neurowissenschaftler spielt das Thema eine Rolle. Schon seit Langem ist meinen Kollegen und mir bekannt, dass ROS in der Lage sind, Nervenzellen in ihrer Funktion zu beeinträchtigen und sogar abzutöten. Zudem wissen wir: Menschen, die regelmäßig antioxidantienreiche pflanzliche Nahrung zu sich nehmen, leiden seltener an neurodegenerativen Erkrankungen. Daraus könnte man den Schluss ziehen, das eine habe direkt mit dem anderen zu tun. Doch ganz so einfach ist es nicht.

Tatsächlich haben streng kontrollierte Studien mit Tieren wie Menschen keinen eindeutigen Nachweis für die Annahme geliefert, das Einnehmen von Antioxidantien wie den Vitaminen C, E und A helfe, solche Krankheiten zu verhindern. Einige Arbeiten haben sogar gesundheitlich bedenkliche Effekte belegt – so geht laut einer Studie aus dem Jahr 2011 die langjährige Einnahme von Vitamin-E-Präparaten mit einem signifikant erhöhten Prostatakrebsrisiko einher. Worauf könnte dann aber die gesundheitsfördernde Wirkung von Obst und Gemüse beruhen?

Die Antwort hat viel damit zu tun, wie Pflanzen sich seit Jahrmillionen vor Schädlingen schützen. Sie produzieren bitter schmeckende, giftige Stoffe, die als natürliche Pflanzenschutzmittel (Pestizide) wirken. Wenn wir pflanzliche Nahrung zu uns nehmen, konsumieren wir in geringen Dosen auch diese Toxine. Und setzen die Zellen in unserem Körper damit unter leichten Stress, ähnlich wie es bei sportlicher Betätigung oder längerem Fasten geschieht. Die Zellen sterben nicht daran; vielmehr gehen sie gestärkt daraus hervor, weil ihre Stressreaktion sie dazu befähigt, mit künftigen Belas-

tungen besser fertig zu werden. Diese Steigerung der zellulären Widerstandskraft nennt man »Hormesis« (griechisch für »Anregung, Anstoß«). Ganz allgemein bezeichnet der Begriff eine positive biologische Reaktion, die durch niedrig dosierte schädliche Einwirkungen zu Stande kommt. Wie wissenschaftliche Arbeiten zunehmend nahelegen, zeichnet Hormesis möglicherweise hauptverantwortlich für die günstigen Wirkungen des Obst- und Gemüseverzehr. Hormesis-Effekte besser zu verstehen, könnte neue Wege aufzeigen, um gefürchtete Hirnerkrankungen wie Alzheimer, Parkinson und Hirnschlag zu verhindern beziehungsweise zu behandeln.

Nützlicher Stress

Meine Mitarbeiter und ich kamen über einige Umwege zu diesem Forschungsthema. Anfang der 1990er Jahre, damals noch am Sanders-Brown Center für Altersforschung der University of Kentucky, interessierten wir uns dafür, ob sich mit Antioxidantien die Alzheimerkrankheit behandeln lässt. Wir vermuteten das, weil Beta-Amyloide (jene Peptide, die sich übermäßig stark im Gehirn von Alzheimerpatienten ablagern) kultivierte Hirnzellen schädigen und an diesem Zerstörungsprozess reaktive Sauerstoffspezies beteiligt sind.

AUF EINEN BLICK

GESUNDES GIFT

1 Pflanzen können ihren Fressfeinden nicht entfliehen. Daher haben sie **chemische Abwehrmechanismen** entwickelt, um Insekten und andere Tiere auf Distanz zu halten.

2 Toxische Stoffe, die Pflanzen zur Selbstverteidigung einsetzen, nehmen wir in geringen Mengen zu uns, wenn wir Obst und Gemüse essen. Sie verursachen **leichte Stressreaktionen**, welche die **Zellen** unseres Körper **widerstandsfähiger** machen.

3 Die Anpassung an solch moderaten Stress nennt man **Hormesis**. Man kann sie nutzen, um Hirnerkrankungen und anderen Störungen vorzubeugen – etwa durch Verzehr von Brokkoli und Heidelbeeren.



Brokkoli enthält Sulforaphan – eine Substanz, die in Nervenzellen Stressreaktionen auslöst und so Hirnfunktionen verbessern helfen kann.

Leider erbrachte eine groß angelegte klinische Studie unter Leitung von Douglas R. Galasko und Paul Aisen (beide an der University of California, San Diego) keinen Beleg dafür, dass Alzheimerpatienten von hochdosierter Antioxidantiengabe profitieren. In der Hirn-Rückenmarks-Flüssigkeit der Betroffenen änderte sich die Konzentration von Beta-Amyloiden und anderen Alzheimermarkern selbst nach viermonatiger Antioxidantientherapie nicht wesentlich. Wir überdachten daraufhin unseren wissenschaftlichen Ansatz, was uns auf verschlungenen Wegen zu einer neuen Hypothese darüber führte, worauf der gesundheitsfördernde Effekt obst- und gemüsericher Ernährung wirklich beruhen könnte.

Uns und anderen Wissenschaftlern fiel auf, dass Menschen, die regelmäßig Sport treiben, geistig aktiv sind und sich eher kalorienarm ernähren, relativ selten unter Beeinträchtigungen ihrer Hirnfunktionen leiden. Sie erkrankten nicht so oft an Alzheimer, Parkinson oder Hirnschlag. Wir fragten uns, ob Ernährung, sportliche Betätigung und geistige Aktivität über die gleichen molekularen Prozesse sowohl die Hirnfunktionen als auch die Anfälligkeit gegenüber neurodegenerativen Erkrankungen beeinflussen.

Erste Erkenntnisse hierzu lieferte uns eine Studie aus dem Jahr 1999. Meine damalige Mitarbeiterin Annadora Bruce-Keller, die heute am Pennington Biomedical Research Center (Louisiana, USA) arbeitet, stellte bei Untersuchungen an Ratten fest: Hirnneurone von Tieren, die jeden zweiten Tag fasten mussten, waren weniger anfällig gegenüber Neurotoxinen, die epilepsieähnliche Symptome auslösen. Hirnzellen von normal ernährten Ratten zeigten diese Widerstandsfähigkeit nicht. Wenig später kam ich ans National Institute on Aging (Bethesda, Maryland, USA), wo meine Mitarbeiter und ich diesen interessanten Befunden weiter nachgingen. Wir erkannten an entsprechenden Tiermodellen, dass häufiges Fasten auch vor Alzheimer, Parkinson und Hirnschlag schützt.

Im Zuge unserer Arbeiten zeichnete sich immer deutlicher ab: Nervenzellen reagieren auf Nahrungsentzug, indem sie molekulare Abwehrmechanismen aktivieren, die sich gegen reaktive Sauerstoffspezies sowie gegen die Ablagerung von Beta-Amyloiden richten. Unter anderem produzieren sie

vermehrt spezielle Proteine, so genannte neurotrophe Faktoren, die das Überleben der Zelle begünstigen. Dazu gehört BDNF (Brain-Derived Neurotrophic Factor). Darüber hinaus erzeugen mangelhaft versorgte Neurone auch Proteine, welche die Stoffwechseleffizienz verbessern und der Anreicherung schadhafter Moleküle entgegenwirken.

Aus evolutionärer Perspektive ist das nicht allzu überraschend. Bei knappem Nahrungsangebot hat das Aufrechterhalten der Hirnfunktion Priorität, denn die kognitive Leistungsfähigkeit ist von entscheidender Bedeutung für das Überleben, etwa bei der Suche nach Essbarem. Es ist deshalb sinnvoll, wenn der Organismus in Fastenzeiten besondere Maßnahmen ergreift, um das Funktionieren seiner Hirnneurone sicherzustellen.

Unser Interesse daran, warum sich Stress vorteilhaft auf Nervenzellen auswirken kann, führte uns schließlich zu den neurologischen Auswirkungen pflanzlicher Ernährung. Neugierig gemacht hatten uns Zeitschriftenartikel aus den 1970er Jahren, wonach Algen ein Neurotoxin namens Kainsäure produzieren, das an Rezeptoren auf Hirnzellen bindet und sie sehr stark aktiviert. Diese Rezeptoren fungieren normalerweise als Andockstellen für den erregenden Neurotransmitter Glutamat.

Wir und andere Wissenschaftler hatten bereits die paradoxen Wirkungen des Glutamats bei Fastenzuständen und sportlicher Aktivität belegt. Eine zu starke Aktivierung der Glutamatrezeptoren kann Nervenzellen schädigen oder gar zerstören. Eine maßvolle Stimulation hingegen schaltet in den Neuronen einen Signalweg an, der entscheidend an Lernvorgängen und Gedächtnisbildung mitwirkt und zudem für den Schutz der Zelle wichtig ist. Daraus erwuchs die Frage, ob der geringe Gehalt an Neurotoxinen in Obst und Gemüse in Hirnzellen eine ähnlich milde Stressreaktion provoziert.

Wer nicht fliehen kann, muss sich verteidigen

Die gesundheitlichen Wirkungen pflanzlicher Ernährung resultieren zum Teil als unbeabsichtigte Nebenwirkung eines evolutionären Wettstreits zwischen Pflanzen und ihren Fressfeinden. Gewächse können nicht weglaufen; um zu überleben, müssen sie also andere Strategien gegen Schädlinge entwickeln. Im Lauf von hunderten Millionen Jahren erwarben sie die Fähigkeit, Stoffe zu produzieren, die ihren Fressfeinden – vor allem Insekten – schaden.

Diese chemischen Verbindungen sind für Insekten im Allgemeinen nicht tödlich, denn es ist für die reproduktive Fitness der Pflanze nicht von Bedeutung, ob die Tiere verenden oder weiterleben. Die Pflanzenstoffe halten Schädlinge lediglich fern. Oft geschieht das über eine Beeinflussung des Nervensystems. Hierzu stellen die Gewächse Substanzen her, die auf Sensillen einwirken, haarähnliche Sinnesorgane an den Mundwerkzeugen der Insekten. Die Sensillen ähneln den Geschmacksknospen der menschlichen Zunge. Sie leiten Signa-

In Fastenzeiten ergreift der Organismus Maßnahmen, um die Hirnfunktion zu sichern

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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

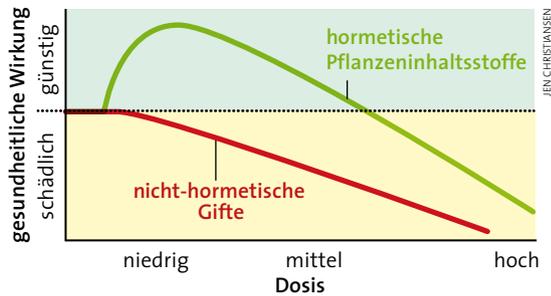


www.spektrum.de/t/ernaehrung



Erst gut, dann schlecht

Obst und Gemüse enthalten häufig geringe Mengen toxischer Stoffe, die bei moderaten Verzehrsmengen die Gesundheit fördern, doch bei steigender Dosis zunehmend schädlich werden. Diesen Effekt nennt man Hormesis. Er ist durch eine zweiphasige »Ansprechkurve« gekennzeichnet, die sich deutlich von jener nichthormetischer Gifte wie Quecksilber unterscheidet. Bei nichthormetischen Giften gibt es keine günstig wirkende Dosis.



le ans Insektenhirn weiter und können das Tier dazu bringen, von der Pflanze abzulassen.

Nicht nur vor Kerbtieren müssen sich Pflanzen schützen. Auch Vögel und Wirbeltiere einschließlich Primaten verzehren Wurzeln, Blätter und Früchte. Manche Pflanzen entziehen sich dem sehr wirkungsvoll, indem sie Stoffe bilden, die Übelkeit, Erbrechen oder sogar den Tod hervorrufen. Als Reaktion darauf haben Tiere ausgefeilte Alarmsysteme entwickelt, die vor solchen Toxinen warnen. Dazu gehört die Wahrnehmung eines bitteren Geschmacks, der uns davon abhält, bestimmte Pflanzenteile zu essen. Dass Kinder beispielsweise Brokkoli meist nicht mögen, scheint tatsächlich angeboren zu sein.

Traditionelle Medizinmänner lernten durch Versuch und (mitunter tödlichen) Irrtum, dass bitter schmeckende Gewächse manchmal als wirkungsvolle Heilmittel dienen können. Heute zeichnet sich für Pharmakologen, Toxikologen und Biochemiker immer deutlicher ab: Viele pflanzliche Stoffe, die in großen Mengen giftig sind, können bei niedriger Dosierung die Gesundheit fördern.

Die Wirkung solcher hormetischen Substanzen lässt sich als zweiphasige Kurve darstellen, indem man den physiologischen Effekt gegen die Dosis aufträgt (siehe »Erst gut, dann schlecht«). Die entstehende Linie verläuft zunächst im Bereich »nützlich« und zeigt damit, dass der Verzehr einer kleinen oder mittleren Menge des jeweiligen Pflanzenstoffs gesundheitsfördernd wirkt. Mit zunehmender Dosis geht sie jedoch in den Bereich »schädlich« über, was die steigende Toxizität widerspiegelt. Paranüsse etwa enthalten das Spurenelement Selen. In geringen Mengen verzehrt, kann es das Risiko für Herz- und Krebserkrankungen senken, indem es die Aktivität eines Enzyms fördert, das solchen Erkrankungen

entgegenwirkt. In großen Mengen eingenommen, wirkt Selen jedoch stark toxisch und vergiftet Leber und Lunge. Dieses Beispiel zeigt, wie Hormesis funktioniert – und was sie von Homöopathie unterscheidet, deren Vertreter ohne belastbaren Beweis und ohne plausiblen Mechanismus behaupten, kleinste Mengen von etwas Krankmachendem könnten heilen.

Hormetisch wirkende Substanzen kommen offenbar überall im Pflanzenreich vor. Edward J. Calabrese, Toxikologe an der University of Massachusetts in Amherst, hat mehr als 10000 wissenschaftliche Publikationen aus den Bereichen Biologie, Toxikologie und Medizin analysiert und daraus eine Liste solcher Stoffe erstellt. Darin finden sich unter anderem Koffein, Opioide und andere Verbindungen, die Hirnfunktionen beeinflussen. Calabrese gründete einen wissenschaftlichen Verein und eine Zeitschrift, die sich mit Hormesis-Forschung befassen. Uns beide verbindet das Interesse daran, welche evolutionären Anpassungen Zellen und Organismen entwickelt haben, um auf Stresseinwirkungen zu reagieren, und inwiefern das für die menschliche Gesundheit bedeutsam ist.

Frühere Studien, die vermuten ließen, Obst- und Gemüseverzehr sei wegen der dabei aufgenommenen Antioxidantien empfehlenswert, stehen nun erneut auf dem Prüfstand. Viele Wissenschaftler postulieren, dass es oft Hormesis-Effekte sind, was man früher für die Wirkung von »Radikalfängern« hielt. Immer deutlicher schält sich heraus: Durch pflanzliche Stoffe erzeugter zellulärer Stress ergänzt oder überdeckt sogar die Wirkungen der Antioxidantien. Das heißt freilich nicht, die Neutralisierung reaktiver Sauerstoffspezies habe überhaupt keine Bedeutung. Vielmehr scheint hormetischer Stress biochemische Prozesse in Gang zu setzen, die ihrerseits darüber bestimmen, wann Antioxidantien für Hirnzellen verfügbar werden.

Aus den Sprossen der Kurkumapflanze

Veranschaulichen lässt sich das an Befunden von Gregory Cole, Neurowissenschaftler an der University of California in Los Angeles. In den frühen 2000er Jahren experimentierte er mit Curcumin, das sich im Rhizom von Kurkumapflanzen findet und Bestandteil von Currypulver ist. Er hoffte, eine neue Methode zur Behandlung der Alzheimerkrankheit zu finden. Cole verabreichte genetisch veränderten Mäusen, die Alzheimersymptome aufwiesen, den Curryinhaltsstoff. Die Gehirne der so behandelten Tiere erwiesen sich als weniger stark von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) geschädigt und enthielten zudem weniger Beta-Amyloid-Ablagerungen.

Zunächst nahm Cole an, dass Curcumin habe die ROS neutralisiert. Spätere Experimente meiner Gruppe und von anderen Wissenschaftlern zeigten jedoch, dass das Curcumin in den Hirnzellen vielmehr eine milde Stressreaktion provoziert. Dies löst die Produktion von antioxidativen Enzymen aus, welche sowohl ROS inaktivieren als auch der Ablagerung schadhafter Proteinbestandteile entgegenwirken. Die Wirkung von Curcumin auf das Gehirn ist demnach breit gefä-

Ein bittersüßer Trend

Bei bitter schmeckenden pflanzlichen Substanzen, die hormetisch wirken, handelt es sich vorwiegend um sekundäre Pflanzenstoffe. Da Pflanzen diese nicht unbedingt für Wachstum und Entwicklung benötigen, können sie sie in unterschiedlichen Mengen enthalten. Sogar innerhalb einer Art kann sich der Gehalt sekundärer Pflanzenstoffe je nach Sorte unterscheiden. So weisen konventionelle, weiße Grapefruits bis zu 50 Prozent mehr Flavonoide auf als rote Sorten. Das macht sich im Geschmack bemerkbar: Während die weiße Version recht bitter schmeckt, ist die rote milder und süßer. Erstere verschwindet daher zunehmend aus den Supermarktregalen. Laut »New Scientist« wurden beispielsweise vor 30 Jahren noch 27 Millionen Boxen mit weißen und 23 Millionen Boxen mit roten Grapefruits von Florida aus vertrieben. Heute hingegen kommen doppelt so viele rote Grapefruits in den Verkauf wie weiße.



FOTO: ILLA / SVEJLANA KUZNETSOVA

Auch bei anderen Obst- und Gemüsearten ziehen Verbraucher oft süßere oder mildere Varianten vor. Wenn Pflanzzüchter solche Sorten kreieren, züchten sie gesundheitsfördernde Inhaltsstoffe vielfach heraus. Die milde Brokkoli-variante »Packman« etwa hat einen Gehalt an Betacarotinen, der gerade mal einem Drittel desjenigen der Sorte »Atlantic« entspricht.

Miriam Plappert ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Quellen:

Kurilich, A. C. et al.: Carotene, Tocopherol, and Ascorbate Contents in Subspecies of *Brassica oleracea*. In: Journal of Agricultural and Food Chemistry 47, S. 1576–1581, 1999

Peterson, J. J. et al.: Flavanones in Grapefruit, Lemons, and Limes: A Compilation and Review of the Data from the Analytical Literature. In: Journal of Food Composition and Analysis 19, S. S74–S80, 2006

Zaraska, M.: Bitter Truth. In: New Scientist 3032, S. 26–30, 2015

chert. Anderen Tierversuchen zufolge kann der Stoff zudem die schädlichen Effekte von Hirnschlägen eindämmen und sogar Depressionen und Angstzustände mildern helfen.

Auch in anderen Gewürzen kommen Inhaltsstoffe vor, die sich günstig auf das Gehirn auswirken. Knoblauch und scharfer Pfeffer enthalten Substanzen, die in Nervenzellmembranen bestimmte Kanäle öffnen und Kalzium einströmen lassen. Infolgedessen erhöht sich die elektrische Aktivität der Neurone, was laut Tierversuchen die Folgen eines Hirnschlags mildert. In Ländern mit ausgeprägtem Verzehr von Knoblauch und scharfem Pfeffer treten altersbedingte Hirnfunktionsstörungen auffallend selten auf. Es ist allerdings nicht klar, ob dafür tatsächlich die Gewürzbestandteile verantwortlich sind oder andere Aspekte der Ernährung beziehungsweise des Lebensstils.

All diese Studien scheinen Hormesis-Effekte zu belegen – und die alten, allzu einfachen Vorstellungen davon zu revidieren, wie reaktive Sauerstoffspezies und Antioxidantien zusammenwirken. Curcumin wirkt nicht direkt als Antioxidans. Es ruft vielmehr Enzyme auf den Plan, die diese Funktion ausüben. Ein solcher indirekter Mechanismus erfordert eine gute Feinabstimmung, was der Grund dafür sein könnte, dass antioxidative Nahrungsergänzungsmittel häufig unwirksam oder sogar schädlich sind.

Vitaminpillen durchkreuzen Trainingseffekte

Den Körper mit »Radikalfängern« zu überschwemmen, könnte beispielsweise seine natürlichen Stressreaktionen hemmen. In einer Studie aus dem Jahr 2009 zeigten Wissenschaftler der Friedrich-Schiller-Universität in Jena: Bei Männern, die einen Monat lang körperlich trainierten und außerdem antioxidative Nahrungszusätze erhielten, verbesserten sich weder die Blutzuckerregulation noch andere Gesundheitsindikatoren. Teilnehmer hingegen, die zwar trainiert, aber keine Antioxidantien bekommen hatten, zeigten solche Verbesserungen. Nahrungsergänzungsmittel, die sich gegen oxidativen Stress richten, scheinen somit die gesundheitsfördernde Wirkung des Sports zunichtezumachen – möglicherweise, indem sie Hormesis-Effekte unterbinden.

Wir wissen immer besser, über welche biochemischen Reaktionsketten Pflanzeninhaltsstoffe wirken. Beispielsweise kennen wir zwei Proteine, Nrf2 und Keap1, die im Zytoplasma normalerweise aneinander gebunden sind. In Anwesenheit von Pflanzenstoffen wie Curcumin oder Sulforaphan, das in Brokkoli vorkommt, gibt Keap1 Nrf2 frei, das daraufhin in den Zellkern wandert. Dort aktiviert es Gene, die für antioxidative Enzyme kodieren. Indem Sulforaphan diese »Nrf2-Bahn« stimuliert, wirkt es also oxidativem Stress in der Zelle entgegen. In-vitro-Versuche haben gezeigt: Die Substanz schützt Zellen des Auges vor Schäden durch UV-Licht.

Der Zusammenhang zwischen pflanzlichen Substanzen und der Nrf2-Bahn hat auch meine eigenen Forschungen inspiriert. Im Jahr 2008 stieß ich zufällig auf das Buch eines indischen Wissenschaftlers, der über natürliche Pestizide

pflanzlicher Herkunft forsch. Er listet darin mehr als 800 Verbindungen auf, die aus Pflanzen isoliert wurden und nachweislich Insekten davon abhalten, die jeweiligen Gewächse zu fressen. Meine Mitarbeiter und ich untersuchten etwa 50 dieser Stoffe darauf, inwieweit sie Signalwege der Stressreaktion zu aktivieren vermögen. Mehrere Verbindungen schalteten die Nrf2-Bahn an und zeigten in ihrer physiologischen Wirkung die zweiphasige Kurve, die für Hormesis typisch ist. Als besonders bemerkenswert erwies sich eine Verbindung namens Plumbagin, die in bestimmten tropischen Blütenpflanzen sowie in den Früchten der Schwarznuss (*Juglans nigra*) vorkommt. Wie wir an Mäusen feststellten, mindert Plumbagin sehr effektiv Hirnschäden und verbessert deutlich die Prognose im Fall eines Hirnschlags. Als nächsten Schritt ziehen wir und andere Wissenschaftler in Betracht, die neuroprotektive Wirkung von Sulforaphan, Plumbagin und ähnlichen Stoffen an menschlichen Patienten zu untersuchen.

Eine wichtige Rolle für die Zellintegrität spielen auch Sirtuine, eine Familie von Enzymen, die verschiedene Funktionen ausüben. Wie der Biologe Leonard Guarente vom Massa-

chusetts Institute of Technology festgestellt hat, kann ein Sirtuin namens Sirt1 die Lebensdauer von Hefezellen verlängern. Die Substanz Resveratrol, die etwa in roten Trauben sowie in Rotwein vorkommt, scheint Sirt1 zu aktivieren. Das Enzym schaltet daraufhin mehrere Stoffwechselwege ein, die hormetische Wirkungen vermitteln. In Tierversuchen schützt Resveratrol vor Schäden im Gehirn und im Rückenmark, die bei Durchblutungsstörungen etwa infolge eines Hirnschlags auftreten. Doch nicht alle einschlägigen Forschungsergebnisse belegen positive Effekte der Substanz. Möglicherweise beschleunigt eine der Bahnen, die von Resveratrol aktiviert werden, das Absterben von Neuronen.

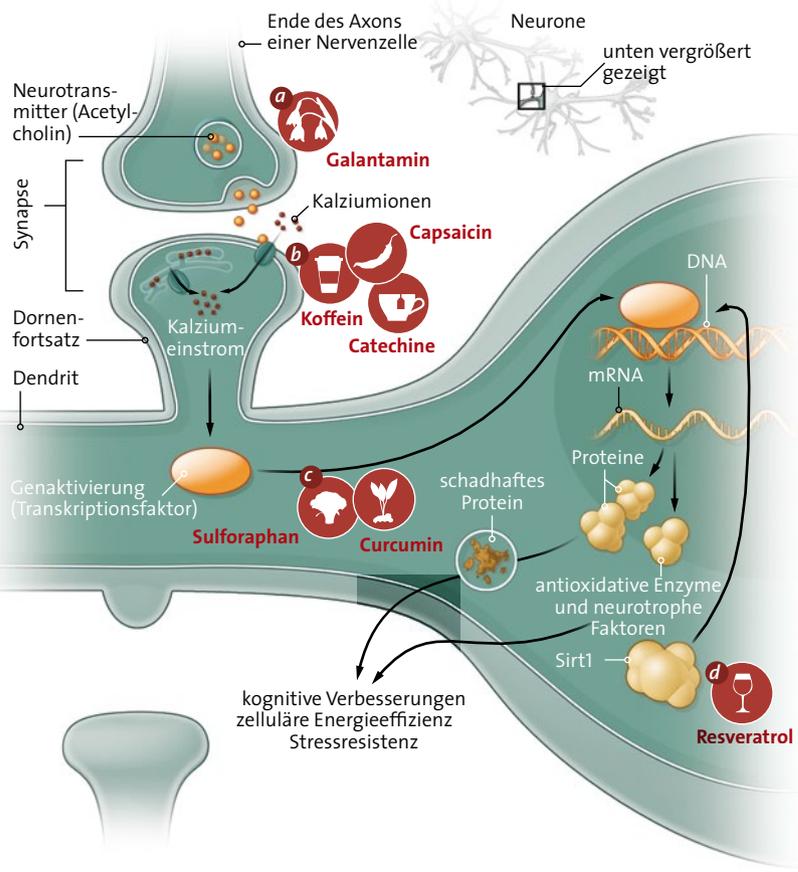
All diese Untersuchungen werden ergänzt durch weitere Studien, laut denen der Zeitpunkt einer Stressreaktion darüber entscheidet, ob die Zelle von der Reaktion profitiert oder nicht. Genau wie intensive körperliche Aktivität mit Erholungsphasen einhergehen muss, damit der Organismus sich wieder regenerieren kann, ist dies auch beim Verzehr pflanzlicher Stoffe nötig. Bei Obst- und Gemüsezufuhr tritt der Körper in einen so genannten Stress-Resistenz-Modus ein, in dem er nur eingeschränkt neue Proteine synthetisiert, den

Intensiver Sport muss mit Erholungsphasen einhergehen – Pflanzenverzehr auch

Die Widerstandskraft des Gehirns stärken

Wissenschaftler haben den Wirkmechanismus

verschiedener hormetischer Pflanzenstoffe untersucht, die Neuronenfunktionen unterstützen oder verbessern. Galantamin, eine von Schneeglöckchen gebildete Substanz, erhöht den Acetylcholinpiegel (a), der im Gehirn von Alzheimerpatienten herabgesetzt ist. Wird Acetylcholin an der Synapse einer Nervenzelle freigesetzt, erregt es die Nervenzelle gegenüber, indem es an Rezeptoren auf deren Dornenfortsatz bindet. Koffein, Capsaicin aus scharfem Pfeffer und Catechine aus Tee (b) wirken auf Kanäle in der Nervenzellmembran ein, was den Einstrom von Kalziumionen in die Zelle zur Folge hat. Diese Ionen aktivieren bestimmte Gene und bringen die Zelle dazu, die entsprechenden Proteine herzustellen. Auch Sulforaphan aus Brokkoli, Curcumin aus Currypulver (c) und Resveratrol aus Weintrauben (d) haben diesen Effekt und beeinflussen zudem regulatorische Proteine wie Sirt1. Infolgedessen entstehen antioxidative Enzyme und neurotrophe Faktoren, welche die Stressresistenz der Zelle erhöhen und eine kognitive Leistungssteigerung bewirken. Zudem werden der Abbau schadhafter Proteine forciert sowie der zelluläre Energiestoffwechsel reguliert.



Abbau schadhafter Moleküle intensiviert und zelluläre Überlebensmechanismen in Gang setzt. Körperzellen können in diesem Zustand nur so lange verharren, bis sie wieder neue Proteine für andere Zwecke herstellen müssen. Sonst setzt ihnen die Stressreaktion derart zu, dass sie Schaden zu nehmen beginnen. Nach Ende des Stresses laufen Proteinsynthese und Zellwachstum wieder an.

In solchen Erholungsphasen bilden Neurone unter anderem neue Verbindungen untereinander aus. Forschungsergebnissen zufolge kann der Verzehr pflanzlicher Nahrung oder ein körperliches Training, gefolgt von einer Ruheperiode, die Bildung neuer Nervenzellen stimulieren. Diese gehen aus Stammzellen hervor, die im Hippocampus lokalisiert sind, einer Struktur tief im Gehirn. Die frisch ausdifferenzierten Neurone wachsen, bilden Verbindungen mit bereits existierenden Nervenzellen und verbessern so Lern- und Gedächtnisleistungen. Der normale nächtliche Schlaf könnte somit sicherstellen, dass sich Körperzellen von der täglichen physischen Aktivität beziehungsweise Einwirkung pflanzlicher Stoffe erholen.

Medizin mit Uwhangchungsimwon

Mit dem Wissen um Hormesis können wir möglicherweise neue Arzneistoffe finden oder entwickeln – und im Nachhinein die Wirkungsweise manchen Stoffs erklären, der sich in der Praxis als tauglich erwiesen hat. Die Blüten von Märzenbecher (*Leucojum vernum*) und Schneeglöckchen (*Galanthus*) beispielsweise enthalten Galantamin, das die Gedächtnisleistung steigert, indem es den Acetylcholin Spiegel erhöht (Acetylcholin dient als Botenstoff zwischen Nervenzellen). Galantamin setzt Neurone unter milden Stress, was diese offenbar vor Degeneration schützt und ihre Fähigkeit verbessert, mit anderen Neuronen zu kommunizieren. Mittlerweile wird die Substanz zur Behandlung der Alzheimerkrankheit eingesetzt, da sie deren Symptome zu lindern vermag.

Neue Hinweise auf hormetisch wirkende Arzneistoffe könnte ein systematisches Durchforsten der Heilkräuterkunde liefern. Eine Substanz namens Uwhangchungsimwon wird in der traditionellen koreanischen Medizin eingesetzt, um Hirnschlagopfer zu behandeln. Vermutlich fördert sie das Überleben von Hirnneuronen, indem sie eine Stressreaktion auslöst und die Produktion von Proteinen wie Bcl-xl ankurbelt, die das Absterben der Zellen verhindern. Auch die Inhaltsstoffe von halluzinogenen Pflanzen lohnen einen genaueren Blick. Unter kontrollierten klinischen Bedingungen in mittlerer Dosierung verabreicht, können sie möglicherweise Angstzustände, Depressionen und Drogensüchte behandeln helfen.

Das Konzept der Hormesis ist allerdings nicht unumstritten. Einige Wissenschaftler fragen sich, ob man überhaupt unterscheiden kann, wann ein nützlicher Effekt endet und ein schädlicher beginnt. Wann genau eine Reaktion toxisch

wird, könnte von individuellen Gegebenheiten abhängen und somit von Mensch zu Mensch differieren – was es schwierig machen würde, hormetische Arzneimitteltherapien zu entwickeln. Skepsis kommt vor allem angesichts der Idee auf, ionisierende Strahlen hormetisch anzuwenden – niedrig dosierte Röntgenstrahlung hat sich in Tierversuchen als gesundheitlich günstig erwiesen. Mehrere wissenschaftliche Gremien sind der Ansicht, bei ionisierender Bestrahlung gebe es keine unbedenkliche Dosis.

Um die fachliche Bedeutung von Hormesis-Effekten beurteilen zu können, braucht es sorgfältig durchgeführte, randomisierte klinische Studien. Denn viele Heilkräuter werden ohne substanziellen Nachweis ihrer Wirksamkeit vertrieben. Pflanzenstoffe, die über zellulären Stress wirken, könnten Vorteile gegenüber herkömmlichen Pharmaka besitzen, die normale Zellfunktionen stören und daher teils schwere Nebenwirkungen haben. Diazepam beispielsweise, der Wirkstoff von Valium, lindert zwar Angstzustände, macht zugleich aber auch benommen. Die Arznei lässt verstärkt Chloridionen in Nervenzellen einströmen, was diese hyperpolarisiert und somit weniger erregbar macht. Der Effekt hält so lange an, wie die Substanz am Wirkort verbleibt, bis sie beispielsweise verstoffwechselt ist. Von hormetisch wirkenden Medikamenten erhoffen wir uns, dass sie keine solche »Holzhammerwirkung« entfalten und weniger Nebeneffekte zeitigen.

Versuche an genetisch veränderten Tieren, die Symptome neurodegenerativer Erkrankungen entwickeln, lassen baldige Fortschritte in diesem Bereich erwarten. Möglicherweise liefern einmal Apfelschalen, Walnüsse und Currypulver die Inhaltsstoffe, aus denen völlig neue Methoden für die Therapie von Hirnerkrankungen erwachsen. ~

Pflanzenstoffe, die über zellulären Stress wirken, könnten pharmakologische Vorteile haben

DER AUTOR



Mark P. Mattson ist leitender Neurowissenschaftler am National Institute on Aging (Bethesda, Maryland, USA) sowie an der Johns Hopkins University (Baltimore, USA). Er forscht über neuronale Veränderungen während des Alterns.

QUELLEN

- Ristow, M. et al.:** Antioxidants Prevent Health-Promoting Effects of Physical Exercise in Humans. In: PNAS USA 26, S. 8665–8670, 2009
Stranahan, A. M., Mattson, M. P.: Recruiting Adaptive Cellular Stress Responses for Successful Brain Ageing. In: Nature Reviews Neuroscience 13, S. 209–216, 2012
Xu, J. et al.: Neurotrophic Natural Products: Chemistry and Biology. In: Angewandte Chemie International Edition 53, S. 956–987, 2014
Yun, J., Finkel, T.: Mitohormesis. In: Cell Metabolism 19, S. 757–766, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400766

IHRE LIEBLINGSTHEMEN blitzschnell gefunden.

NEU!
WISSEN

Nr. 6 10.3.2016 IHR 14 TAGE TV-PROGRAMM VOM 19.3.-1.4.2016

tvwissen

TV-PROGRAMM & WISSENSMAGAZIN in einem Heft

NEU
NUR **1,50** Euro
JETZT TESTEN!

14 TAGE TV-PROGRAMM

Mit allen Doku-Hits zu Ostern!
blitzschnell gefunden

- Geschichte ● Technik
- Politik ● Natur ● Reise
- Gesundheit ● Kultur

Die WAHRHEIT über TUTANCHAMUN
Forscher auf den Spuren des geheimnisvollen Pharaos

Unsterblich
Die legendäre Totenmaske aus Gold

SA
SO
MO
DI
MI
DO
FR

MO 28.3. DAS ERSTE
Die Rückkehr des Sherlock Holmes

Alle **Doku-Sendungen** im Überblick.

TV WISSEN ist TV-Programm und Wissensmagazin in einem. Mit einzigartigem Doku-Finder sowie spannenden Artikeln zu Ihren Lieblingsthemen. **Jetzt schlau sein und testen!**



Scannen & Kiosk finden

Jetzt im Zeitschriftenhandel
oder im Abo **30%** sparen + **Geschenk** sichern
auf www.tvwissen.de/angebot

Auf der Jagd nach der zweiten Erde

Seit 2009 hat der Kepler-Satellit in einem eng begrenzten Himmelsausschnitt mehr als 1000 extrasolare Planeten aufgespürt. Mit einer neuen Generation von welt-raumbasierten Teleskopen wollen Astronomen in den nächsten Jahren die Suche auf den gesamten Himmel ausweiten. Dann werden sie auch in der Lage sein, in den Atmosphären dieser fernen Welten nach Spuren von Leben zu fahnden.

Von Kevin Heng und Joshua Winn

Noch vor weniger als drei Jahrzehnten konnten Astronomen über Planetensysteme bei fremden Sternen nur spekulieren. Inzwischen wissen wir, dass das Universum nur so von Exoplaneten wimmelt und dass sich viele von ihnen in ihren Eigenschaften deutlich von jenen in unserem Sonnensystem unterscheiden. Weltweit hat sich die Exoplanetenforschung zu einem der aktivsten Gebiete der Astronomie entwickelt.

Möglichkeiten, solche fremden Welten aufzuspüren, gibt es viele. Als am erfolgreichsten hat sich in den letzten Jahren die Transitmethode erwiesen: Zieht ein Exoplanet vor seinem Zentralgestirn vorüber, verdunkelt er dessen Licht ein wenig und macht sich dadurch bemerkbar. Solche Bedeckungen oder Transits lassen sich mit Teleskopen nachweisen, die gleichzeitig die Helligkeiten von vielen Sternen präzise vermessen können. Auf diese Weise spürte der 2009 von der NASA gestartete Kepler-Satellit mehr als 1000 solcher Exemplare auf. Der Erfolg dieser Mission inspirierte sowohl die NASA als auch die ESA, eine neue Generation von Welt-raumteleskopen zu planen. Ergänzt durch bodengebundene Observatorien sollen diese zum einen unser Inventar an bizarren fernen Welten wesentlich erweitern, zum anderen

speziell die Suche nach erdähnlichen Objekten und nach Anzeichen für Leben darauf vorantreiben.

Dabei lassen sich die Forscher im Wesentlichen von folgenden Fragestellungen leiten: Welche Moleküle kommen in den Atmosphären der Exoplaneten am häufigsten vor? Wie stark ist die Wolkenbedeckung typischerweise, wie hoch sind Temperatur und Windgeschwindigkeit? Gibt es eine feste Oberfläche unterhalb der Atmosphäre? Planetare Gashüllen nach diesen Kriterien einzuordnen, ist meist der einzige Weg, um herauszufinden, ob ein Exoplanet lebensfreundlich oder gar bereits besiedelt ist. Allerdings würde etwa molekularer Sauerstoff zwar mit der Existenz von Leben einhergehen, jedoch kein Beweis dafür sein. Denn O₂ oder Ozon können auch durch physikalische und chemische Prozesse entstehen, ohne dass dazu Leben notwendig wäre. Umgekehrt könnte auf einem Exoplaneten Leben auch unterhalb seiner Oberfläche existieren. Dann würden wir es sehr wahrscheinlich niemals mit astronomischen Mitteln detektieren können.

Helle, blinkende Sterne

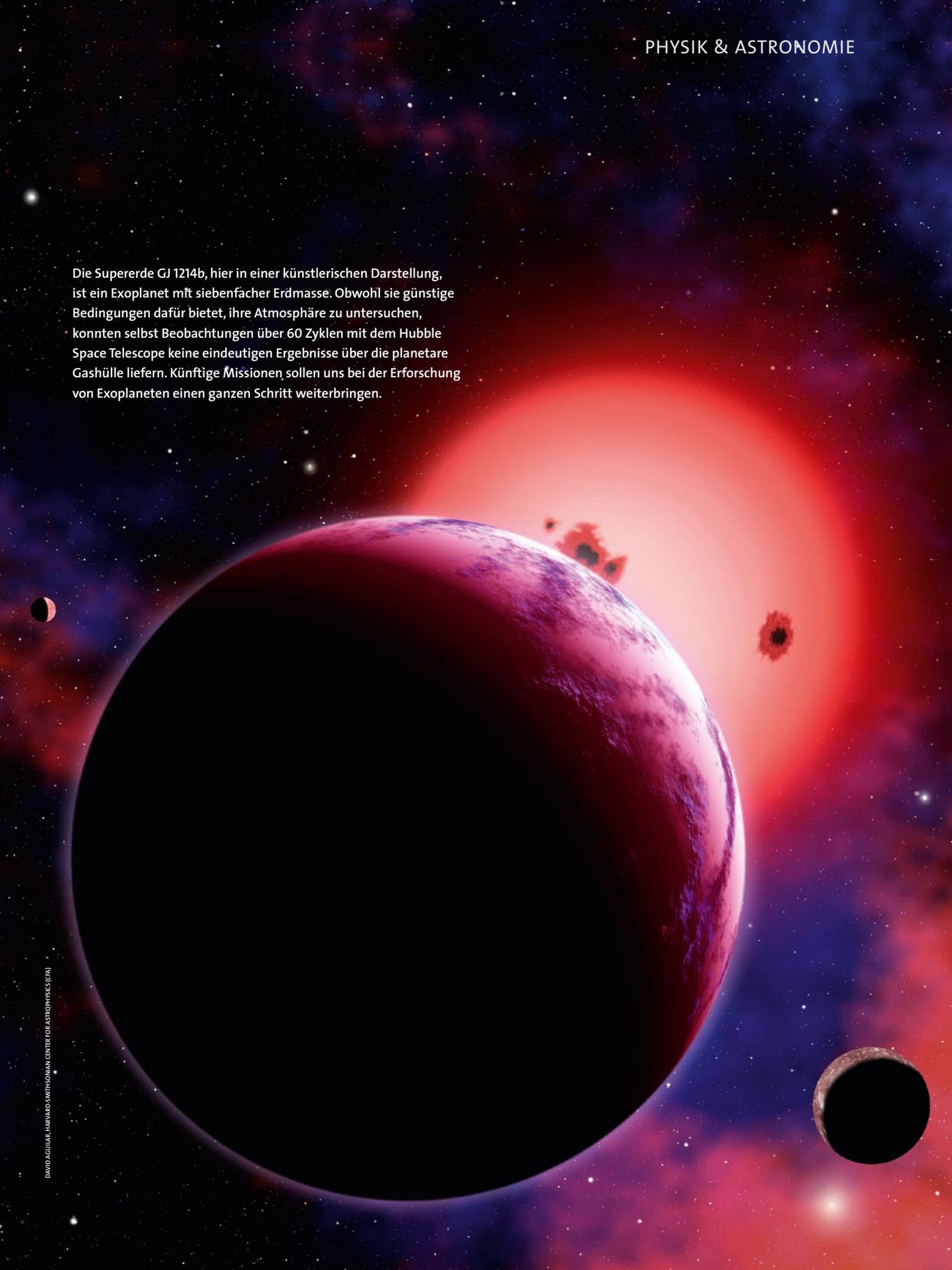
Möchte man, wie bereits zu Beginn der 2000er Jahre praktiziert, Exoplaneten vom Boden aus mit der Transitmethode aufzuspüren, stellen sich einem verschiedene Hindernisse in den Weg. Zum einen gibt es den Tag-Nacht-Rhythmus. Transits, die sich auf der jeweils sonnenzugewandten Seite der Erde ereignen, entgehen einem schlicht. Zum anderen beeinträchtigt die Erdatmosphäre die Beobachtungen. Selbst in einer scheinbar klaren Nacht verändert sie das Sternenlicht je nach Helligkeit und Wellenlänge durch Extinktion und Szintillation. Die Extinktion kennen wir von der untergehenden Sonne: Passiert ihr Licht dickere Luftschichten in Horizontnähe, erscheint sie rötlich und dunkler. Szintillation hingegen wird durch die Luftunruhe hervorgerufen und lässt die Sterne funkeln. Solche Helligkeitsschwankungen sind stärker als die Transitsignale, nach denen wir suchen.

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 | ► Gasriesen im Visier
<i>Lee Billings</i> | Mai 2016 |
| Teil 3 | ► Exoplanetare Atmosphären
<i>Florian Rodler</i> | Juni 2016 |

Die Supererde GJ 1214b, hier in einer künstlerischen Darstellung, ist ein Exoplanet mit siebenfacher Erdmasse. Obwohl sie günstige Bedingungen dafür bietet, ihre Atmosphäre zu untersuchen, konnten selbst Beobachtungen über 60 Zyklen mit dem Hubble Space Telescope keine eindeutigen Ergebnisse über die planetare Gashölle liefern. Künftige Missionen sollen uns bei der Erforschung von Exoplaneten einen ganzen Schritt weiterbringen.



KOSMISCHE SUCHMASCHINEN

1 Mit der **Kepler-Mission** und weiteren **Suchkampagnen** haben Forscher bisher mehr als 2000 Planeten und 4000 Kandidaten bei anderen Sternen entdeckt.

2 Um die **Atmosphären der fremden Welten** zuverlässig zu analysieren und gar nach **Anzeichen von Leben** darin zu suchen, reichen die **technischen Möglichkeiten** derzeit nicht aus.

3 Daher planen Astronomen **mehrere Weltraumobservatorien**, mit denen sie in naher Zukunft weitere Exoplaneten aufspüren und deren Eigenschaften besser untersuchen können.

Um diese Effekte zu korrigieren, richten die Astronomen ihre Teleskope auf eine Gruppe von Sternen von ähnlicher Farbe und Helligkeit. Die störenden Einflüsse der Atmosphäre sollten sich auf deren Licht in gleicher Weise auswirken. Zieht nun ein Planet vor einem von ihnen vorüber, leuchtet dieser kurzzeitig ein wenig schwächer. Bei den übrigen Sternen der Gruppe bleibt der charakteristische Helligkeitseinbruch aus. Mittels solcher Referenzsterne lassen sich also Exoplanetentransits aussortieren.

Auf Grund eines rein geometrischen Effekts sind von der Erde aus betrachtet helle Sterne wesentlich seltener als dunklere. Denn je weiter wir in den Raum hinausblicken, umso mehr Sterne sehen wir zwar, aber mit steigender Entfernung werden sie im Mittel auch immer leuchtschwächer. Die hellsten von ihnen sind unregelmäßig über den gesamten Himmel verteilt und haben teils große Winkelabstände zueinander. Das macht es umso schwieriger, Referenzsterne für sie zu finden. Denn der einzig vergleichbare helle Stern könnte so weit vom Beobachtungsziel entfernt sein, dass die Atmosphäre das Licht beider Sterne nicht mehr gleichermaßen verändert. Dies erklärt unter anderem die ansonsten paradox klingende Tatsache, dass die hellsten 1000 Sterne in Bezug auf Exoplanetentransits noch relativ wenig erforscht sind.

Mit Weltraumteleskopen lassen sich diese Schwierigkeiten umgehen. Doch selbst von außerhalb der Atmosphäre ist es kein Leichtes, Exoplanetentransits auszuspähen. Denn die meisten Planeten ziehen von unserem Blickwinkel aus gesehen gar nicht vor ihrem Stern vorüber. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Bedeckung kommt, ist gleich dem Stern Durchmesser geteilt durch den Durchmesser des Planetenorbits. Für Systeme mit einem erdähnlichen Orbit um einen Stern wie die Sonne beträgt sie nur 0,1 Prozent. Eine Transitmusterung sollte deshalb mindestens einige zehntausend Sterne umfassen, wenn sie erfolgreich sein will. So blickte das Weltraumobservatorium Kepler auf 150 000 Sterne innerhalb eines 115 Quadratgrad großen Himmelsausschnitts in den Konstellationen Schwan und Leier, um in jahrelanger Arbeit gut 1000 Exoplaneten aufzuspähen.

Während eines Transits filtert die Atmosphäre eines Exoplaneten einen kleinen Anteil des Sternenlichts heraus. Vergleicht man nun das Sternspektrum während des Transits

mit jenem davor oder danach, lassen sich Atome und Moleküle aus der planetaren Atmosphäre anhand ihrer Absorptionslinien identifizieren. Eine andere Methode untersucht das vom Exoplaneten emittierte Licht. Dazu registriert man den Helligkeitsabfall des Systems in verschiedenen Spektralbereichen, während der Planet von seinem Mutterstern verdeckt wird (Okkultation).

Das Ergebnis solcher Untersuchungen hängt jedoch entscheidend von der Helligkeit des jeweiligen Muttergestirns ab. Je mehr Photonen ein Stern in Richtung Erde schickt, desto schneller können wir Informationen über seinen Exoplaneten sammeln. Denn die Genauigkeit vieler astronomischer Beobachtungen wird durch statistische Schwankungen der Photonenzählrate eingeschränkt. Dieser Effekt mittelt sich mit zunehmender Photonenmenge immer mehr heraus. Zugleich erhöht sich damit das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das erlaubt uns wiederum, nach kleineren Exoplaneten mit entsprechend schwächeren Transitsignalen zu suchen. Zum Vergleich: Ein erdgroßer Exoplanet, der vor einem sonnenähnlichen Stern vorüberzieht, verdunkelt diesen in einem Verhältnis von nur 84 zu einer Million; sein atmosphärisches Signal wäre noch um mindestens eine Größenordnung kleiner. Um schließlich das Spektrum einer exoplanetaren Atmosphäre zu analysieren, muss das Sternenlicht nämlich entsprechend seiner Wellenlänge aufgeteilt werden – das heißt ein bereits schwaches Signal in mehrere noch schwächere. Das kann nur gelingen, wenn das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu Beginn sehr hoch ist, also bei hellen Sternen. Die Sterne, die Kepler beobachtet, sind jedoch typischerweise mehr als eine Million Mal schwächer als die hellsten mit dem bloßen Auge sichtbaren wie Sirius, Wega und Alpha Centauri.

Weltraumobservatorien für die Exoplanetenforschung

Gleich mehrere europäische und US-amerikanische Missionen werden demnächst in die Fußstapfen des Kepler-Teleskops treten.

Kepler

Organisation: NASA

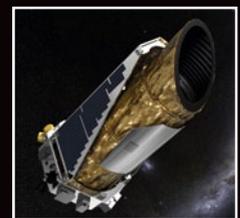
Startdatum: 2009

Ziel: Kepler soll die Häufigkeit von erdgroßen Exoplaneten in oder nahe der lebensfreundlichen Zone von sonnenähnlichen Sternen abschätzen. Dazu verwendet die Mission die Transitmethode. Das Teleskop blickt permanent in eine Richtung und überwacht die Helligkeit der dortigen Sterne für mehrere Jahre.

Gesichtsfeld: 115 Quadratgrad

Spiegeldurchmesser: 95 Zentimeter

Anzahl beobachteter Sterne: 150 000



NASA / AMES / JPL/CATECH

Diese Herausforderungen lassen sich außerdem besser meistern, wenn der Exoplanet groß ist, sich nahe am Stern befindet und eine leichte oder nichtmetallische Atmosphäre besitzt. Deshalb zählten heiße, wasserstoffdominierte Gasriesen ähnlich Jupiter, die ihren Stern näher umkreisen als Merkur die Sonne, zu den ersten Exoplaneten, deren Atmosphären sich charakterisieren ließen.

Wie schwierig diese Beobachtungen sein können, zeigt das Beispiel der Supererde GJ 1214b. Kleiner als Neptun gilt sie unter allen Exoplaneten als Vorzeigobjekt, denn das System ist relativ nah und weist einen Orbit von nur 1,6 Tagen auf. Selbst aufwändige Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop über 60 der jeweils 90-minütigen Orbitrunden hinweg waren wenig aufschlussreich. Das dabei aufgenommene Transmissionsspektrum zeigt nicht, ob GJ 1214b nun eine schwere, metallhaltige Atmosphäre besitzt oder ob diese überwiegend aus Wasserstoff besteht und außerdem Wolken enthält.

Auf der Suche nach Leben

Für Astronomen steht nun der nächste Schritt fest: Sie wollen gezielt Exoplaneten von der Größe der Erde bei den nächsten und hellsten Sternen finden. Solche Systeme bieten beste Voraussetzungen, um planetare Atmosphären zu analysieren und darin nach für Leben typischen Gasen zu suchen. Allerdings müssen die entsprechenden Atome und Moleküle natürlich auch in ausreichend hohen Konzentrationen vorkommen, damit sie sich mit den verfügbaren Technologien zuverlässig detektieren lassen.

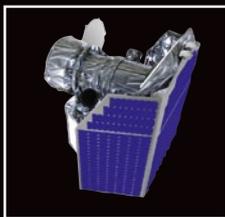
Kürzlich wurde die Kepler-Mission notgedrungen mit neuen Aufgaben bedacht und in K2 umbenannt. Nachdem zwei der Schwungräder, die den Satelliten räumlich ausricht-

ten sollen, ausgefallen sind, kann das Teleskop nicht mehr permanent auf dasselbe Sternfeld blicken – es sei denn, die Ziele befinden sich in der Nähe der Ekliptik. Daher sucht K2 nun dort nach Sternen in unserer Umgebung. In diesen Daten sind zwar mehr Transitplaneten bei hellen Sternen zu erwarten als zuvor, allerdings bleibt so auch nach wie vor ein Großteil des Himmels unbehelligt.

2012 beschloss die ESA den Bau der CHEOPS-Mission (Characterising Exoplanet Satellite), deren Kosten sich auf etwa 100 Millionen Euro belaufen werden. Unter der Ägide des Schweizer Astrophysikers Willi Benz schließt CHEOPS an das eidgenössische Erbe der Planetenjagd an. Weithin dafür bekannt, den ersten Exoplaneten bei einem sonnenähnlichen Stern gefunden zu haben, ist das Genfer Observatorium auch heute darin führend, die präzisesten Spektrografen für die Radialgeschwindigkeitsmethode zur Planetensuche zu bauen. Mit ihr lässt sich anhand des Dopplereffekts messen, wie Stern und Planet um den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems »tanzen«, und daraus die Masse des Exoplaneten ermitteln.

Wenig später winkte die NASA die Pläne für TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) durch. Der Satellit soll auf der Kepler-Mission aufbauen, etwa 200 Millionen US-Dollar kosten und voraussichtlich 2017, im selben Jahr wie CHEOPS, starten. Bald darauf erkannte die ESA den Zeitgeist der Exoplanetensuche und gab grünes Licht für die PLATO-Mission (Planetary Transits and Oscillations of Stars) – ein weiteres Weltraumobservatorium, das ab 2024 Planetentransits aufspüren soll und eine halbe Milliarde Euro verschlingen wird.

Warum aber brauchen wir so viele verschiedene Weltraumprojekte für die Suche nach Exoplaneten? Geopoliti-



ESA / CHRISTOPHE CARREAU

CHEOPS

(Characterising Exoplanet Satellite)

Organisation: ESA

Startdatum: 2017

Ziel: Diese Mission soll bei Sternen, von denen bereits bekannt ist, dass sie einen Planeten besitzen, nach Transits suchen und diese genau vermessen. CHEOPS wird einzelne und vor allem helle Sterne beobachten.

Gesichtsfeld: 0,08 Quadratgrad

Spiegeldurchmesser: 30 Zentimeter



NASA

TESS

(Transiting Exoplanet Survey Satellite)

Organisation: NASA

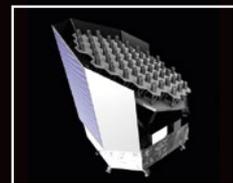
Startdatum: 2017

Ziel: TESS ist die erste Mission, die vom Weltraum aus den gesamten Himmel nach Transits bei Sternen absuchen wird, und ist auf kleine Planeten bei hellen Sternen in Sonnennähe spezialisiert. Jede Himmelsregion wird 27 Tage lang beobachtet; damit werden Planeten mit kurzen Orbits bevorzugt.

Gesichtsfeld: 2304 Quadratgrad (Kombination aus 4 Kameras)

Spiegeldurchmesser: 10 Zentimeter x 4 Kameras

Anzahl der zu beobachtenden Sterne: 200 000 bis 500 000



THALES ALLENIA SPACE

PLATO

(Planetary Transits and Oscillations of Stars)

Organisation: ESA

Startdatum: 2024

Ziel: PLATO soll anhand von Transitentdeckungen eine Datenbank mit erdgleichen Exoplaneten erstellen. Außerdem soll die Mission anhand von Sternschwingungen das Alter der Sterne katalogisieren.

Gesichtsfeld: 2232 Quadratgrad (Kombination aus 34 Kameras)

Spiegeldurchmesser: 12 Zentimeter x 34 Kameras

Anzahl der zu beobachtenden Sterne: 500 000 bis 1 000 000

sche Belange außen vorgelassen, sind dies alles unterschiedliche Instrumente, die in ihren Suchstrategien voneinander deutlich abweichen. TESS wird systematisch den gesamten Himmel abscannen und dabei jeden Abschnitt 27 Tage lang ins Visier nehmen. Dafür wird das Teleskop vier verschiedene optische Kameras mit außergewöhnlich großem Blickfeld verwenden (24 mal 24 Grad) und etwa 200 000 Sterne beobachten. Als Daumenregel gilt, dass man Transits eines Objekts dreimal nacheinander aufzeichnen muss, um die Periodizität nachweisen und eine Detektion bestätigen zu können. Dadurch ist TESS auf kurzperiodische Exoplaneten mit maximal neuntägigen Orbits beschränkt. Eine Ausnahme davon bilden zwei Himmelsregionen, die der Satellit ein Jahr lang permanent überwachen wird. Sie sind auf die Pole der Ekliptik zentriert und so gewählt, dass das James Webb Space Telescope (JWST) nach seinem Start 2018 die TESS-Zielobjekte ebenfalls beobachten kann. Grundsätzlich ist TESS dafür konzipiert, nach bisher unbekanntem Exoplanetentransits zu suchen. Die Wissenschaftler erwarten etwa 1000 Neuentdeckungen, darunter hunderte Planeten, die kleiner als Neptun sind, sowie einige Dutzend in der Größe der Erde.

CHEOPS hingegen wird mit einer einzigen Kamera mit kleinem Gesichtsfeld (0,3 x 0,3 Grad) ausgestattet sein und einzelne Sterne nacheinander untersuchen. Ursprünglich sollte die Mission bei solchen Kandidaten nach Transits suchen, bei denen die Genfer Gruppe zwar bereits mittels der

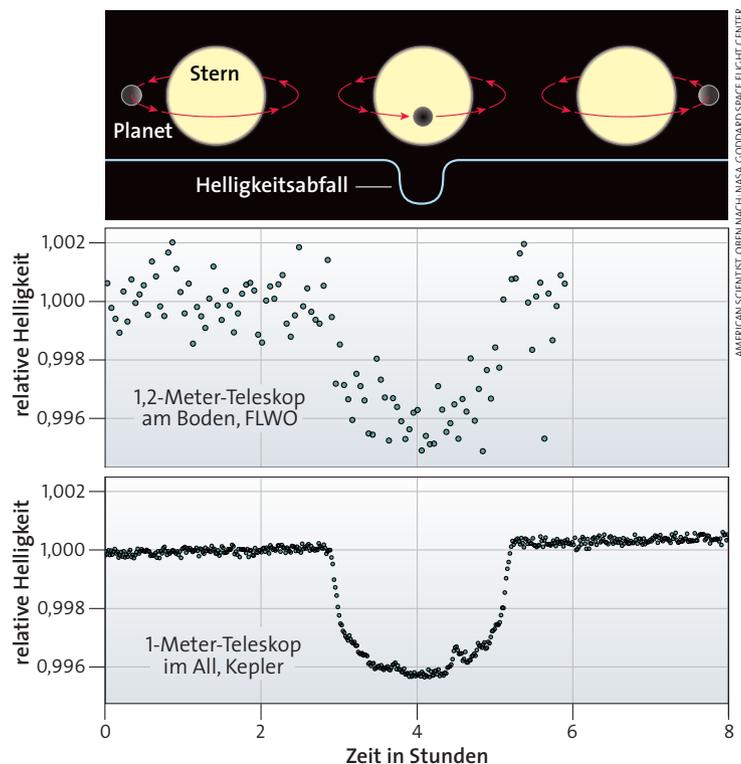
Dopplermethode Planeten gefunden hat, für die aber noch nicht bekannt ist, ob sich die planetaren Orbits ebenfalls für die Transitmethode eignen. Denn Exoplaneten, die sich mit beiden Methoden vermessen lassen, eignen sich besonders gut für eine Untersuchung ihrer Atmosphären. Von ihnen wären sowohl Masse als auch Radius bekannt, und damit auch ihre Oberflächengravitation. Diese Größe wiederum lässt eine fundiertere Interpretation der atmosphärischen Eigenschaften zu. Mit CHEOPS ließen sich aber auch bereits bekannte Transitsysteme (etwa von TESS oder anderen Missionen) bestätigen und Größe und Orbitperioden dieser Objekte besser abschätzen.

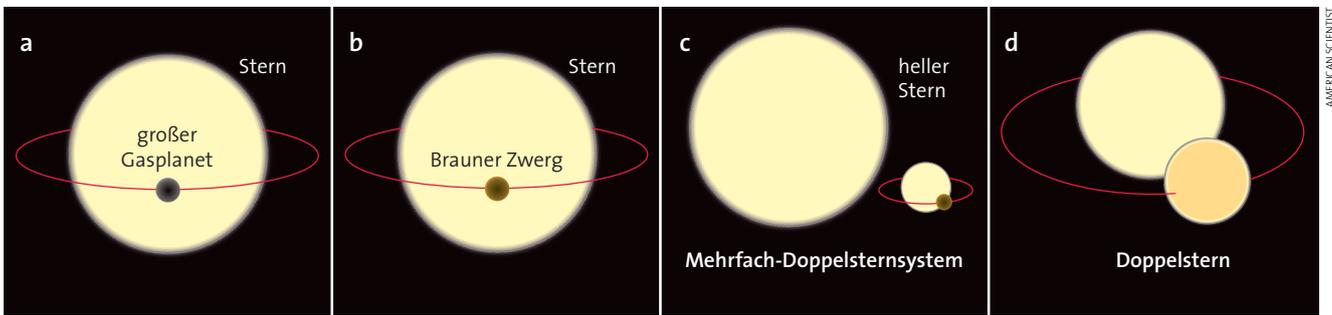
Herausforderungen meistern

Die wichtigste Eigenschaft eines Teleskops ist sein Lichtsammelvermögen und damit seine Spiegelfläche. Diese wiederum ist immer ein Kompromiss zwischen wissenschaftlichen Zielen, technischen Möglichkeiten und Kosten. Größere Spiegel sammeln zwar mehr Photonen auf einmal, und so lassen sich mit ihnen präzisere Helligkeitsmessungen durchführen und Transits kleinerer Planeten detektieren. Aber sie besitzen für gewöhnlich ein kleineres Gesichtsfeld und sind außerdem komplizierter zu konstruieren und teurer. TESS verwendet vier Kameras mit jeweils einem Spiegel von nur zehn Zentimetern. Damit ist das Observatorium relativ kostengünstig und bietet große Gesichtsfelder. CHEOPS wird dage-

Die Transitmethode

Wenn Exoplaneten vor ihrem Stern vorbeiziehen, verdunkeln sie kurzzeitig das Sternenlicht (oben). Vom Weltraum aus lassen sich diese Transits besser beobachten als vom Boden aus. Die mittlere Grafik zeigt eine Serie von Helligkeitsmessungen eines Transits durch den Exoplanet HAT-P-11b, aufgenommen mit dem Fred Lawrence Whipple Observatory (FLWO) in Arizona. Der Planet ist kaum größer als Neptun und ruft für einige Stunden einen Helligkeitseinbruch von nur 0,4 Prozent hervor. Auf Grund atmosphärischer Effekte sind die Messpunkte stark gestreut, außerdem mussten die Messungen unmittelbar nach der Transitphase wegen einsetzender Morgendämmerung abgebrochen werden. Die Messreihe in der Grafik darunter stammt von demselben System, das diesmal allerdings mit dem Kepler-Teleskop abgelichtet wurde. Trotz eines etwas kleineren Spiegeldurchmessers sind die Aufzeichnungen ohne die störenden Effekte von Atmosphäre und Tag-Nacht-Rhythmus wesentlich genauer. An der kleinen Helligkeitsspitze (bei 4,5 Stunden) während des Transits ist sogar zu erkennen, dass der Planet einen dunklen Sternfleck passiert.





Verschiedene astronomische Konstellationen können einen Exoplanetentransit bei einem Stern vorgaukeln. Die Signale etwa von Braunen Zwergen (b), die ähnlich groß wie Jupiter sind, lassen sich nicht von Transits großer Gasplaneten (a) unterscheiden, es sei denn, man kann die Masse des vorüberziehenden Objekts mittels der Dopplermethode bestimmen. Auch verschiedene Doppelsternkonstellationen können Planetentransits vortäuschen. In so genannten hierarchischen Mehrfachsystemen kann ein heller dritter Partner den Transit im engeren Doppelsternsystem überstrahlen (c). In einem gewöhnlichen Doppelsternsystem kann außerdem ein Stern den anderen bei der Bedeckung nur streifen (d).

gen mit einem 30-Zentimeter-Spiegel versehen sein und damit jede Sekunde neunmal so viel Licht sammeln können. Soweit alle anderen Eigenschaften gleich sind, enthält eine einzige Transitbeobachtung mit CHEOPS ebenso viel Information wie neun wiederholt mit TESS durchgeführte. Wegen des kleinen Gesichtsfelds wird es für CHEOPS allerdings eine Herausforderung sein, eine ausreichend große Stichprobe an Sternen mit Exoplaneten zu untersuchen. Denn nur bei einem Bruchteil von ihnen werden sich Transits beobachten lassen.

TESS wird wiederum damit beschäftigt sein, die bodengebundenen Nachbeobachtungen zu koordinieren, die notwendig sind, um die Dopplersignale auszuwerten und die Massen zu bestimmen. Für solche Messungen sind nicht alle Sterne gleich gut geeignet. Astronomen unterteilen die Sonnen nach absteigender Temperatur in die Spektralklassen O, B, A, F, G, K und M. Sterne vom so genannten frühen Typ (O, B, A) sind in der Regel sehr groß; das macht es schwieriger, kleine Planeten bei ihnen zu finden. Außerdem rotieren Sterne vom Typ O bis F schneller; dadurch verbreitern sich die Spektrallinien. Da Radialgeschwindigkeitsmessungen entscheidend davon abhängen, wie exakt sich die Position der Spektrallinien messen lässt, ist das hinderlich.

Deshalb wird sich TESS auf Beobachtungen von F- bis M-Sternen konzentrieren. Dabei handelt es sich um verhältnismäßig kleine Sterne von Sonnengröße und kleiner. Sie sind recht langlebig, die masseärmsten von ihnen können sogar so alt werden wie das Universum. Außerdem handelt es sich dabei um die aussichtsreichsten Kandidaten, um dort erdähnliche Planeten aufzuspüren und zu charakterisieren.

Das ist zum einen deshalb der Fall, weil Transits eines Planeten bestimmter Größe bei kleineren Sternen ein entsprechend größeres Signal auslösen. Denn der Lichtverlust während einer Bedeckung entspricht dem Quadrat des Größenverhältnisses zwischen Exoplanet und Stern. Wegen der geringeren Strahlungsleistung dieser Sterntypen würden sich außerdem viele Exoplaneten mit derselben Oberflä-

chentemperatur wie die Erde näher am Zentralgestirn befinden und mit einer kürzeren Periode umlaufen. Das erleichtert die Suche nach ihnen.

Grundsätzlich lässt sich aber die Radialgeschwindigkeitsmethode leichter bei hellen Sternen anwenden, da man das eingehende Signal erst in ein Spektrum auffächern muss. Dass man bei den Kepler-Sternen bisher nur eine Hand voll auch mit der Radialmethode gefunden hat, erklärt sich durch die schwache Helligkeit dieser Sterne. Für solche Messungen sollten an sich schon lichtschwache Sterne also nicht zu weit entfernt sein.

Die Dopplermessungen sind vor allem auch deshalb wichtig, weil man aus den daraus ermittelten Massen sicher darauf schließen kann, ob es sich bei dem Transitobjekt tatsächlich um einen Exoplaneten handelt. Denn auch Braune Zwerge, die häufig nur so groß sind wie Jupiter und dessen 13- bis 80-fache Masse besitzen, können das Signal eines Exoplanetentransits vorgaukeln. Und selbst Doppelsternsysteme können Exoplanetentransits vortäuschen, etwa wenn man in schrägem Winkel auf ihre Bahnebene blickt. Dann deckt ein Stern den anderen nur ein klein wenig ab, wenn sie aneinander vorbeiziehen, und die Verdunkelung kann so gering sein, dass sie einem Planetentransit ähnelt.

Gerade bei M-Sternen haben Astronomen allerdings noch mit Oberflächenphänomenen wie Sternflecken oder stärker-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



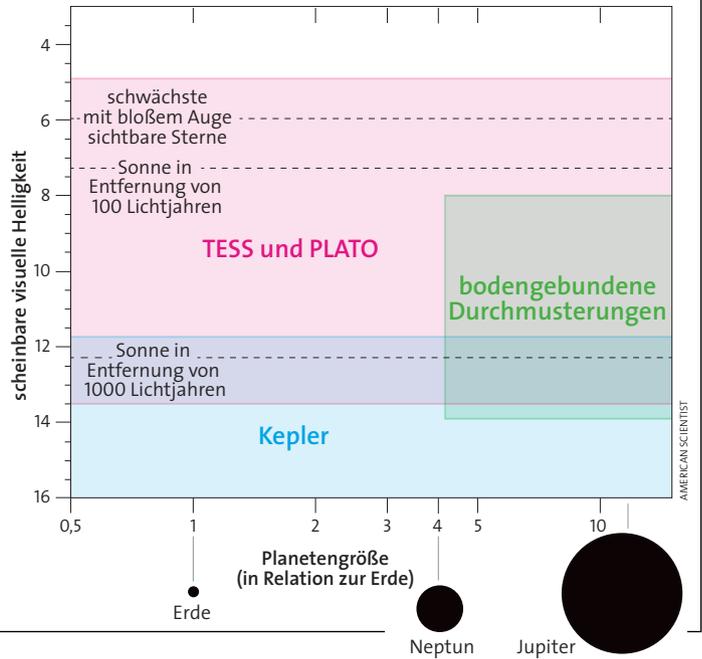
www.spektrum.de/t/exoplaneten



Viele Missionen – viele Ziele

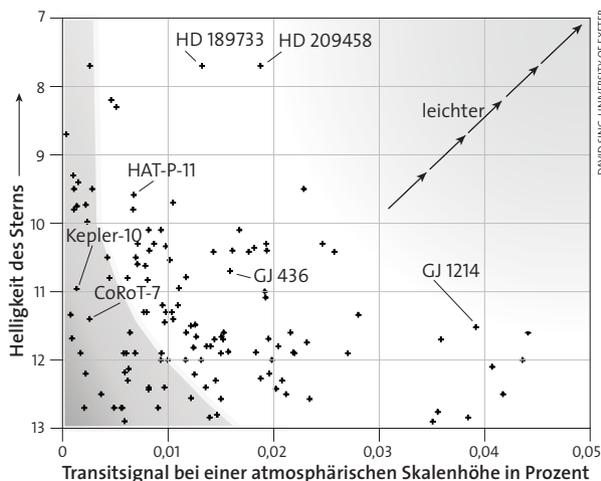
Die geplanten Missionen zur Suche nach Exoplaneten decken unterschiedliche Nischen ab: TESS und PLATO haben zwar ähnliche Planeten und Muttersterne im Visier, jedoch wird TESS nach Exoplaneten mit kurzperiodischen Orbits in der Größenordnung von Tagen oder Wochen suchen, während PLATO auch nach Umlaufbahnen mit einer Dauer von Monaten oder Jahren fahnden wird.

Die MEarth-Durchmusterung ist hier nicht aufgeführt, da sie im langwelligen roten und nicht im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums arbeiten wird. Das bodengebundene Projekt wird in der Lage sein, Transits mit Planeten kleiner als Neptun aufzuspüren, da es vor allem bei sehr kleinen Sternen, die vorwiegend rote und infrarote Strahlung aussenden, nach Planeten sucht.



Die Dicke macht's

Nur bei wenigen Exoplaneten sind die Atmosphären ausgeht und das Sternenlicht hell genug, dass sich die Gashüllen detektieren und charakterisieren lassen. Die Sternhelligkeit ist im sichtbaren Bereich V aufgezeichnet. Je niedriger der Wert für V ist, desto heller ist der Stern. Die Dichte der planetaren Gashülle nimmt nach einer so genannten atmosphärischen Skalenhöhe um 1/e ab. Exoplaneten, die wärmer sind, deren Atmosphären weniger schwere Elemente enthalten und die eine niedrigere Oberflächengravitation besitzen, weisen eine größere Skalenhöhe auf. Das heißt, ihre Atmosphäre ist ausgedehnter und folglich leichter zu beobachten. Die grau unterlegte Region kennzeichnet exoplanetare Atmosphären, die sich auf Grund des schlechten Signal-zu-Rausch-Verhältnisses nicht untersuchen lassen.



ren Helligkeitsausbrüchen zu kämpfen, die vom stellaren Magnetfeld herrühren. Sie wirken sich auf die Helligkeitsmessungen ähnlich aus wie ein Exoplanet, der vor dem Stern vorbeizieht. Diese Schwierigkeiten gleichen sich aber dadurch aus, dass diese Sterntypen etwa drei Viertel aller in der Umgebung der Sonne ausmachen und damit die Stichprobe ausreichend groß.

Auch Transit-Durchmusterungen mit bodengebundenen Observatorien kommen derzeit zügig voran. Sie sind zwar nicht so leistungsfähig, aber deutlich billiger und können außerdem die Weltraumbeobachtungen ergänzen. Das von Großbritannien geleitete Next-Generation Transit Survey etwa, ein Zusammenschluss aus mehreren vollautomatischen Teleskopen im Wüstenplateau Chiles, sucht nach Transits bei Sternen vom Typ K und M. Es baut auf dem WASP-Projekt (Wide Angle Search for Planets) auf. Und mit dem MEarth-Projekt, das David Charbonneau von der Harvard University leitet, haben Forscher die Supererde GJ 1214b entdeckt und suchen nun noch weiter nach kleinen Exoplaneten bei M-Sternen. Ebenfalls späte M-Sterne, und zwar die leuchtschwächsten, kleinsten und langlebigsten dieser Kategorie, hat SPECULOOS unter Federführung des belgischen Astronomen Michael Gillon als Ziel.

Warten auf den Giganten

2018 wird das schon lange geplante James Webb Space Telescope starten, der Nachfolger des Hubble Space Telescope. Allerdings werden seine Augen auf das Infrarote und nicht den sichtbaren und den ultravioletten Teil des elektromagnetischen Spektrums gerichtet sein. Mit einem Budget von acht Milliarden Dollar ist es das teuerste Teleskop der Menschheit. Der Koloss mit einem 6,5-Meter-Spiegel wird mit neuester Technologie ausgerüstet Spektren der leuchtschwächsten

Auch bodengebundene Observatorien wie WASP (Wide Angle Search for Planets) auf der Kanareninsel La Palma spielen eine wichtige Rolle bei der Suche nach Exoplaneten. Die Beobachtungen sind zwar durch die Atmosphäre eingeschränkt, dafür sind sie billiger und praktischer durchzuführen als solche aus dem All.



DON POLLACCO & MAX ALEXANDER, UNIVERSITY OF WARWICK

und am weitesten entfernten Objekte im Universum aufnehmen. Als die NASA seine Bedeutung für die Erforschung von Exoplaneten erkannte, änderte sie kürzlich das Design eines der Instrumente ab, um damit besser solche Transits bei hellen Sternen beobachten zu können.

Das Manko des JWST ist jedoch die stark begrenzte Beobachtungszeit. Die Infrarotdetektoren müssen mit flüssigem Helium gekühlt werden, um thermische Fluktuationen darin zu reduzieren, welche die astronomischen Signale überdecken können. Da das Helium nach und nach aufgebraucht wird, ist die Missionszeit für das JWST auf 5,5 bis maximal 10 Jahre begrenzt. Zudem müssen sich Astronomen der unterschiedlichsten Teilgebiete – etwa Experten für Schwarze Löcher, Galaxienentstehung und -entwicklung, protoplanetare Scheiben, interstellare Materie oder erste Sterne – diese Beobachtungszeit teilen. So werden die Kapazitäten des JWST nur dafür ausreichen, eine kleine Anzahl von exoplanetaren Atmosphären zu charakterisieren.

Obwohl es bereits jetzt nicht an Beobachtungskandidaten mit spannenden exoplanetaren Atmosphären mangelt, die das JWST untersuchen könnte, hoffen wir, bis zu seinem Start einige erdähnliche Exemplare bei deutlich helleren Sternen zu finden. Solche Welten in der lebensfreundlichen Zone um sonnenähnliche Sterne aufzuspüren, wird auch die Aufgabe der PLATO-Mission der ESA sein. Mit diesem ehrgeizigsten der drei Weltraumprojekte wollen die Forscher eine Datenbank echter Erdanaloge erstellen. Allerdings ist sein Start erst für 2024 angesetzt, und so wird es viel später als die anderen Unternehmungen damit beginnen, Ziele für das JWST zu finden.

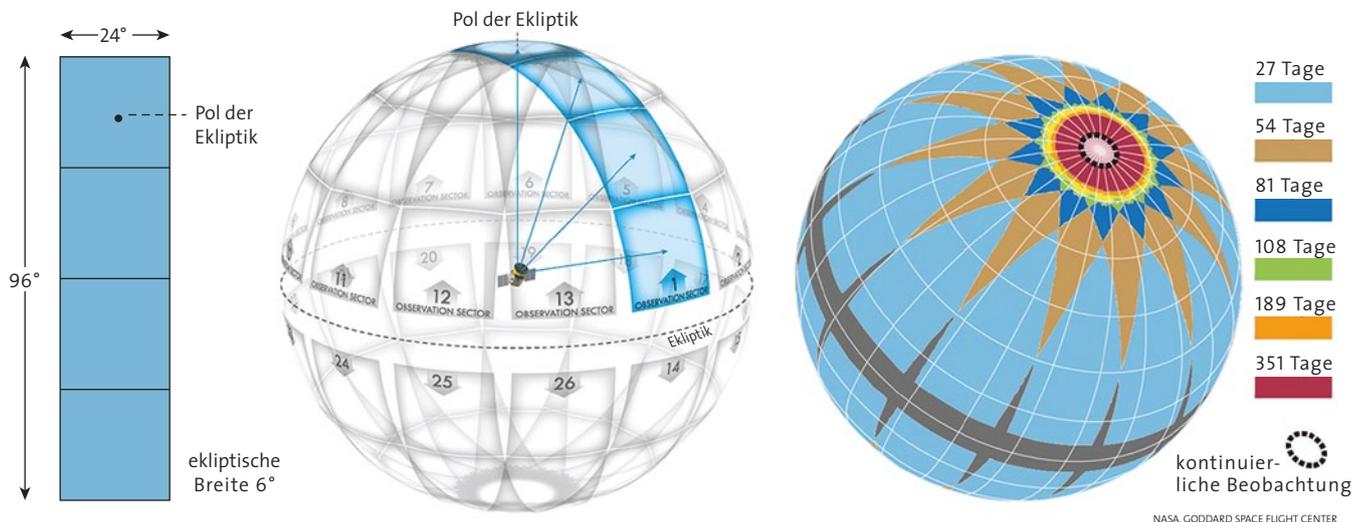
Nach dem Vorbild von WASP wird PLATO aus einem Array von 34 Teleskopen mit Zwölf-Zentimeter-Spiegeln bestehen. Seine Beobachtungsstrategie wird jene von Kepler, CHEOPS

und TESS vereinen: Der Satellit wird den gesamten Himmel abschnappen, mit der Möglichkeit, einzelne Regionen zwischen zwei und fünf Monate lang am Stück anzuvizieren. Jeder Himmelsausschnitt soll insgesamt zwei bis drei Jahre lang beobachtet werden. Das ist Zeit genug, um auch Exoplaneten mit Orbits in der Größenordnung von einem Jahr zu entdecken.

Das PLATO-Team wird eine Million Sterne überwachen. Die Forscher gehen davon aus, mehr als 1000 erdähnliche Planeten und Supererden zu finden, die auf unterschiedlichen Orbits ihre Muttersterne umrunden. Diese Beobachtungen wollen sie durch Radialgeschwindigkeitsmessungen mit Spektrografen der nächsten Generation vom Boden aus ergänzen. Letztlich wird PLATO uns bei der Charakterisierung von Schüsseleigenschaften fremder Welten einen gewaltigen Schritt voranbringen.

Pläne für die ferne Zukunft

Was aber wird nach diesen Missionen kommen, die auf Transitentdeckungen ausgerichtet sind? Im Wettbewerb um die Weltraumprojekte, bei dem CHEOPS und TESS das Rennen gemacht haben, gab es auf beiden Seiten des Atlantiks zwei Missionsvorschläge, die sich völlig auf die Charakterisierung von Atmosphären spezialisieren sollten, und zwar EChO und FINESSE. Sind erst einmal die besten und hellsten Ziele entdeckt, könnten die Ideen für diese Projekte wieder aufleben. Solche Missionen müssten Spektren vom sichtbaren bis zum mittleren infraroten Wellenlängenbereich aufnehmen. Der sichtbare Anteil würde Informationen über die Reflexionseigenschaften der Atmosphäre liefern und darüber, ob es Wolkenbildung gibt. Außerdem ließen sich die Edelgase identifizieren, die den Hauptanteil ihrer Masse ausmachen. Auch könnten wir damit Elemente wie Natrium oder Kalium nachweisen, die bisher bereits in den Atmosphären heißer, jupiter-



Der TESS-Satellit wird mit vier verschiedenen Kameras in vier unterschiedliche Richtungen blicken. Zusammen genommen wird ihr Gesichtsfeld 24 x 96 Quadratgrad messen. Beide Himmels hemisphären werden in jeweils 13 Abschnitte unterteilt, die vom Pol der Ekliptik bis zur Ekliptik reichen. Jede dieser Regionen wird 27 Tage lang beobachtet; für eine gesamte Hemisphäre benötigt TESS etwa ein Jahr. Da sich die Abschnitte in den Polregionen überlappen, können dort Sterne bis zu einem Jahr durchgehend beobachtet werden.

ähnlicher Planeten entdeckt wurden. Um Moleküle wie Wasser, Ammoniak, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid oder Methan zu finden, braucht man dagegen das infrarote Spektrum. Verfügbar sind erst einmal über eine Datenbank der chemischen Zusammensetzung exoplanetarer Atmosphären in unserer kosmischen Nachbarschaft, können wir vielleicht auch die Frage beantworten, ob Wasserwelten, also mit Ozeanen bedeckte Exoplaneten, im Universum allgegenwärtig sind.

Manche Astronomen jagen dem Heiligen Gral nach, eine zweite Erde direkt zu fotografieren (so genanntes »Direct Imaging«). Die Schwierigkeit dabei ist, das Licht des Muttersterns, der je nach Spektralbereich im Sichtbaren oder Infraroten Millionen- bis Milliardenmal heller als der Planet ist, zu blockieren. Hierzu wird entweder ein Koronograf direkt im (Weltraum-)Teleskop installiert oder der Stern durch ein anderes Objekt weit außerhalb des Teleskops abgeschattet. Letztere Möglichkeit ist aber technisch sehr viel aufwändiger. Man könnte dazu einen der bereits im All vorhandenen Satelliten verwenden. Die Kosten dafür wären allerdings doppelt so hoch wie für die Koronografenmethode.

Es gibt auch Überlegungen, den privaten Sektor für die Kartierung der chemischen und physikalischen Vielfalt von exoplanetaren Atmosphären in unserer kosmischen Nachbarschaft einzuspannen. Die Raumfahrt wird gerade unaufhaltsam kommerzialisiert. Ein privates Unternehmen, Mars One, will sogar hunderte Menschen zum Mars schicken. Würden dieselben finanziellen Mittel für ein Observatorium zur Untersuchung exoplanetarer Atmosphären verwendet, könnten wir unser Exoplaneteninventar vielleicht in wenigen Jahrzehnten vervollständigen. Es gibt bereits die Idee, einen Wettbewerb um ein solches Observatorium auszuloben, das von privaten Investoren getragen wird.

Mitten in diesem Rausch an Aktivität müssen wir uns oft gegenüber Kollegen aus anderen Gebieten der Physik verteidigen, die Exoplanetenforschung nicht als Grundlagenforschung betrachten, sondern nur als angewandte Physik. Obwohl Exoplanetenjäger sicher nicht davon ausgehen, dass sie großartige neue Einblicke etwa in eine alles vereinheitlichende Theorie erhalten werden, ist die wissenschaftliche Vision nicht geringer: Es geht darum, die Menschheit nicht nur aus dem Zentrum des physikalischen, sondern auch des biologischen Universums zu verbannen und damit die kopernikanisch-galileische Revolution zu vollenden, die mit der Erkenntnis begann, dass die Erde um die Sonne kreist. ~

DIE AUTOREN



Kevin Heng (links) arbeitet als Astrophysikprofessor an der Universität Bern, Schweiz. Er ist Mitglied des wissenschaftlichen Kernteams von CHEOPS und außerdem an der PLATO-Mission beteiligt. **Joshua Winn** ist Physikprofessor am Massachusetts Institute of Technology und war Mitglied des Wissenschaftsteams der Kepler-Mission.

LITERATURTIPP

Kaltenegger, L.: Faszinierende neue Welten. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2013, S. 58–67
Hier erfahren Sie mehr über die Spurensuche im All.

© American Scientist
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400767

Unsere Neuerscheinungen



Politik: Beeinflussen unsere Gene, wen wir wählen? • Frauenquote: Was Gleichberechtigung im Beruf fördert • Islamismus: Wie man Dschihadisten zurückgewinnt • € 8,90



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



Schalten mit Licht: Schnelle Signale durch ultrakurze Laserpulse • 3-D-Druck: Individuelle Fertigung revolutioniert die Industrie • Autonome Autos: Dilemma bei Unfallvermeidung • € 8,90



Esskultur: Evolution am Kochtopf • Adipositas: Übergewicht durch Darmflora • Fischfarmen für eine Milliarde Chinesen • Nahrungsergänzungsmittel: Entzauberte Antioxidanzien • € 8,90



Cappuccino-Effekt: Klänge aus dem Milchschaum • Heiz-Paradoxon: Rätselhafte Temperaturzunahme • Bermuda-Dreieck: Lassen gigantische Gasblasen Schiffe sinken? • € 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 (Neuaufgabe)

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!



Hüpf, Steinchen, hüpf!

Treffen flache Kiesel unter kleinem Winkel auf eine Wasseroberfläche, wirkt diese wie eine Sprungschanze. Das kann sich einige Male wiederholen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Es fliegt ein Stein (die Hand warf ihn gut)
Kräftig, waagrecht über die Flut.
Eine Säule steigt auf, und der Sonne Schein
Malt einen Regenbogen hinein.
Und weiter, ein zweites und drittes Mal,
Erhebt sich der siebenfarbige Strahl.
Aber je weiter vom Ufer entfernt,
Der Stein im Fluge das Fliegen verlernt.
Eine Schwere zieht ihn, es ebbt seine Kraft,
Der Strahl ermattet und erschläfft.
Ein Kräuseln noch einmal, ein Tropfen blinkt,
Und dann Ruh' und Stille – der Stein versinkt.

Theodor Fontane (1819–1898)

Kinder und Erwachsene haben gleichermaßen Spaß daran, glatte Steine über ein ruhiges Gewässer springen zu lassen. Titschen, Plätteln, Schiefeln oder ganz einfach Steinhüpfen sind nur einige der Ausdrücke, mit denen dieses Spiel mit der einfachen Regel, den Stein möglichst oft aufsetzen zu lassen, je nach Region bezeichnet wird. Dass die Wurfobjekte unter gewissen Bedingungen nicht gleich untergehen, ist mindestens seit der Antike bekannt.

Heute gibt es sogar Wettbewerbe, in denen wie bei anderen sportlichen Aktivitäten Bestmarken angestrebt werden. Den Weltrekord stellte 2013 Kurt Steiner mit 88 Sprüngen auf. Dabei überbrückte er eine Distanz von fast 100 Metern. Für jemanden, der es mit Mühe auf einige wenige Hopser bringt, klingt das bewundernswert und ernüchternd zugleich.

Dass man solche Tricks ausgerechnet mit Steinen versucht, die eigentlich dafür bekannt sind, wegen ihrer großen Dichte unterzugehen, hat vor allem schlicht damit zu tun, dass sie sehr häu-

fig am Rand von Gewässern zu finden sind und so förmlich dazu herausfordern, hineingeschleudert zu werden. Außerdem erfüllen Kiesel eine weitere wichtige Bedingung: Das Wurfobjekt muss möglichst glatt und rund sein. Am Ufer liegen die Steine oft bereits geschliffen herum, nachdem die Flüsse sie auf dem Weg ins Tal lange aneinandergerieben haben. Wenn die mitgeschwemmten Felsbrocken dann auch noch aus dünnen Sedimentgesteinschichten stammen, dominieren flache Kiesel – perfekt zum Titschen.

Um eine solche Scheibe zum Hüpfen zu bringen, kommt es darauf an, ihr durch die Wechselwirkung mit dem Wasser zusätzlich zum Geradeausflug eine Bewegungskomponente nach oben zu geben. Das ist nur durch eine entsprechende Kraft beim Auftreffen möglich. Denn von dieser hängt es ab, ob das Plättchen untergeht oder genügend stark abprallt. Dafür muss der Stein üblicherweise mit der flachen Seite leicht zur Horizontalen geneigt auf einer niedrigen Wurfbahn auf das Wasser zufliegen. Es sind also zwei Winkel von Bedeutung: der Aufschlagswinkel, den die Bahn des Steinschwerpunkts im Moment des Auftreffens mit der Wasseroberfläche bildet, und der Nei-

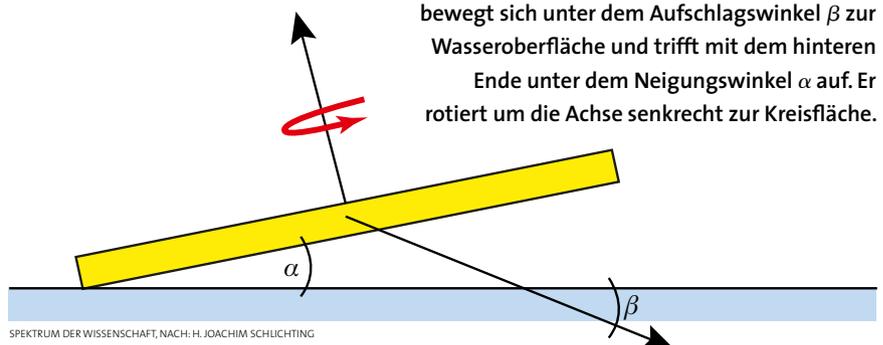
gungswinkel, den seine flache Seite zu der Wasseroberfläche einnimmt (siehe Illustration unten).

Pirouetten auf dem Wasser

Um einen relativ konstanten Neigungswinkel zu erzeugen, hilft ein einfacher und wirkungsvoller Trick: Aus dem Handgelenk heraus verleiht man dem Stein eine möglichst schnelle Drehung um seine vertikale Achse. Durch diesen Effekt wird er zum rotierenden Kreisel. Ein solcher Körper behält seine Rotationslage weitgehend bei. So wird es überhaupt erst möglich, beim Abwurf den Neigungswinkel idealerweise für den gesamten Flug festzulegen.

Der so geworfene kreiselnde Stein trifft mit der hinteren Kante zuerst auf. Dabei übt er eine Kraft auf das Wasser aus und setzt es in Bewegung. Dann wirkt eine gleich große Reaktionskraft (Strömungswiderstand), die proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit und zur Größe der gemeinsamen Kontaktfläche ist. Solange die Reaktionskraft wegen der anfangs kleinen Berührungsfläche nicht ausreicht, die Gewichtskraft des Steins aufzuheben, taucht er weiter ins Wasser ein. Infolgedessen wächst der Querschnitt, bis sie so groß ist, dass er nicht nur nicht wei-

Der als kreisrunde Scheibe idealisierte Stein bewegt sich unter dem Aufschlagswinkel β zur Wasseroberfläche und trifft mit dem hinteren Ende unter dem Neigungswinkel α auf. Er rotiert um die Achse senkrecht zur Kreisfläche.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H. JOACHIM SCHLICHTING



Der flache Stein im Hintergrund rechts oben ist kurz davor, erneut aufzutitschen. Da sich die Störungen der Wasseroberfläche nur verhältnismäßig langsam zurückbilden, lässt sich die Zahl der Sprünge gut abzählen.

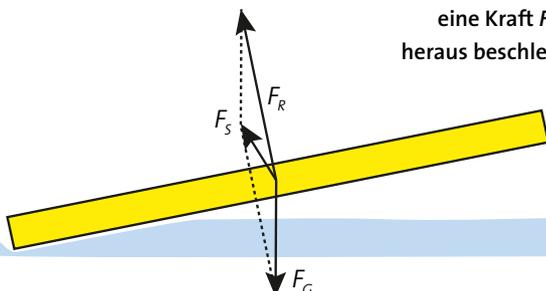
ter sinkt, sondern auf der inzwischen entstandenen Wasserrampe nach oben beschleunigt wieder aus dem Wasser herausschießt (siehe Grafik unten auf dieser Seite). Damit genau das eintritt, müssen der Aufschlagswinkel und der Neigungswinkel im passenden Größenbereich liegen.

Für das erste Abprallen hat man es noch im wörtlichen Sinn ganz in der Hand, die Winkel unabhängig voneinander festzulegen. Danach hängt der Aufschlags- auch vom Neigungswinkel ab, den die Rotation des Steins wiederum weitgehend konstant hält.

Soll das platte Geschoss viele Sprünge machen, benötigt es sowohl eine möglichst große Bewegungs- als auch Rotationsenergie, die jeweils proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit

von Translation beziehungsweise Rotation ist. Weil diese durch die Muskelkraft des Werfers hervorgebracht werden sowie durch dessen Geschick, sie optimal umzusetzen, gibt es eine natürliche Grenze für die Anzahl der Hüpfen. Es ist sehr wichtig, die Energieverluste des Steins durch Reibung mit dem Wasser zu minimieren. Das läuft vor allem darauf hinaus, die Kontaktzeiten in einem optimalen Bereich zu halten. Sie sollten so kurz wie möglich sein, um den Kiesel wenig abzubremsen, aber doch lang genug, damit die Reaktionskraft für die Sprünge ausreicht. Um das zu erreichen, müssen Aufschlags- und Neigungswinkel so zueinander passen, dass jedes Mal möglichst maximale Abprunggeschwindigkeit und kleinste Kontaktzeit zusammentreffen.

Auf den Stein wirken bei Auftreffen auf dem Wasser seine Gewichtskraft F_G und die Reaktionskraft des Wassers F_R . Daraus resultiert eine Kraft F_S , die den Stein aus dem Wasser heraus beschleunigt, aber auch seine Vorwärtsbewegung bremst.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H. JOACHIM SCHLICHTING

Das Titschen wurde in den letzten Jahren auch Gegenstand systematischer Untersuchungen. Forscher studierten an Modellsteinen aus Aluminiumplättchen bei gegebenen Abmessungen und fester Masse sowohl experimentell als auch theoretisch die optimalen Parameter, um die höchste Anzahl von Sprüngen zu erreichen. So haben sie beispielsweise herausgefunden, dass für einen perfekten Sprung ein Neigungswinkel zur Wasserfläche von etwa 20 Grad nötig ist – und zwar unabhängig von der Translations- und Rotationsgeschwindigkeit. Die wissenschaftlichen Ergebnisse nützen vielleicht auch den Rekordjägern, ihrer Intuition und Erfahrung mit Physik auf die Sprünge zu helfen und aus ihren Würfen noch mehr herauszuholen. ~

DER AUTOR



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

QUELLE

Rosellini, L. et al.: Skipping stones. In: Journal of Fluid Mechanics 543, S. 137–146, 2005

Dieser Artikel und Links im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400769



NASA / JPL - CALTECH

In der nächsten Umgebung eines Schwarzen Lochs – hier grafisch dargestellt – ist die Raumzeit so stark verzerrt, dass Quanteneffekte auftreten müssen.

QUANTENGRAVITATION

Raum – Zeit – Verschränkung

Viele Physiker halten die Verschränkung für das grundlegende Quantenphänomen überhaupt. Einige mutmaßen jetzt sogar, Raum und Zeit seien Folgen quantenmechanischer Verschränkungsprozesse.

Von Ron Cowen

Anfang 2009 beschloss Mark Van Raamsdonk, ein junger Physikprofessor an der University of British Columbia in Vancouver (Kanada), sein erstes Forschungssemester einem der größten Rätsel der Physik zu widmen: dem Zusammenhang zwischen Quantenmechanik und Gravitation. Nach einem Jahr reichte er einen Artikel zum Thema beim »Journal of High Energy Physics« ein.

Im April 2010 lehnte die Zeitschrift seine Arbeit ab – mit einem Gutachten, das den Verfasser als Spinner einstufte. Auch bei der Zeitschrift »General Relativity and Gravitation« hatte er wenig Glück: Das Gutachten fiel vernichtend aus, und die Redaktion forderte eine radikale Neufassung.

Doch unterdessen hatte Van Raamsdonk eine kürzere Version bei dem angesehenen jährlichen Essaywettbewerb der Gravity Research Foundation in Wellesley (Massachusetts) eingereicht. Dort gewann er nicht nur den ersten Preis, sondern zu seiner Genugtuung musste der prämierte Text ausgerechnet in »General Relativity and Gravitation« publiziert werden. Das geschah im Juni 2010.

Allerdings war die Redaktion aus gutem Grund vorsichtig gewesen: Seit fast 100 Jahren bemühen sich Theoretiker ver-

AUF EINEN BLICK

GRAVITATION ALS QUANTENEFFEKT

- 1** Nach Einstein ist die **Gravitation** keine Kraft, sondern eine von schweren Massen erzeugte **Krümmung der Raumzeit**.
- 2** Deshalb muss die ersehnte **Vereinigung von Gravitation und Quantenphysik** das Kunststück fertigbringen, die Geometrie der Raumzeit quantenmechanisch zu beschreiben.
- 3** Mehrere Theoretiker versuchen, die Struktur von Raum und Zeit als Ergebnis von **Quantenverschränkungen** zu erklären.

geblich um die Vereinigung von Quantenmechanik und Gravitation. Erstere beschreibt die Welt im Kleinen – ein seltsames Reich, in dem ein Teilchen sich gleichzeitig an vielen Orten aufhalten und zugleich zwei entgegengesetzte Spins haben kann. Hingegen beherrscht die Gravitation das Universum im Großen und Ganzen, vom Fall eines Apfels bis zur Bewegung der Planeten, Sterne und Galaxien – und sie gehorcht Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Dieser Theorie zufolge ist die Gravitation pure Geometrie: Wenn Teilchen in der Nähe eines massereichen Objekts keine geraden Bahnen beschreiben, dann nicht, weil eine Kraft auf sie wirkt, sondern, weil Raum und Zeit gekrümmt sind.

Obwohl beide Theorien experimentell tausendfach bestätigt wurden, scheinen sie völlig unvereinbar zu sein. Zudem war Van Raamsdonks Lösungsvorschlag in den Augen der Gutachter äußerst seltsam. Er behauptete, man müsse nur das Phänomen der quantenmechanischen Verschränkung heranziehen, dem zufolge die Messung eines Teilchens augenblicklich den Zustand eines beliebig weit entfernten Partnerteilchens festlegt. Einstein hatte seinerzeit diese Idee als »spukhafte Fernwirkung« kritisiert – und nun kam Van Raamsdonk mit der Behauptung, ausgerechnet die Verschränkung sei die Grundlage von Einsteins geometrischer Theorie der Gravitation! »Die Raumzeit«, behauptet Van Raamsdonk, »ist bloß ein geometrisches Bild der verschränkten Vorgänge im Quantensystem.«

Die Idee ist noch längst nicht bewiesen, und sie stellt gewiss keine vollständige Theorie der Quantengravitation dar. Doch andere Untersuchungen sind zu ganz ähnlichen Schlüssen gekommen und haben das Interesse prominenter Theoretiker geweckt. Mehrere Physiker setzen nun modernste Mittel der Quanteninformatik ein, um die Beziehung zwischen Geometrie und Verschränkung zu vertiefen. »Ich bin fest davon überzeugt«, betont Bartłomiej Czech von der kalifornischen Stanford University, »dass die Verbindungen zwischen Quantentheorie und Gravitation, die sich in den letzten zehn Jahren ergeben haben, einen echten Durchbruch bedeuten.«

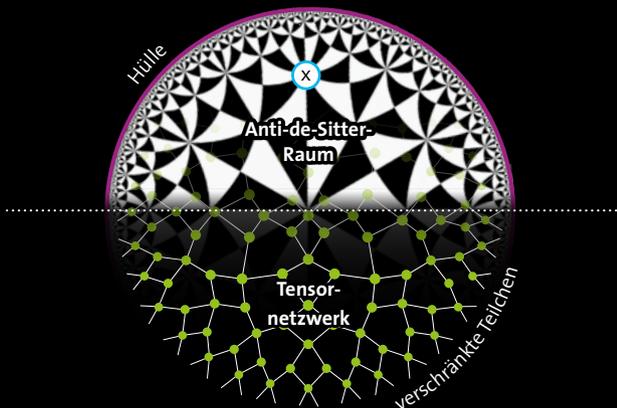
Gravitation ohne Schwerkraft

Dieser Ansatz beruht großteils auf einer 1997 publizierten Entdeckung des Physikers Juan Maldacena, der jetzt am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) tätig ist. Maldacena postulierte eine Beziehung zwischen zwei scheinbar ganz unterschiedlichen Modelluniversen. Das eine heißt Anti-de-Sitter-Raum (AdS). Dieses Modell ähnelt unserem Kosmos – allerdings ohne Expansion oder Kontraktion –, ist dreidimensional, enthält Quantenteilchen und gehorcht den einsteinschen Gravitationsgleichungen. Das andere Modell enthält ebenfalls Elementarteilchen, die sich jedoch in nur zwei Dimensionen bewegen und keine Schwerkraft erfahren. Es bildet eine mathematisch definierte Membran, die von jedem Punkt innerhalb des AdS-Raums unendlich weit ent-

NIK SPENCER / NATURE, COWEN, R.: SPACE, TIME, ENTANGLEMENT. NATURE 527, S. 290-293, 2015

Geometrie und Verschränkung

In einem geometrisch begrenzten Modelluniversum namens Anti-de-Sitter-Raum ist die Schwerkraft an einem Punkt x im Innern mathematisch äquivalent zu einer Quantenfeldtheorie auf der Hülle. Dieses Universum lässt sich in zwei Dimensionen durch dicht gepackte identische Dreiecke veranschaulichen, die zur Hülle hin immer verzerrter aussehen.



Physikalisch ähnelt dieses Muster so genannten Tensornetzwerken, welche die Wechselwirkung zahlreicher Quantenteilchen beschreiben. Auf der Hülle erscheinen die Teilchen quantenmechanisch verschränkt.

Was ist Verschränkung?

Wie Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen 1935 in der berühmten EPR-Arbeit nachwies, kann der enge Zusammenhang der Teile eines Quantensystems so weit gehen, dass die Messung einer Komponente selbst über große Entfernungen hinweg augenblicklich den Zustand der anderen Komponente festlegt.

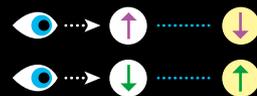
Beispiel: Verschränkte Teilchenspins



Wenn der Spin des einen Teilchens aufwärts weist, ist der Spin des anderen abwärts gerichtet, und umgekehrt.



Die Teilchen werden getrennt.



Die Beobachtung des einen Teilchens legt augenblicklich den Spin des anderen fest.

fernt liegt, ihn aber dennoch komplett umschließt – wie die zweidimensionale Ballonhülle ein dreidimensionales Luftvolumen. Die Teilchen der Membran gehorchen den Quantengleichungen der so genannten konformen Feldtheorie (conformal field theory, CFT).

Wie Maldacena entdeckte, sind die beiden Modelle völlig äquivalent; zwischen ihnen herrscht so genannte Dualität. Die relativ einfachen CFT-Gleichungen ohne Schwerkraft, die für die Hülle gelten, enthalten dieselbe Information und beschreiben dieselbe Physik wie die komplizierteren Gleichungen, denen das AdS-Universum im Innern gehorcht.

»Das ist wie ein Wunder«, meint Van Raamsdonk. Maldacenas Dualität erlaubte den Physikern, bei der Quantengravitation im AdS-Raum das Problem der Schwerkraft zu umgehen: Sie mussten nur den äquivalenten Quantenzustand auf der Hülle betrachten. Seither fasziniert diese Idee so viele Forscher, dass Maldacenas Artikel zu den meistzitierten physikalischen Arbeiten zählt.

Van Raamsdonk wagte sich in seinem umstrittenen Artikel an die große Frage: Wie erzeugt ein Quantenfeld auf der Hülle eigentlich die Schwerkraft im Inneren? Es gab zwar Indizien, dass die Antwort mit irgendeinem Zusammenhang zwischen Geometrie und Verschränkung zu tun haben könnte, aber alle früheren Arbeiten zum Thema hatten nur Spezialfälle untersucht, beispielsweise ein AdS-Universum, das ein Schwarzes Loch enthält. Van Raamsdonk wollte heraus-

finden, ob sich hier ein allgemeiner Zusammenhang abzeichnet oder bloß eine mathematische Kuriosität.

Zunächst betrachtete er ein leeres AdS-Universum, dem ein einzelnes Quantenfeld auf der Hülle entspricht. Nur bei diesem Feld und den darin herrschenden Quantenbeziehungen findet Verschränkung statt. Nun fragte sich Van Raamsdonk: Was geschieht mit dem AdS-Raum im Innern, wenn diese Hüllenverschränkung beseitigt wird?

Für die Antwort benutzte er mathematische Werkzeuge, die Shinsei Ryu von der University of Illinois in Urbana-Champaign und Tadashi Takanagi von der Universität Kioto in Japan 2006 entwickelt hatten. Damit reduzierte er langsam und methodisch die Verschränkung des Hüllenfelds und beobachtete, wie sich dadurch die Raumzeit im Innern stetig streckte und auseinanderzog. Am Ende, wenn die Verschränkung ganz beseitigt worden war, zerriss die Raumzeit in separate Stücke wie ein überdehnter Kaugummi (siehe Kasten unten).

Einstein und die Verschränkung

Wie Van Raamsdonk erkannte, gilt die Beziehung zwischen Geometrie und Verschränkung ganz allgemein. Die Verschränkung ist notwendig, damit die Raumzeit ein kontinuierliches Ganzes bildet – und zwar nicht nur in exotischen Spezialfällen mit Schwarzen Löchern, sondern immer.

»Offenbar war ich erstmals der Lösung einer grundlegenden Frage nähergekommen«, erinnert sich Van Raamsdonk:

NIK SPENCER / NATURE; COWEN, R. SPACE, TIME, ENTANGLEMENT, NATURE 527, S. 290-293, 2015

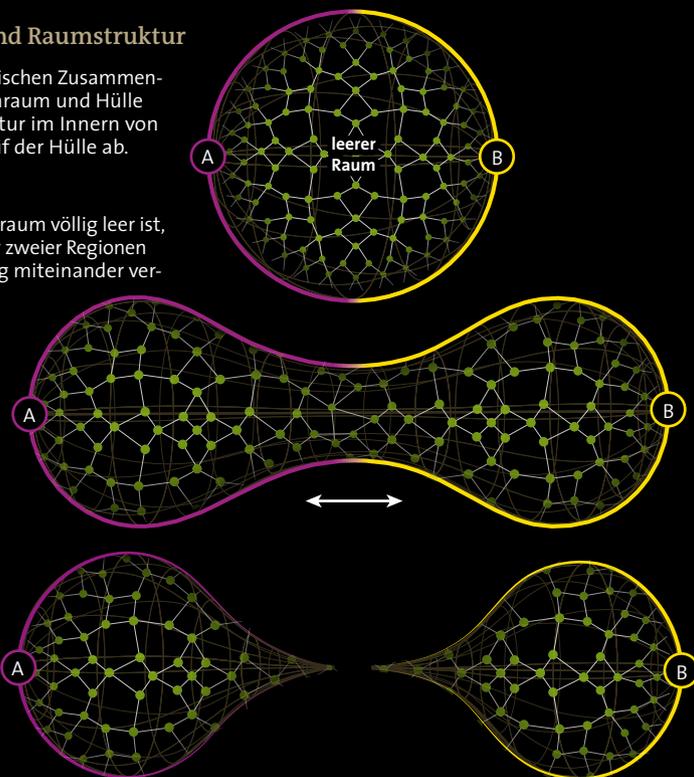
Verschränkung und Raumstruktur

Wegen des mathematischen Zusammenhangs zwischen Innenraum und Hülle hängt die Raumstruktur im Innern von der Verschränkung auf der Hülle ab.

Selbst wenn der Innenraum völlig leer ist, sind die Quantenfelder zweier Regionen der Hülle (A und B) eng miteinander verschränkt.

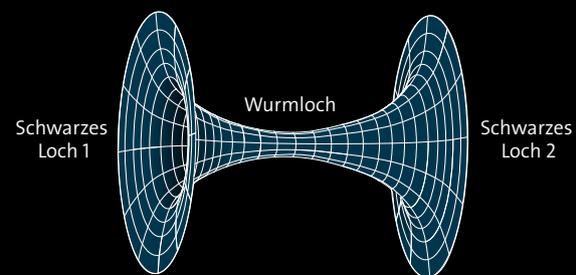
Wenn die Verschränkung zwischen den Hüllenregionen abnimmt, beginnt sich der Innenraum auseinanderzuziehen.

Bei verschwindender Verschränkung spaltet sich das Universum entzwei. Das bedeutet: Die Verschränkung ist nötig, damit der Raum existiert.



Die ER=EPR-Hypothese

Wie Einstein und Rosen 1935 in ihrer ER-Arbeit zeigten, können zwei separate Schwarze Löcher durch einen Raumzeitunnel – später Wurmloch genannt – miteinander verbunden sein.



Nach der ER=EPR-Hypothese ist die durch ein Wurmloch hergestellte Verbindung dasselbe wie eine Quantenverschränkung, nur in viel größerem Maßstab.



»Was ist die Raumzeit eigentlich?« Die Quantenverschränkung als geometrischer Klebstoff – das ist Van Raamsdonks kühne Idee, die unter Physikern immer mehr Aufmerksamkeit findet. Bisher hat niemand einen strengen Beweis erbracht, also bleibt die Idee vorläufig eine reine Vermutung. Doch viele unabhängige Argumente stützen sie.

Zum Beispiel publizierten Maldacena und Leonard Susskind von der Stanford University eine ähnliche Hypothese, die sie ER=EPR taufte, in Anlehnung an zwei bahnbrechende Arbeiten aus dem Jahr 1935. ER steht für einen von Einstein und dem amerikanisch-israelischen Physiker Nathan Rosen verfassten Artikel, der die Idee des Wurmlochs einführte: eines Tunnels durch die Raumzeit zwischen zwei Schwarzen Löchern. Reale Partikel könnten – obwohl Science-fiction-Filme gern mit dem Gedanken spielen – nicht durch ein Wurmloch gelangen, weil sie sich dafür mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen müssten. EPR bezeichnet die berühmte Arbeit von Einstein, Rosen und dem amerikanischen Physiker Boris Podolsky, die das Quantenphänomen der Verschränkung analysiert.

Verborgene Zusammenhänge

Wie Maldacena und Susskind vermuteten, gibt es zwischen beiden Themen einen Zusammenhang. Wenn Teilchen verschränkt sind, dann sind sie durch ein Wurmloch verbunden – und umgekehrt: Was Physiker unter Wurmloch verstehen, entspricht einer Verschränkung. Beide Begriffe beschreiben dieselbe Realität.

Von dieser Realität hat allerdings niemand eine klare Vorstellung. Maldacena, Susskind und andere versuchen zu klären, ob die ER=EPR-Vermutung mathematisch zu den bekannten Eigenschaften von Verschränkung und Wurmlöchern passt – und das scheint tatsächlich der Fall zu sein.



Weitere Argumente für eine Beziehung zwischen Geometrie und Verschränkung entstammen der Festkörperphysik sowie der Quanteninformatik. Auf beiden Gebieten spielt die Quantenverschränkung eine zentrale Rolle.

Beispielsweise haben Festkörperphysiker so genannte Tensornetzwerke entwickelt, um Quantenzustände von riesigen Teilchenmengen zu beschreiben. Mit dieser Methode berechnete Brian Swingle 2007, damals Student am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, wie Elektronenschwärme in einem Festkörper wechselwirken. Er konstruierte zu diesem Zweck sukzessive ein abstraktes Netzwerk, indem er von benachbarten, bereitwillig wechselwirkenden Elektronenpaaren ausgehend immer größere Gruppen miteinander verband, bis daraus ein Muster entstand, das einem Stammbaum glich. Bei einer Vorlesung über Quantenfeldtheorie erfuhr Swingle von Maldacenas AdS-CFT-Dualität und bemerkte eine verblüffende Übereinstimmung: Die Beziehung zwischen dem AdS-Raum und der CFT-Hülle wies ebenfalls eine baumähnliche Netzwerkstruktur auf.

Swingle fragte sich, ob die Ähnlichkeit mehr war als bloßer Zufall. 2012 veröffentlichte er Berechnungen, mit denen er unabhängig von Van Raamsdonk die Idee vom Zusammenhang zwischen Geometrie und Verschränkung unterstützte. »Man kann sich den Raum mit Hilfe der Tensoren sehr präzise als etwas vorstellen, das aus der Verschränkung hervorgeht«, meint Swingle, der jetzt an der Stanford University tätig ist und eine regelrechte Welle von Tensornetzwerken zur Erforschung der verschränkten Raumzeitgeometrie beobachtet.

Ein weiteres Argument liefert die Theorie der Fehlerkorrektur von Quantencomputern. Solche Maschinen kodieren Information nicht in klassischen Bits, sondern in so genannten Qubits, das heißt in Quantenzuständen, die gleichzeitig die Werte 0 und 1 annehmen können – wie ein Elektron, dessen Spin zugleich auf- und abwärtsweist. Wenn solche Qubits miteinander verschränkt werden, könnte ein Quantencomputer theoretisch Kalkulationen ausführen, für deren klassische Bewältigung nicht einmal die Lebensdauer des Universums ausreicht. Doch in der Praxis ist der Vorgang extrem störungsanfällig: Schon der kleinste Umwelteinfluss zerstört die empfindliche Verschränkung der Qubits.

Darum braucht man quantenmechanische Korrekturcodes, welche die gestörten Qubit-Korrelationen reparieren und die Berechnungen gegen Umwelteinflüsse immunisieren. Diese Codes sind stets »nichtlokal«: Die zur Wiederherstellung eines Qubits nötige Information muss über einen großen Raumbereich verteilt werden. Diese Nichtlokalität fasziniert wiederum Quanteninformatiker, sobald sie Maldacenas ebenfalls nichtlokale AdS-CFT-Dualität zwischen Innenraum und Hülle kennen lernen: Die in einem kleinen Gebiet des Innenraums enthaltene Information breitet sich auf der Hülle über ein riesiges Gebiet aus. In einem im Juni 2015 publizierten Artikel postulierten die Physiker Daniel Harlow von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und John Preskill vom California Institute of Technology in Pasadena,



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



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

die Maldacena-Dualität sei selbst ein Quantenkorrekturcode. Sie demonstrierten das zunächst mathematisch an einem einfachen Modell und versuchen nun, einen allgemeineren Beweis zu führen.

»Seit Jahren heißt es, die Verschränkung sei irgendwie wichtig für den Innenraum«, erklärt Harlow. »Aber jetzt bekommen wir erstmals eine Ahnung vom Wie und Warum.«

Über die Verschränkung hinaus

Wegen solcher Anfangserfolge spendet die Simons Foundation, eine gemeinnützige Stiftung in New York, seit August 2015 mindestens vier Jahre lang jährlich 2,5 Millionen Dollar für ein großzügiges Programm zur Erforschung des Zusammenhangs zwischen Gravitation und Quanteninformation. »Die Informationstheorie liefert wichtige Anstöße für die Grundlagenphysik«, sagt Programmleiter Patrick Hayden von der Stanford University. Ziel ist ein umfassendes Lexikon zur Übersetzung geometrischer Begriffe in die Sprache der Quantenphysik und umgekehrt; es wird den Physikern hoffentlich den Weg zur vollständigen Theorie der Quantengravitation ebnet.

Dabei sind allerdings mehrere Hindernisse zu überwinden. Erstens gilt das statische und begrenzte Weltmodell der AdS-CFT-Dualität nicht für unser expandierendes und unendliches Universum. Zwar glauben viele Theoretiker, dass Berechnungen mit Hilfe der Maldacena-Dualität gewisse Aussagen über unser Universum liefern, aber bisher herrscht große Unstimmigkeit über deren Interpretation.

Zweitens bezieht sich die Standarddefinition der Verschränkung nur auf Partikel zu einem bestimmten Zeitpunkt. Eine vollständige Theorie der Quantengravitation muss die Zeit enthalten. »Die Verschränkung ist ein großes Kapitel«, meint Susskind, »aber sie erzählt nicht die ganze Geschichte.«

Nach Susskinds Überzeugung muss ein weiterer Begriff der Quanteninformatik ins Spiel kommen: die rechnerische Komplexität, definiert als die Anzahl der logischen Schritte oder Rechenoperationen, die für die Zustandsbeschreibung eines Quantensystems erforderlich sind. Ein System mit geringer Komplexität entspricht einem Quantencomputer, bei dem fast alle Qubits gleich null sind; er wäre einfach zu definieren und zu bauen. Ein hochkomplexes System ist analog zu einer Gruppe von Qubits, die eine Zahl kodieren, deren Berechnung sehr lange dauern würde.

Susskind begann um 2005 über rechnerische Komplexität nachzudenken, als ihm auffiel, dass die allgemeine Relativitätstheorie ein Wurmloch im AdS-Raum zulässt, das mit der Zeit immer länger wird. Er fragte sich, was dabei auf der CFT-Hülle geschieht. Mit Verschränkung konnte es nichts zu tun haben, denn die dafür verantwortlichen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Teilchen auf der Hülle erreichen ihr Maximum schon in weniger als einer Sekunde. Doch 2014 zeigte er zusammen mit Douglas Stanford, der jetzt am Institute for Advanced Study arbeitet: Der Quantenzustand auf der Hülle variiert mit der Zeit exakt so, wie man es auch von der Komplexität erwarten würde.

»Anscheinend wächst das Innere eines Schwarzen Lochs genau im selben Maß wie die rechnerische Komplexität«, erklärt Susskind. Während die quantenmechanische Verschränkung Raumregionen korreliert, könnte die Komplexität das Wachstum des Raums antreiben – und auf diese Weise die Zeit ins Spiel bringen.

Vielleicht hängt die Zunahme der Komplexität mit der Expansion des Universums zusammen, spekuliert Susskind. Außerdem vermutet er: Da im Innern eines Schwarzen Lochs die Quantengravitation gelten muss, spielt für deren vollständige Theorie die rechnerische Komplexität vielleicht eine entscheidende Rolle.

Trotz aller noch offenen Probleme meinen die Theoretiker auf der richtigen Spur zu sein. »Früher wusste ich nicht, woraus der Raum besteht«, sagt Swingle. »Es war unklar, ob die Frage überhaupt Sinn hat.« Doch das ändert sich nun. »Wir kennen im Prinzip die Antwort«, betont er. »Der Raum besteht aus Verschränkung.«

Was Van Raamsdonk betrifft, so hat er seit 2009 rund 20 Artikel über Quantenverschränkung verfasst – und sie sind alle zur Publikation angenommen worden. 

DER AUTOR



Ron Cowen ist Wissenschaftspublizist. Er lebt in Silver Spring (US-Bundesstaat Maryland).

QUELLEN

- Maldacena, J. M., Susskind, L.:** Cool Horizons for Entangled Black Holes. In: Fortschritte der Physik 61, S. 781–811, 2013
Swingle, B.: Entanglement Renormalization and Holography. In: Physical Review D 86, 065007, 2012
Van Raamsdonk, M.: Building Up Spacetime with Quantum Entanglement. In: General Relativity and Gravitation 42, S. 2323–2329, 2010

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400768

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 527, S. 290–293, 19. November 2015

Die ersten Metropolen

Nirgendwo entwickelten sich so früh so viele urbane Zentren wie im Land zwischen Euphrat und Tigris, nirgends erreichten Verwaltung, Politik und Kultur eine solche Blüte. Heute bedrohen Krieg und Raubgräberei die Wiege städtischer Zivilisation – während viele Fragen der Forschung noch ihrer Antworten harren.

Von Simon M. Halama

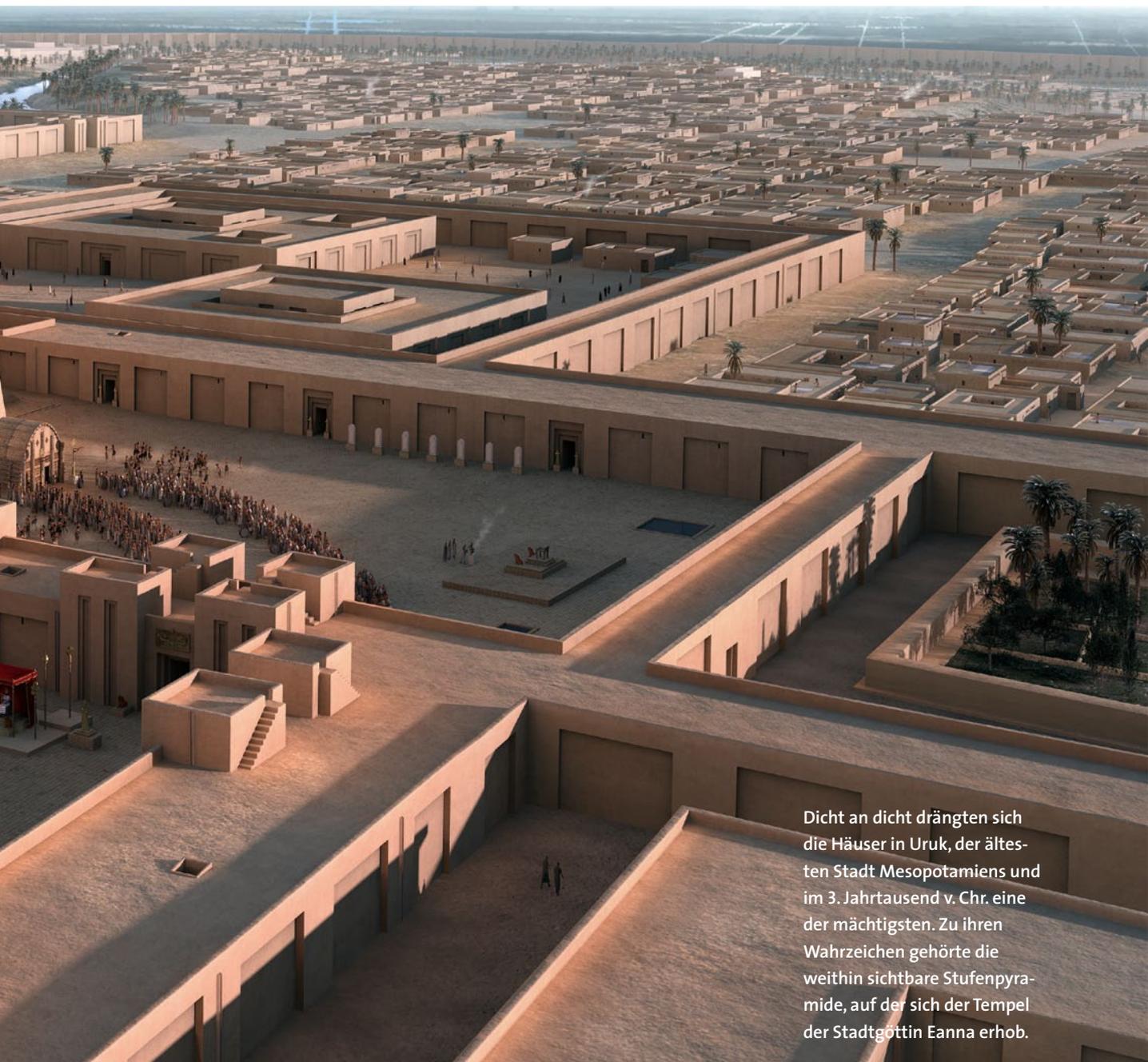


ARTIFACTS-BERLIN/DE MATERIAL/DEUTSCHES ARCHÄOLOGISCHES INSTITUT

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

DIE GEBURT DER STADT

- | | | |
|--------|--|-------------------|
| Teil 1 | ▶ Frieden stiftende Ahnen
<i>Marion Benz</i> | März 2016 |
| Teil 2 | ▶ Die ersten Metropolen
<i>Simon M. Halama</i> | April 2016 |
| Teil 3 | ▶ Am Anfang war der Tempel
<i>Peter R. Fuchs und Renate Patzschke</i> | Mai 2016 |



Dicht an dicht drängten sich die Häuser in Uruk, der ältesten Stadt Mesopotamiens und im 3. Jahrtausend v. Chr. eine der mächtigsten. Zu ihren Wahrzeichen gehörte die weithin sichtbare Stufenpyramide, auf der sich der Tempel der Stadtgöttin Eanna erhob.

Dattelpalmen säumen das Ufer des Flusses. Vorbei an Dörfern aus Schilf- und Lehmhütten nähert sich ein Frachtschiff der Stadt. Schon in der Ferne hat sie sich angekündigt: Gleich einem Berg erhebt sich der Hochtempel des Hauptgottes über die fruchtbare Ebene, Häuser und Verteidigungsmauern um ein Vielfaches überragend. Immer dichter drängen sich Schilfboote, als es dem Hafenbecken entgegengeht. Manche sind mit Fischen, Getreide oder Wolle beladen, andere mit Tüchern und Gewändern, wieder andere tragen matt glänzende Kupferbarren. Schließlich legen sie an einem Kai aus Backsteinen an, die sorgfältig mit Bitumen verfugt sind. Während die Mannschaft ihre Ladung löscht, streben Passagiere, umfangen vom Gewirr verschiedenster Sprachen, Gerüche und Geräusche, dem Tempel zu. Aus Werkstätten hallt der Klang von Hämmern. Waren aus aller Herren Länder werden auf den Straßen umgeschlagen. Schmale, verwinkelte Gassen, in denen sich auch Schweine tummeln, führen rechts und links in die eng bebauten Wohnviertel.

Im 2. Jahrtausend v. Chr. stand im Gebiet des heutigen Südirak eine einmalige Stadtkultur in voller Blüte. Nirgendwo sonst lebten so viele Personen auf so engem Raum zusammen wie in der Tiefebene Mesopotamiens. Der griechische Name Mesopotamien bedeutet »Land zwischen den Strömen«, gemeint waren die beiden Lebensadern Euphrat und Tigris. Die Bewohner der Region selbst sprachen eher vom Land Sumer und Akkad, nach den beiden Sprach- und Bevölkerungsgruppen, die eine der glanzvollsten Zivilisationen der Menschheitsgeschichte schufen.

Für die Stadtbewohner wurden urbane Zentren im Lauf der Jahrhunderte zu einer solchen Selbstverständlichkeit, dass ein anderes Leben nahezu undenkbar war. Allerdings stammen auch alle Texte, die wir kennen, aus solchen Orten. Über das Leben auf dem Land wissen wir hingegen kaum etwas. Städte waren der Inbegriff von Zivilisation, ebenso ein Geschenk der Götter wie alle Künste und Handwerke, in der Urzeit der Schöpfung begründet und dem Menschen zum Aufenthalt bestimmt. Seine Wurzeln hat dieses Denken wohl im 3. Jahrtausend v. Chr. Zu dieser Zeit hatten sich bereits etwa 30 Stadtstaaten im Zweistromland etabliert, und Schätzungen zufolge lebten bis zu 80 Prozent der Bevölkerung in Städten mit einer Größe von 40 Hektar oder mehr.

Jede war Residenz eines Gottes oder einer Göttin, denen die Einwohner zu opfern hatten, wollten sie nicht den göttlichen Schutz verlieren. Dementsprechend trugen die Herrschenden Sorge dafür, dass diese Pflicht erfüllt wurde – was ihnen wiederum das Wohlgefallen der Götter einbrachte. Vernachlässigten die Menschen aber ihre Pflicht, konnte das katastrophale Folgen haben: Im schlimmsten Fall zogen sich Stadtgott oder -göttin zurück und gaben die Stadt dem Unheil preis. So erklärte man sich damals Niedergang und Katastrophen. Aus demselben Grund kümmerten sich die Regenten auch mit größtem Eifer um den Zustand der Tempel. Regelmäßig wurden beschädigte und verfallene Bauten abgerissen, einplaniert und noch größer und prächtiger wiederauf-

AUF EINEN BLICK

FRÜHES KÖNIGTUM

1 Ab dem 4. Jahrtausend erblühte in **Mesopotamien**, dem heutigen Südirak, eine urbane Zivilisation. Zehntausende Menschen lebten in Stadtstaaten wie **Uruk** und **Babylon**, was Innovationen wie die Schrift förderte.

2 Die Gründe dieser umfassenden **Urbanisierung** liegen noch im Dunkeln. Sicherlich stellten große **Tempel** und ein frühes **Königtum** die nötige Organisationsstruktur; dank künstlicher Bewässerung konnte die wachsende Bevölkerung ernährt werden.

3 **Wohnviertel** bildeten vermutlich soziale Gruppen vergleichbar den Dorfgemeinschaften, jedoch heterogen aufgebaut, also ohne familiären Zusammenhalt. Auf verschiedenen Ebenen der urbanen Gesellschaft gab es Personen, die als Mittler zwischen Bewohnern und **Obrigkeit** dienten.

gebaut. Über Jahrhunderte hinweg wuchs so der Standort mancher Gotteshäuser in die Höhe und musste mit immer mächtigeren Terrassen befestigt werden. Gegen Ende des 3. Jahrtausends schließlich begannen die Könige, direkt neben den Hauptheiligtümern der Götter Stufentempel zu errichten, indem sie mehrere gewaltige Terrassen aufeinander-schichten ließen. Diese so genannten Zikkurate waren vermutlich das Vorbild für den biblischen »Turm von Babel«.

Zwar bildete jede Stadt eine abgeschlossene politische und gesellschaftliche Einheit, doch bereits im 3. Jahrtausend bestand unter den Sumerern und den später eingewanderten Akkadern ein Bewusstsein für eine gemeinsame Kultur. Das äußerte sich in mythologischen Vorstellungen wie der einer Versammlung, auf der die Götter der einzelnen Zentren zusammenkamen, um sich zu beraten und Entscheidungen zu treffen. Als es schließlich einzelnen Herrschern mit militärischer Gewalt gelang, das Land unter ihrer Autorität zu vereinen, war eine ideologische Begründung für die neuen Verhältnisse erforderlich. In einem Text mit dem Anfang »Als das Königtum vom Himmel herabkam« suggerierten die Verfasser beispielsweise, eigentlich hätten das Königtum und die Herrschaft über das Land schon von Anbeginn existiert und nur von einer Stadt zur nächsten gewechselt. Andere historische Zeugnisse belegen aber, dass manche der erwähnten Herrscher Zeitgenossen waren, die miteinander in Kontakt standen. Eine spätere Legende erklärte in ähnlicher Weise den Aufstieg Babylons: Dem Gott Marduk versprachen die Götter das Königtum, wenn er sie vor einem gefährlichen Ungetüm errette. Tatsächlich hatte er Erfolg und gründete daraufhin Babylon als Nabel der neu geschaffenen Welt. Bis zur Zeit Alexanders des Großen blieb es die wichtigste Metropole Mesopotamiens.

Vielleicht schwang in diesem Mythos die Erinnerung an die Anfänge mesopotamischer Urbanität mit, als nur eine einzige Siedlung solcher Größe existierte. Uruk, die wohl erste Stadt der Welt überhaupt, wuchs um die Mitte des 4. Jahrtausends v. Chr. im Süden Mesopotamiens zu bis dahin unvorstellbarer Größe. Während umliegende Siedlungen

kaum einmal 15 Hektar maßen, erreichte es zu Beginn des 3. Jahrtausends v. Chr. mindestens 250 Hektar und umschloss einige Zeit später schon rund 550 Hektar – die Befestigungsmauer, deren Errichtung später dem sagenhaften König Gilgamesch zugeschrieben wurde, war etwa neun Kilometer lang! Das ist mehr, als Athen im Altertum erreichen sollte, und immerhin halb so groß wie das antike Rom zu seiner Blütezeit gut 3000 Jahre später.

Als Uruk entstand, kannten die Menschen noch keine Schrift, weshalb nur ihre materiellen Hinterlassenschaften Auskunft über die Stadtgründung geben können. Bei Ausgrabungen wurden bislang aber erst kleine Bereiche jener Zeit frei gelegt. So fällt es noch immer schwer zu verstehen, warum sich Menschen, die bis dahin in überschaubaren Dörfern ihr Auskommen gefunden hatten, nun zu Tausenden an ein und demselben Ort niederließen.

Allerdings waren die Lebensbedingungen in jener Zeit gut. Das Schwemmland der Uferzonen Mesopotamiens war äußerst fruchtbar und bot dank hoher Temperaturen lange Wachstumsperioden sowie eine Vielzahl weiterer Ressourcen wie Datteln als Kalorienlieferanten, Schilf und Lehm als Baumaterial; in den Marschen wimmelte es von Fischen und Vögeln. Entscheidend war in dieser Region indes immer das Wasser, denn die Niederschläge fielen zu spärlich und kamen zu wenig verlässlich, um allein auf ihrer Grundlage Ackerbau zu betreiben. Doch einfache Methoden, das Wasser der Flüsse mit Hilfe kleiner Kanäle auf die Felder zu leiten, kannte man bereits; sie ermöglichten eine kontinuierliche Bewirtschaftung der Tiefebene. Das Ergebnis waren hohe Erträge auf vergleichsweise kleinen Flächen, was eine dichte Besiedlung der Region erst erlaubte. In den Randzonen des Ackerlands fanden Schafe und Ziegen Nahrung.

Obendrein boten sich die vielen Wasserwege für einen kostengünstigen Transport von Lebensmitteln und anderen Gütern an. Überschüsse gestatteten es sogar, spezialisierte

Handwerker, Kultpersonal und Verwaltungsbeamte mitzuversorgen. Alles in allem waren die Voraussetzungen für eine urbane Bevölkerung damit gegeben. Was jedoch der Anlass war, der diese Entwicklung tatsächlich in Gang setzte, ist weiterhin unbekannt.

Eindeutiger lässt sich hingegen nachvollziehen, welche Prozesse durch die Urbanisierung angestoßen wurden. Denn trotz günstiger landwirtschaftlicher Gegebenheiten muss die Versorgung der stark wachsenden Bevölkerung eine enorme Herausforderung gewesen sein. Die Zeiten, in denen jeder seine Nahrung selbst produzierte, waren vorbei. Auch das tägliche Miteinander tausender, später zehntausender Menschen auf engem Raum verlangte nach neuen Lösungen für Konfliktmanagement und Kommunikation.

Am Anfang stand die Religion

In der Frühzeit mesopotamischer Stadtkulturen entstanden die notwendigen Institutionen wohl im religiösen Bereich. Tempel kennen wir schon aus dem 5. Jahrtausend v. Chr. In Eridu, nahe dem heutigen Basra, gruben Archäologen eine 2000-jährige Abfolge von sakralen Gebäuden aus. In Uruk selbst gab es sogar zwei Kultbereiche, die sich vielleicht aus zwei ursprünglich am Euphrat gegenüberliegenden Siedlungen entwickelt hatten. Die Eliten müssen dafür Arbeitskräfte mobilisiert und organisiert haben, ebenso für Arbeiten an Kanälen und an kommunalen Monumentalbauten. Entlohnt wurden sie entweder mit Rationen in Getreide und Wolle, die von tempeleigenen Ländereien stammten, oder durch die Verpachtung solcher Parzellen.

Die Verwaltung der Güter, die von den Tempeln produziert oder eingesammelt und wieder verteilt wurden, nahm in Uruk derartige Ausmaße an, dass die herkömmlichen Mittel zur Buchführung nicht ausreichten. Zählsteine und einfache Siegel dienten schon im 7. Jahrtausend v. Chr. dazu, Waren zu registrieren und Eigentum zu kennzeichnen. Doch nun be-

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, TEMPEL-GRAFIK, NACH: TÜBINGER ATLAS DES VORDEREN ORIENTS, KARTE BIV. 3, JANE HADON



- | Funktionale Gliederung | Einrichtungen |
|--|--|
| — Außenmauern einer Wohneinheit | Treppe |
| — Wände einer Kapelle | Feuerstelle, Herd |
| — Innen-, Trennwände | gewölbte Grabkammer |
| — Vorraum | gewölbte Grabkammer, nicht ausgegraben oder unsichere Lage |
| — Hof | Altar aus Lehmziegeln |
| — Küche/Wirtschaftsbereich | Bank, Sockel aus Lehmziegeln |
| — Empfangs-, Besucherraum | Behälter aus Lehmziegeln |
| — Bad, Toilette, Nassraum | Raum mit einer oder mehr Bestattungen |
| — Hauskapelle | |
| — Funktion unbestimmt | |
| unbearbeitetes Gebiet | |
| Straßen, Plätze | |

In den 1920er Jahren legten Archäologen Teile eines Wohnviertels in Ur frei. Die Häuser waren über Sackgassen zugänglich. Charakteristisches Merkmal größerer Anwesen war ein Innenhof, der für Licht und Luft in den umliegenden Räumen sorgte. In vielen der Häuser kamen Altäre und Bestattungen zum Vorschein.



Am Unterlauf von Euphrat und Tigris entwickelte sich ab dem 4. Jahrtausend v. Chr. eine dichte städtische Besiedlung. Man schätzt, dass zeitweise bis zu 80 Prozent der Bevölkerung in Städten gelebt haben könnten. Das wäre außergewöhnlich für eine vorindustrielle Gesellschaft und möglich nur durch die hohen Erträge aus der Landwirtschaft und eine Beteiligung der Stadtbevölkerung an der Nahrungsproduktion.

gann man, bildartige Zeichen in Tontafeln zu ritzen und mit anderen Zeichen zu kombinieren, um die erfassten Dinge und Personen zu zählen. Aus solchen Listen entstand durch Abstraktion und Vereinfachung der ursprünglichen Bildzeichen nach und nach die Keilschrift, benannt nach den charakteristischen Zeichen, die das Schreiben mit Griffeln auf Ton erzeugte. Aus den Bildzeichen entwickelten sich Silbenzeichen, mit denen schließlich auch Sprache adäquat wiedergegeben werden konnte (Spektrum-Spezial »Schrift und Sprache«, S. 6–12). Doch diese Schrift zu erlernen, war anfangs nur wenigen vergönnt. Die Eliten schufen eine Sphäre für sich, jenseits der Alltagswelt der einfachen Bauern und Arbeiter.

Schon in frühen Bildwerken aus Uruk finden sich Darstellungen einer Person, die als Mittler zwischen den Einwohnern und der Stadtgöttin Eanna auftritt; in anderen kämpft sie gegen Löwen. Altorientalisten sehen darin Belege für die Anfänge eines Königtums, über dessen genaue Ausprägung in der Frühzeit noch nicht viel bekannt ist. Als Auserwählter der Stadtgöttheit residierte der Herrscher in einem monu-

mentalenen Palast, agierte spätestens ab der Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. an der Spitze eines großen Haushalts und verfügte wie die sakralen Institutionen über ausgedehnte Ländereien. Diese wurden teils von Abhängigen bewirtschaftet, teils an Privatpersonen verpachtet, teils wie erwähnt als Entlohnung an Menschen vergeben, die Heeres- oder Arbeitsdienste leisteten. Viele Dokumente des 3. und 2. Jahrtausends v. Chr. beleuchten eindrücklich, wie die Unternehmen Königshof und Tempel funktionierten, selbst wenn diese Schriftzeugnisse nur bestimmte Bereiche wie etwa die Verpachtung von Ländereien, den Eingang oder die Austeilung von Gütern oder die Auflistung von Arbeitern betrafen.

Auf Grund der stets zu organisierenden Wasserversorgung waren große Wirtschaftseinheiten wie die Paläste und die Tempel gegenüber kleinen Landbesitzern klar im Vorteil. Sie konnten viele Arbeitskräfte für den Bau und die Instandhaltung von Kanälen mobilisieren, das Land effektiver bewirtschaften und die Risiken von Missernten besser verteilen. Unter den klimatischen Bedingungen Mesopotamiens blieb die

künstliche Bewässerung ein anfälliges System. Mal drohten die Felder von den Flüssen überflutet zu werden, mal trockneten ganze Landstriche aus, weil sich deren Lauf verlagert hatte. Obendrein versalzten die Böden, denn beim Verdunsten des zugeführten Flusswassers lagerten sich die darin gelösten Mineralien in der Erde ab. Binnen weniger Jahre verwandelten sich wertvolle Äcker in unfruchtbares Brachland.

Aber nicht nur im Hinblick auf das Wassermanagement waren Großunternehmen im Vorteil. Tempel und Paläste konnten auch leichter Innovationen vorantreiben oder Handelsmissionen ausrüsten, um Rohstoffe wie Metalle, Schmucksteine oder Bauholz zu importieren. Wichtigstes Exportgut dürften Textilien gewesen sein. Diese wurden laut den Quellen in hoher Qualität und Quantität aus Schafwolle und Flachs in Betrieben mit mehreren hundert oder gar tausenden Arbeiterinnen hergestellt.

Die Ehre des Tempelfegers

Nichtsdestoweniger lag ein wesentlicher Teil der Wirtschaft in privaten Händen. Das bezeugen Pacht- und Kaufurkunden für Felder, Gärten und Häuser ebenso wie Schuldscheine und Verträge, die Händler mit Kapitalgebern abschlossen, um Handelsschiffe auszurüsten. Als Wertmaßstab galten in der Regel Getreide oder Silber; Geld kannte man noch nicht. Auch viele Handwerker, die für Tempel und Palast tätig waren, scheinen eher Auftragnehmer als Abhängige gewesen zu sein. Zwar gab es Dienste, die Pflicht waren, aber viele Menschen arbeiteten auch in Teilzeit gegen Entlohnung für die Institutionen. Oder sie hatten ein auf viele Personen aufgeteiltes Amt inne, das ihnen neben der eigentlichen Berufstätigkeit feste Einkünfte sicherte. Diese Art von Ämtern war sowohl erblich als auch käuflich und ist deshalb in entsprechenden Urkunden bezeugt. So erwarb etwa ein gewisser Apil-Aschnan das Amt des »Tempelfegers« im Tempel des Mondgottes Sin von Ur für eine genau festgelegte Periode von zwölf Tagen im Jahr für zwei Schekel Silber.

Die Differenzierung und Hierarchisierung der urbanen Gesellschaft nach Tätigkeiten zeichnet sich schon in einem der frühesten Texte aus Uruk ab: einer Liste von Funktionären und Berufen. Obwohl nicht bis ins Letzte entschlüsselt, lässt sie doch erkennen, dass in der Administration und den Reihen der Priester bis zu vier Rangstufen unterschieden wurden. Berufsgruppen wie Gärtner, Koch, Töpfer oder Bäcker fanden sich am Ende der Liste. Die fortschreitende Spezialisierung verschärfte das soziale Gefälle zusehends.

Kleine Bauern litten nicht nur unter ihrem geringen Status, sie gerieten auch schnell in finanzielle Abhängigkeit. Um die Zeit bis zur Ernte zu überbrücken oder die nächste Saat ausbringen zu können, waren sie oft auf ein Darlehen angewiesen. Bei den üblichen Zinssätzen von 20 bis 33 Prozent führte der Weg dann bei Missernten schnell zum Verlust des verpfändeten Landes oder gar in die Schuldknechtschaft des Kreditnehmers beziehungsweise eines Familienangehörigen. Das Problem war den Herrschern bewusst, wie manche Texte überliefern: Sie regulierten die Preise für Lebensmittel

sowie Dienstleistungen und befreiten per Erlass in Schuldknechtschaft geratene Bürger. Schließlich griffen sie als letzte Maßnahme sogar zu einer allgemeinen Aufhebung aller Arten von Schuldverpflichtungen – und das kam häufig vor.

Auch auf politischer Ebene existierten neben den zentralen Institutionen kleinere, relativ autonom agierende Einheiten. Wenn – wie vermutet – die Organisation der Götterwelt ein Vorbild in der sozialen Wirklichkeit der Menschen hatte und spätere literarische Texte über die mythischen Könige von Uruk tatsächlich Erinnerungen an die damaligen Verhältnisse tradiert haben, standen in der Frühzeit Mesopotamiens den Königen wahrscheinlich Versammlungen der Ältesten gegenüber. Sie konnten ein Mitspracherecht bei gewissen politischen Entscheidungen beanspruchen. Solche Räte gab es während der gesamten mesopotamischen Geschichte auf verschiedenen Ebenen. Sie unterstützten beispielsweise als Recht sprechende Gremien die Gouverneure, die als Repräsentanten des Königs Städte verwalteten. Ähnlich sah es in den einzelnen Quartieren aus: Räte vertraten die Interessen der Bewohner, und Vorsteher vermittelten zwischen ihnen und den zentralen Institutionen.

Die Organisation dieser Bezirke ähnelte damit vermutlich der von Dorfgemeinschaften. Allerdings dürften sich die Sozialstrukturen in der Stadt gegenüber den Dörfern, wo in den einzelnen Anwesen 25 bis 30 Menschen zusammenlebten, stark verändert haben. Auf dem Land bestanden sicherlich weiterhin familiäre Gruppen, wie ein Vertrag über einen Landkauf durch den König aus dem späten 3. Jahrtausend v. Chr. bezeugt: Es traten mehrere Brüder als eine Art Eigen-



Institutionen wie die Tempel teilten Essensrationen an Arbeiter und zu Diensten verpflichtete Bürger aus. Deshalb trägt diese Auflistung von Gütern aus dem 4. Jahrtausend v. Chr. das Keilschriftzeichen für »Zuteilung«: einen Kopf mit einer Schale.

BPK / VORBESAMTSCHE MUSEUM, STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN / OLAF W. TESSMER



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



www.spektrum.de/t/staedte

tümergeinschaft auf. Solidarität wurde also über Verwandtschaftsbeziehungen organisiert. Die in mehreren Städten wie etwa Ur, Nippur oder Eschnunna ausgegrabenen Wohnviertel des 3. und frühen 2. Jahrtausends – aus älteren Epochen fehlen die Quellen – liefern kaum Hinweise darauf, dass dort weiterhin Großfamilien existierten. Wahrscheinlich waren nie alle Flächen in einer mesopotamischen Siedlung vollständig bebaut, insbesondere nicht in so großen Zentren wie Uruk. Zwischen den Häuserblocks gab es vermutlich Gärten und Freiflächen, auf denen Vieh gehalten wurde. Manche Gebäude wurden dem Verfall preisgegeben und als Müllkippen benutzt. Wo aber Bebauung bestand, war sie sehr dicht. Die Häuser bildeten meist unregelmäßig geformte Blöcke, die über einige größere Durchgangsstraßen sowie kleinere Gassen, häufig Sackgassen, zugänglich waren. Wohnhäuser, kleine Geschäfte und Schreine grenzten unmittelbar aneinander, ohne eigene Außenmauern. So war es leicht, sie zu erweitern oder zu verkleinern – man konnte jederzeit Räume anbauen oder abreißen, dazukaufen oder verkaufen, wie Urkunden zeigen. Türen wurden einfach zugemauert oder in die Lehmwände gebrochen, je nach den Bedürfnissen und der wirtschaftlichen Lage der Eigentümer. Dementsprechend finden sich innerhalb solcher Komplexe auch Gebäude ganz unterschiedlicher Größe, von kleinen ein- bis zweiräumigen Unterkünften um 40 Quadratmeter Fläche über die größte Gruppe von 60 bis 200 Quadratmeter messenden Wohnstätten bis hin zu 500 Quadratmeter umfassenden luxuriösen Anwesen mit mehreren Innenhöfen.

Grundeinheit eines Haushalts war Schriftquellen der Zeit zufolge im Allgemeinen wohl die Kernfamilie, das heißt ein Elternpaar mit seinen unverheirateten Kindern. Bei Wohlhabenden kamen vermutlich noch einige Bedienstete oder Sklaven hinzu. Es gibt keine stichhaltigen Beweise dafür, dass weiter entfernte Angehörige im selben Viertel oder gar Wohnblock lebten. Wo Hauseigentümer anhand von Urkunden identifiziert werden konnten, lassen sich nur selten Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Nachbarn feststellen. Vereinzelt scheinen Berufsgemeinschaften zusammengelebt und gearbeitet zu haben, doch auch das war offenbar keine Regel. Vielmehr deuten die meisten Quellen darauf hin, dass eine heterogene Bewohnerschaft die Wohnblöcke prägte, in denen Reich und Arm sowie Menschen verschiedener Berufe und unterschiedlicher Herkunft zusammenlebten.

Da sich die Viertel wohl teilweise selbst verwalteten und vieles intern regelten, könnten sich also Solidargemeinschaften in den urbanen Zentren gebildet haben, die allein auf Nachbarschaft basierten. Darüber aber schweigen die Schriftquellen. Vielleicht war es nicht erforderlich, über solche Angelegenheiten Buch zu führen: Wie in einem Dorf ließ sich alles Persönliche durch ein Gespräch regeln.

Auch über den Gesundheitszustand der Stadtbewohner, über ihre Ernährung und körperlichen Belastungen wissen Altorientalisten vieles aus Verwaltungslisten und anderen Dokumenten. Vor allem Gerste, in geringerem Maß Weizen und Emmer bildeten die Nahrungsgrundlage, Sesam war ab Mitte des 3. Jahrtausends die wichtigste Quelle für Öl; darüber hinaus wurden ein breites Spektrum an Hülsenfrüchten und Gemüse sowie einige Obstsorten und zahlreiche Kräuter und Gewürze kultiviert. Aber nicht alle Spezies, die in den Quellen genannt werden, lassen sich heute identifizieren. Welche Rolle Fleisch und Wildbret beziehungsweise gesammelte Wildpflanzen spielten, müssten neue archäologische Grabungen erschließen.

Denn das meiste, was wir über das historische Mesopotamien wissen, basiert auf älteren Forschungen – die politische Lage machte es Archäologen gut 25 Jahre lang fast unmöglich, im Irak zu graben. Seit Kurzem arbeiten internationale Teams unter starken Sicherheitsvorkehrungen immerhin wieder im Südirak. Im Nordwestirak und in Syrien hingegen machen Bürgerkrieg und Terrormiliz jegliche Forschung undenkbar. Neben den menschlichen Tragödien, die sich hier abspielen, fallen diesem Konflikt auch historische Stätten und Kulturgüter zum Opfer. Gerade der IS zerstört mutwillig kulturelles Erbe und finanziert sich zum Teil über die systematische Ausplünderung von archäologischen Stätten. ~

DER AUTOR



Simon M. Halama ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Vorderasiatischen Archäologie an der Universität Freiburg im Breisgau. Seine Forschungsschwerpunkte sind Urbanität und Architektur im Alten Orient.

QUELLEN

- Crüsemann, N. et al. (Hg.):** Uruk – 5000 Jahre Megacity. Michael Imhof, Petersberg 2013
- Nissen, H.J.:** Grundzüge einer Geschichte der Frühzeit des Vorderen Orients. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1990
- Postgate, J.N.:** Early Mesopotamia. Society and Economy at the Dawn of History. Routledge, London 1992
- Stone, E.C.:** The Mesopotamian Urban Experience. In: Stone, E.C. (Hg.): Settlement and Society. Essays Dedicated to Robert McCormick Adams. Cotsen Institute of Archaeology, University of California / The Oriental Institute of the University of Chicago, Los Angeles / Chicago, S. 213–234, 2007
- Van De Mieroop, M.:** The Ancient Mesopotamian City. Clarendon Press, Oxford 1997

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1399741

Mehr erfahren. Besser leben.



**JETZT
AM KIOSK**

**AUCH ALS
E-PAPER**

In FOCUS-DIABETES bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.
Medizin & Forschung: Wie Diabetiker, ohne Diät und Hungern, am effektivsten Gewicht verlieren können.
CHECK-UP SPEZIAL: Mit diesen Vorsorge-Tests schützen Sie Ihre Organe vor den Folgen von Diabetes.
Ernährung & Genuss: Köstliche Kräuterküche – einfache Frühlingsrezepte, die schmecken und wirken.
Reisen & Erleben: Im Urlaub kreative Kraft schöpfen! Mit Pinsel, Farbe und innerer Einkehr im Klosterhotel.

FOCUS-DIABETES gibt es auch unter Tel. 0180 6 480 1006*, Fax 0180 6 480 1001*, www.focus-diabetes.de
*0,20 €/Anruf aus dem dt. Festnetz. Mobil max. 0,60 €/Anruf.



Leben, wie ich will. Mit **DIABETES**
FOCUS

Forschung in Zahlen: Big Science

Mammutprojekte wie der Large Hadron Collider (LHC) des CERN gelten vielen als Symbole für den Willen des Menschen, die Geheimnisse der Natur zu entschlüsseln. Aber welchen Stellenwert räumen wir der Wissenschaft tatsächlich ein? Diese Frage ist nicht leicht zu beantworten; einige Daten geben immerhin Anhaltspunkte.

USA

453 544 Millionen US-Dollar*
2012

*Die Ausgaben aller hier aufgeführten Länder für Forschung und Entwicklung sind in US-Dollar-Kaufkraftparität angegeben – einer Währungsumrechnung, welche die unterschiedlichen Lebenshaltungskosten berücksichtigt.

Manhattan-Projekt

23–27 000 Millionen
US-Dollar
Gesamtkosten
1942–1945

Die Bombe

Das Manhattan-Projekt zur Entwicklung der ersten Atombomben kostete mehr als 23 Milliarden US-Dollar und beschäftigte 130 000 Menschen. Wohl oder übel wurde es zum Modell dafür, was Großforschungsprojekte erreichen können.

BRAIN-Initiative

mindestens 300 Millionen US-Dollar
staatliche Investitionen bis 2015
Start 2013

Hirnforschung

Eines der größten noch ungelösten wissenschaftlichen Rätsel ist, wie in unserem Kopf Bewusstsein entsteht. Mehrere große, finanziell gut ausgestattete Vorhaben wie das europäische Human-Brain-Projekt und die BRAIN-Initiative in den USA versuchen grundlegende Werkzeuge zu entwickeln, um Forscher bei der Beantwortung dieser Frage und der Heilung von Gehirnerkrankheiten zu unterstützen.

Human-Brain-Projekt

1630 Millionen US-Dollar
geschätzte Gesamtkosten des Projekts
2012–2023

Das Genom

Das 4,7 Milliarden US-Dollar teure, über 13 Jahre laufende Humangenomprojekt schloss im April 2003 die Sequenzierung des gesamten menschlichen genetischen Kodes ab. Zu den Nachfolgeinitiativen gehört das 100 000-Genome-Projekt, das den genetischen Ursachen von Krankheiten auf der Spur ist.

Humangenomprojekt

4730 Millionen US-Dollar†
Gesamtkosten des Projekts
1990–2003

100 000-Genome-Projekt

471 Millionen US-Dollar
laufende Investitionen
2012–2017

† in US-Dollar
von 2015
umgerechnet

Large Hadron Collider (LHC)

5370 Millionen US-Dollar
Personal, Materialien,
Forschung und Entwicklung,
Tests und Vorlaufkosten
Betrieb seit 2008

geplanter Teilchenbeschleuniger in China

3020 Millionen US-Dollar
geschätzte Baukosten
Zulassungen stehen
noch aus

Europäische Spallationsquelle (ESS)

2260 Millionen US-Dollar
veranschlagte Baukosten
Grundsteinlegung 2014

Teilchenbeschleuniger

Sie sind teuer, riesig und für Physiker unverzichtbar: Es gibt keine Möglichkeit, bestimmte Theorien zu testen, ohne die unmittelbar auf den Urknall folgenden Bedingungen nachzustellen. Der 27 Kilometer lange LHC in der Nähe von Genf ist derzeit der weltweit größte. China plant jedoch schon einen Teilchenbeschleuniger von ungefähr der doppelten Größe.

Südkorea

58 380 Millionen
US-Dollar
2011

Ausgaben für Wissenschaft

Kein Datensatz umfasst alle Gelder, die weltweit in die wissenschaftliche Forschung gesteckt wurden. Aber ein Blick auf die Ausgaben der größten Wirtschaftsnationen vermittelt uns ein Gefühl für das Ausmaß der globalen Forschung.

China

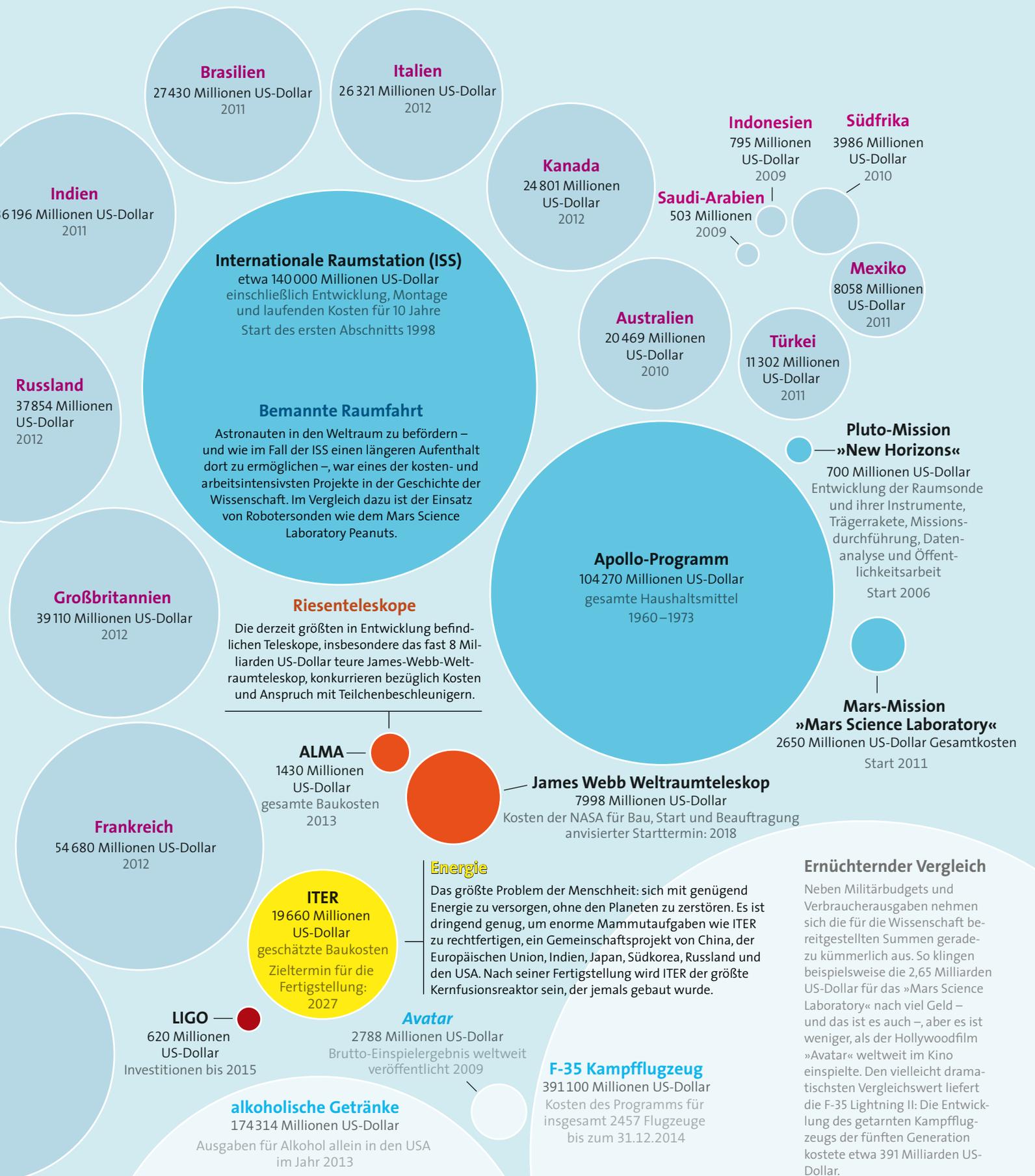
243 293 Millionen US-Dollar
2012

Japan

148 389 Millionen US-Dollar
2011

Deutschland

100 248 Millionen US-Dollar
2012



GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN, NACH:
 UNESCO INSTITUTE FOR STATISTICS, WWW.IUIS.UNESCO.ORG (AUSGABEN FÜR FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG NACH LAND); STINE, D.D.: THE MANHATTAN PROJECT, THE APOLLO PROGRAM, AND FEDERAL ENERGY TECHNOLOGY R&D PROGRAMS: A COMPARATIVE ANALYSIS. CONGRESSIONAL RESEARCH SERVICE REPORT FOR CONGRESS, 2009, WWW.FAS.ORG/SGP/CRS/MISC/RL34645.PDF (MANHATTAN PROJEKT); ORLOFF, R.W.: APOLLO BY THE NUMBERS: A STATISTICAL REFERENCE. NASA, UPDATED SEPTEMBER 2005, HISTORY.NASA.GOV/SP-4029/SP-4029.HTM (APOLLO-PROGRAMM); EUROPEAN SPACE AGENCY (INTERNATIONALE RAUMSTATION ISS); NATIONAL HUMAN GENOME RESEARCH INSTITUTE, WWW.GENOME.GOV (HUMAN GENOM PROJEKT); UK TO BECOME WORLD NUMBER ONE IN DNA TESTING (...), 2014, WWW.GENOMICSENGLAND.CO.UK (100 000 GENOME PROJEKT); THE HUMAN BRAIN PROJECT: A REPORT TO THE EUROPEAN COMMISSION, HBP-PS CONSORTIUM, LAUSANNE, 2012 (HUMAN-BRAIN-PROJEKT); THE WHITE HOUSE BRAIN INITIATIVE, WWW.WHITEHOUSE.GOV/BRAIN (BRAIN-INITIATIVE); LHC: THE GUIDE. CERN, 2009 (LARGE HADRON COLLIDER); FAQ FUNDING AND COSTS, EUROPEAN SPALLATION SOURCE SE (EUROPÄISCHE SPALLATIONSQUELLE ESS); GIBNEY, E.: CHINA PLANS SUPER COLLIDER. IN: NATURE 511, S. 394–395, 2014; ESO: ALMA INAUGURATION HERALDS NEW ERA OF DISCOVERY, 2013, WWW.ESO.ORG/PUBLIC/NEWS/ESO1312 (ALMA); ITER, WWW.ITER.ORG (ITER); NASA (JAMES WEBB WELTRAUMTELESKOP NEW HORIZONS, MARS SCIENCE LABORATORY); U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE: DEPARTMENT OF DEFENSE SELECTED ACQUISITION REPORTS (SARS) (AS OF DECEMBER 31, 2014), 2015 (F-35 KAMPFFLUGZEUG); BOXOFFICEMOJO.COM (AVATAR); U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, ECONOMIC RESEARCH SERVICE, WWW.ERS.USDA.GOV/DATA-PRODUCTS/FOOD-EXPENDITURES.ASPX (ALKOHOLISCHE GETRÄNKE)

STATISTIK

Und die Mondlandung fand doch statt!

Eine Inszenierung wäre mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit inzwischen aufgefliegen.
Allgemein gilt: Verschwörungstheorien lassen sich mit statistischen Mitteln widerlegen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Kann es sein, dass die Mondlandung vom Juli 1969 nicht stattgefunden hat – und alle folgenden vielleicht auch nicht? Angeblich sind bis zu 20 Prozent der US-Amerikaner davon überzeugt, die Weltöffentlichkeit sei damals durch ein groß angelegtes Täuschungsmanöver hinters Licht geführt worden. Statt auf dem Mond seien die sensationellen Fotos in einem eigens dafür hergerichteten Studio entstanden. Das sei nachweisbar, weil die Filmleute kleine Fehler begangen und nicht rechtzeitig ausgebessert hätten. So spiegele sich im Helmvisier eines Astronauten eine Studiolampe, die in den vorgeblichen Mondboden gerammte amerikanische Flagge habe im Wind geflattert, den es auf dem Mond nicht gibt (Bild rechts), und einiges mehr. Inzwischen geistern diese Behauptungen und ihre Widerlegungen massenhaft durchs Internet.

Wer sich dazu eine sachlich begründete Meinung bilden will, muss einiges von Physik verstehen und sich mit den technischen Möglichkeiten der 1960er Jahre ziemlich gut auskennen. Es geht aber auch einfacher, und zwar indem man den Gedanken, es habe sich tatsächlich um eine Verschwörung gehandelt, etwas weiterspinnt.

Nicht nur die drei Astronauten müssten demnach vor den Augen der Öffentlichkeit ein absurdes Theater aufgeführt haben; es hätte auch so etwas wie einen Drehbuchautor, einen Regisseur und jede Menge Hilfspersonal geben müssen. Die finsternen Mächte, die mit aller Gewalt ein falsches Bild von der technischen Überlegenheit der USA herstellen wollten, hätten die zahllosen Aufträge zur Entwicklung von Raketen und Raumkapseln vergeben,

ohne das so hergestellte Gerät jemals nutzen zu wollen. Oder – noch abgedrehter – die Auftragnehmer wären an der Verschwörung beteiligt gewesen. Zu Spitzenzeiten arbeiteten an die 400 000 Menschen an dem Mondflugprogramm der Weltraumbehörde NASA.

Wenn nur ein einziger der Verschwörer sein Wissen preisgäbe – weil er seinem Chef eins auswaschen will, weil sein Gewissen ihn plagt, weil er aus Versehen eine Mappe mit Geheimdokumenten im Café liegen lässt, weil eine sowjetische Agentin ihn umgarnt oder aus welchen Gründen auch immer –, dann würde die Sache damit aufliegen:

Eine groß angelegte Täuschung, und 400 000 Mitwisser halten den Mund? Äußerst unwahrscheinlich

Nach einem gezielten Hinweis findet die Presse die heruntergekommene Lagerhalle, in der die Requisiten für den Film aufbewahrt werden, oder ein zerfleddertes Exemplar des Drehbuchs. Am Ende kommt unweigerlich die Wahrheit ans Licht, weil es nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung praktisch nicht anders kommen kann. Das gilt zumindest, wenn die Zahl der Mitwisser hinreichend groß ist.

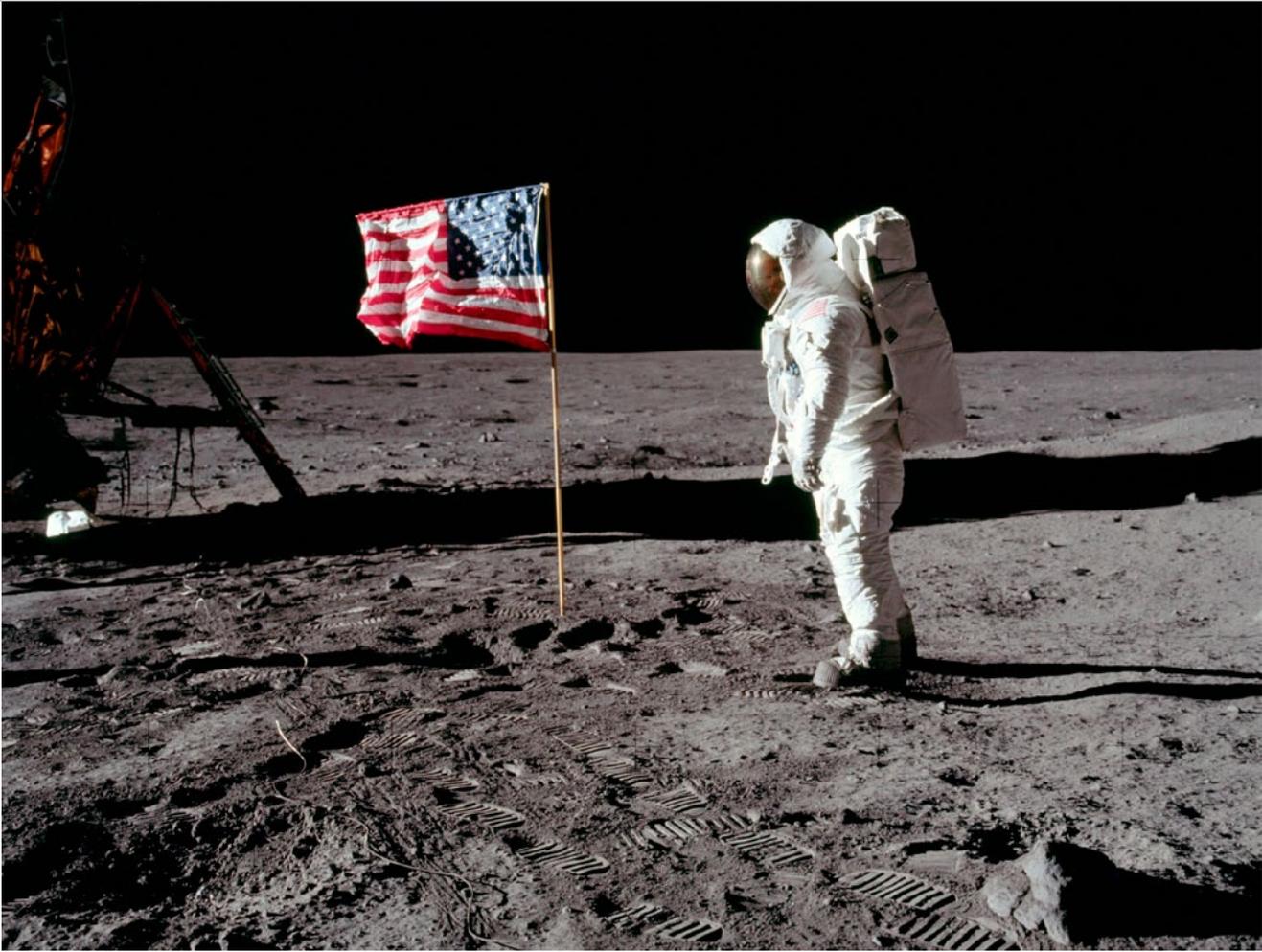
Da bisher kein Zeuge und kein belastbares Indiz für eine so groß angelegte Fälschung aufgetaucht sind, folgt im Umkehrschluss, dass die Bilder von der Mondlandung echt sind. Das leuchtet gefühlsmäßig jedem ein, der nicht unter übermäßiger Paranoia leidet. Aber kann man dieses Bauchgefühl auch mathematisch untermauern und damit den ewigen Zweiflern das Maul stopfen?

Nicht dass das bei der Mondlandung besonders dringend wäre. Aber es gibt weniger harmlose Verschwörungstheorien. So hegen nicht wenige Leute die Überzeugung, der Klimawandel sei von einer Gruppe verschworener Wissenschaftler erfunden worden, vielleicht um diesen eine große Anzahl gut bezahlter Forscherstellen zu sichern, und mehrere Regierungen nehmen die so gesäten Zweifel zum Anlass, sich mit teuren Anstrengungen zu dessen Eindämmung sehr zurückzuhalten.

Dass die routinemäßigen Schutzimpfungen bei Kindern Autismus auslösen könnten, fürchteten vor allem in Großbritannien viele Eltern. Gegenargumente fanden kein Gehör, weil die Theorie von einer Verschwörung des medizinischen Establishments so plausibel schien – immerhin ist eine Massenimpfung ein sehr

lucratives Geschäft. Zahlreiche Kinder wurden deswegen nicht geimpft, was einigen von ihnen schlecht bekommen ist. Eine Verschwörungstheorie zu widerlegen, kann also eine gute Tat für die ganze Gesellschaft sein.

Von solch edlen Absichten motiviert, formulierte der Physiker und Krebsforscher David Robert Grimes von der Oxford University eine mathematische Theorie der Verschwörung und veröffentlichte sie bei der Open-Source-Zeitschrift »Public Library of Science« (»PLOS«). Als bald wanderte sein Werk auch durch die Publikumsmedien. Kein Wunder – wann kann man schon über eine mathematische Arbeit berichten, die mit ganz konkreten Zahlen als Ergebnissen aufwartet? Etwa so: »Höchstens 2521 Menschen dürfen in ein Geheimnis eingeweiht werden, das man mindestens fünf Jahre bewahren möchte.«



Nein, die Flagge weht nicht im Wind, und es ist der echte Mondboden, in den Neil Armstrong und Buzz Aldrin (im Bild) sie gerammt haben. Allein die Steifigkeit des Stoffs hält sie in der leicht verknitterten Form; auf Videoaufnahmen ist zu sehen, dass sie sich nach einer gewissen Einschwingphase nicht mehr bewegt.

Pech nur, dass diese scheinbar so präzisen Zahlen in Wirklichkeit sehr willkürlich sind und Grimes' Arbeit darüber hinaus schwere handwerkliche Fehler enthält. In den Kommentaren zur Onlineveröffentlichung blieb dem Autor und dem Herausgeber nichts anderes übrig, als die Fehler zuzugeben und darauf zu verweisen, dass diese nur eines von mehreren Beispielen betrafen, während die Hauptlinie der Argumentation Bestand habe. Die allerdings, so ein anderer Kommentator, ist nicht neu ...

Ist damit die Initiative von Grimes zum Scheitern verurteilt? Das glaube ich nicht. Man kann durchaus eine mathematische Theorie der Verschwörung aufstellen, muss allerdings beim Interpretieren der Ergebnisse sehr vorsichtig sein. Denn die Datenlage ist natur-

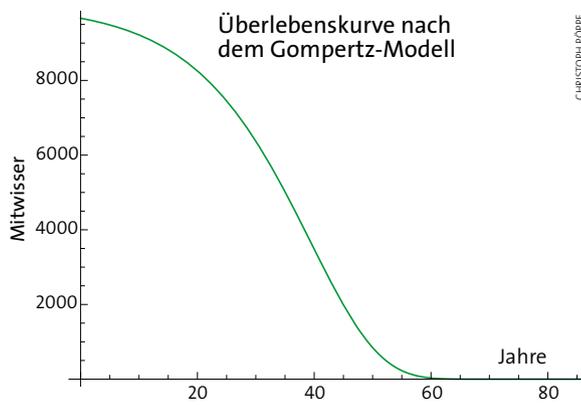
gemäß äußerst dürrig und obendrein verzerrt: Wie soll man Aussagen über die Erfolgchancen einer Verschwörung treffen, wenn man nur die gescheiterten kennt?

Zufall und Geschwätzigkeit

Am Anfang einer solchen Theorie steht die Abstraktion. Ein geeignetes mathematisches Modell muss alle Verschwörungen umfassen, die echten – aufgeflogen oder auch nicht – ebenso wie diejenigen, die ein Krimiautor oder Scherzbold sich zusammenfantasiert. Schließlich will man ein Mittel bereitstellen, um das eine vom anderen zu unterscheiden. Deswegen definiert Grimes eine Verschwörung als eine Menge von Menschen, die ein Geheimnis kennen mit der Eigenschaft, dass

eine Katastrophe eintritt, sobald einer von ihnen es – absichtlich oder versehentlich – an die Öffentlichkeit bringt. Zumindest halten die Geheimnisträger das für eine Katastrophe. Unter diese breite Definition von Verschwörung fallen Geschäftsgeheimnisse wie die Rezeptur von Coca-Cola, peinliche Details aus dem Leben eines Prominenten, die diesen erpressbar machen, Staatsgeheimnisse militärischer Art, Aktivitäten der Geheimdienste, aber eben auch jene ungeheuer personalintensiven Unternehmen zur Erlangung der Weltherrschaft, mit denen sich immer wieder ein Einzelkämpfer namens James Bond auseinandersetzen pflegt.

Welche Motive haben die Beteiligten, die Sache auffliegen zu lassen? Diese Frage ist im Einzelfall sehr interes-



CHRISTOPH POPPE

Ein Kollektiv von ursprünglich 10000 40-jährigen Verschwörern schrumpft durch natürlichen Tod erst langsam, dann immer schneller, bis nur noch ein kleines Häuflein 100-Jähriger übrig ist. Das hier wiedergegebene recht realistische Modell geht auf den britischen Mathematiker Benjamin Gompertz (1779–1865) zurück.

sant und ein guter Aufhänger für ein Filmdrehbuch, aber für eine allgemeine Theorie kein Thema. Die Interessenlage so vieler verschiedener Personengruppen auf einen mathematischen Nenner zu bringen, stellt ein hoffnungsloses Unterfangen dar.

Was tut man also, wenn es sehr viele Einflussgrößen gibt und man von keiner von ihnen ausreichend Ahnung hat? Das Übliche: Man nennt es Zufall. Alles, was die Seele eines Menschen bewegen könnte, wird zu einem einzigen Zahlenwert zusammengefasst: der Wahrscheinlichkeit p , dass er in einer Zeiteinheit – sagen wir einem Jahr – das Geheimnis preisgibt. Dieser Wert p , nennen wir ihn »Geschwätzigkeit«, ist für alle Beteiligten derselbe. Nachdem wir ohnehin alle denkbaren Motive für einen »Verrat« in einen Topf geworfen haben, ist es wenig sinnvoll, zwischen mehr und weniger disziplinierten Verschwörern zu unterscheiden.

Zerfallsgesetz für kriminelle Vereinigungen

Der Lohn für diese radikale Vereinfachung folgt auf dem Fuße: Auf einmal ist die Sache der mathematischen Behandlung zugänglich, und man befindet sich sogar auf vertrautem Terrain. Mit einer Annahme von genau dieser Art pflegen die Physiker den radioaktiven Zerfall zu beschreiben, und in diesem Fall ist es nicht eine aus der Not geborene Vereinfachung, sondern die reine Wahrheit. Selbst wer ein Atom einer radioaktiven Substanz mit allen Mitteln der Messtechnik untersucht, bekommt keine Auskunft darüber, ob es

im nächsten Jahr zerfallen wird oder nicht. Es gibt nur die Zerfallswahrscheinlichkeit und sonst gar nichts.

Wie groß ist der Wert von p ? Bei radioaktivem Material hilft der Geigerzähler. Man zeichnet die Zeitpunkte der Zerfallsereignisse auf und findet mit Hilfe der üblichen Ausgleichsrechnung den p -Wert, dessen theoretische Kurve am besten zu den Messwerten passt. Bei Verschwörungen dagegen sind die Zerfallsereignisse selten, und man kann nicht davon ausgehen, dass man es immer mit demselben Material zu tun hat. Der amerikanische Geheimdienst NSA hat höchstwahrscheinlich einen deutlich kleineren p -Wert als jene Medizinergruppe aus dem öffentlichen Gesundheitsdienst der USA, die einen Skandal jahrzehntelang unter der Decke hielt: Man hatte 1932 begonnen, das Schicksal an Syphilis erkrankter schwarzer Männer aus Alabama zu beobachten, und die »Tuskegee Syphilis Study« nicht abgebrochen, obwohl ab Mitte der 1940er Jahre Penizillin verfügbar und als wirksames Medikament erkannt worden war.

Für beide Verschwörungen hat Grimes jeweils genau einen Datenpunkt: die Enthüllungen durch Edward Snowden 2013 über das Abhörprogramm PRISM, das zu diesem Zeitpunkt vermutlich sechs Jahre lang in Betrieb war, und die Aufdeckung des Tuskegee-Skandals 1972 durch Peter Buxtun. Daraus ergeben sich in beiden Fällen Schätzwerte für p in der Größenordnung von $4 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr.

Das entspricht einer Halbwertszeit von reichlich 170000 Jahren und damit

einem nur sehr schwach radioaktiven Material. Aber bei Verschwörungen ist die Sache weniger harmlos, denn nicht die gesamte Strahlenbelastung, sondern schon der erste Zerfall überhaupt löst die Katastrophe aus.

Nehmen wir an, wir hätten einen brauchbaren Wert für p . Wie gewinnt man dann Aussagen über die Erfolgsaussichten einer Verschwörung? Wie sicher können die jeweiligen Bösewichter sein, dass sie unentdeckt davorkommen – die nächsten fünf Jahre? Den Rest ihres Lebens?

Man stelle sich die ganze Sache als ein etwas abstruses Zufallsexperiment vor. Jeder Verschwörer greift einmal im Jahr blindlings in einen gigantischen Sack, der 250000 weiße Kugeln enthält und eine rote. Wenn er die rote erwischt, was mit der Wahrscheinlichkeit p passiert, entspricht das dem fatalen Fehler, der die ganze Sache auffliegen lässt.

Nun gibt es aber N Verschwörer; sagen wir $N=10000$. Jeder von ihnen zieht seine Kugel unabhängig von den anderen – eine plausible Annahme. Edward Snowden hat sich sicherlich nicht mit seinen Kollegen verständigt, bevor er die Sache auffliegen ließ. Also ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Verschwörung dieses Jahr durchhält, gleich $(1-p)^N$, denn die Wahrschein-

Poisson-Verteilung

In der preußischen Kavallerie gab es sehr viele Pferde; und in seltenen Fällen wurde ein Soldat von einem Pferdedeuf tödlich getroffen. Das ist das historische Beispiel für die Poisson-Verteilung. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass in einem bestimmten Zeitraum – zum Beispiel einem Jahr – k -mal eines dieser seltenen Ereignisse stattfindet, beträgt

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

Dabei ist der Parameter λ die erwartete Häufigkeit dieser Ereignisse pro Jahr. Insbesondere ist die Wahrscheinlichkeit, dass gar kein derartiger Unfall passiert, gleich $P(0) = e^{-\lambda}$.

lichkeit, dass zwei voneinander unabhängige Ereignisse (A schweigt und B schweigt) eintreten, ist gleich dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten. Dieser mathematische Ausdruck ist für das Folgende etwas unhandlich; aber für kleine p und große N kann man ihn mit vernachlässigbarem Fehler durch e^{-pN} ersetzen. Und das ist ein Spezialfall dessen, was die Wahrscheinlichkeitstheorie als Poisson-Verteilung kennt (siehe »Die Poisson-Verteilung«, links unten). Aus der zugehörigen Theorie folgt insbesondere, dass für das Überleben einer Verschwörung nicht die Geschwätzigkeit allein die entscheidende Größe ist, sondern das Produkt pN aus Geschwätzigkeit und Anzahl der Mitglieder.

Mit etwas mehr Theorie lässt sich auch die Überlebenswahrscheinlichkeit $Q(t)$ der Verschwörung in Abhängigkeit von der Zeit t berechnen, und zwar so, dass es nicht auf die willkürliche Wahl der Zeiteinheit – in den obigen Beispielen ein Jahr – ankommt. Das Ergebnis lautet $Q(t) = e^{-pNt}$ (siehe »Das Schicksal einer Verschwörung«, unten). Die Formel mag manchem bekannt vorkommen; sie gilt für Abbau- und Zerfallsprozesse aller Art.

Für Verschwörer enthält sie zunächst eine schlechte Nachricht: Für t gegen

unendlich strebt $Q(t)$ gegen null. Früher oder später fliegt jede Verschwörung auf. Aber es gibt einen Trost: Das menschliche Leben ist endlich. Was schert es mich, wenn die Aktivitäten meiner kriminellen Vereinigung ans Tageslicht kommen, wenn ich zu diesem Zeitpunkt deren Ertrag in der Karibik verzehre oder mir bereits die Radieschen von unten anschau? Eine Mafia mit 1000 Mitgliedern und einer Verschwiegenheit von NSA-Qualität ($p = 4 \cdot 10^{-6}$) hätte immerhin eine Chance von mehr als 85 Prozent, 40 Jahre lang ohne Störfall ihren Geschäften nachzugehen. In der Sprache der Kernphysiker hätte sie eine Halbwertszeit von etwa 173 Jahren.

Auch Kriminelle sind sterblich

Für jeden, der nicht einer auf Dauer angelegten Organisation wie Mafia oder NSA angehört, sondern nur ein einmaliges Ereignis wie den berüchtigten, vom US-Präsidenten Richard Nixon angestifteten Einbruch ins Watergate-Gebäude 1972 unter der Decke halten will, gibt es einen weiteren Trost: Die Kollegen sind auch sterblich. Die für die Haltbarkeit einer Verschwörung so entscheidende Anzahl N der Mitwisser nimmt mit der Zeit ab.

Die Theorie zur Berechnung von $Q(t)$ funktioniert auch für ein zeitab-

hängiges N ; allerdings lassen sich die Ergebnisse nicht immer in so schönen eleganten Formeln ausdrücken. Am einfachsten ist es noch, wenn man für das menschliche Leben ebenfalls einen Abbauprozess mit der Formel e^{-ct} unterstellt. Eine Zerfallskonstante $c = 1/(40 \text{ Jahre})$ erscheint nicht unplausibel, wenn man annimmt, dass die Verschwörer zum Zeitpunkt ihrer großen Tat in den besten Jahren sind. Und siehe da: Nach einigen Jahrzehnten muss man kaum mehr fürchten, dass noch eine Jugendsünde ans Tageslicht kommt, denn fast alle Mitwisser sind ausgestorben. Die Bestehenswahrscheinlichkeit $Q(t)$ der Verschwörung strebt nicht gegen null, sondern gegen einen positiven Grenzwert (Bild S. 68).

Aber diese Form der mathematischen Modellierung ist selbst dem sonst nicht zimperlichen David Robert Grimes zu realitätsfern. Sie setzt nämlich voraus, dass die Zahl der in einem gewissen Zeitintervall Sterbenden proportional der Zahl der zu dieser Zeit Lebenden ist. Für echte Menschen wäre diese Bedingung allenfalls dann erfüllt, wenn sie – mit niedriger, aber einigermaßen einheitlicher Erfolgsrate – Jagd aufeinander machten, vielleicht um unliebsame Mitwisser aus dem Weg zu räumen. Auch diesen Grundgedanken

Das Schicksal einer Verschwörung

$Q(t)$ bezeichne die Wahrscheinlichkeit, dass zur Zeit t die Verschwörung noch nicht aufgefliegen ist. Der Zeitpunkt $t=0$ ist die »Geburtsstunde« der Verschwörung; offensichtlich ist $Q(0)=1$.

Das »Versagensrisiko pro Agent«, also die Wahrscheinlichkeit, dass ein Agent innerhalb eines kurzen Zeitraums das Geheimnis preisgibt, ist gleich der Länge dt dieses Zeitraums mal dem Risiko p pro Zeiteinheit. Also ist die Wahrscheinlichkeit $Q(t+dt)$, dass die Verschwörung nach dem Ende dieser kurzen Zeit noch besteht, gleich der Wahrscheinlichkeit $Q(t)$, dass sie vorher schon bestanden hat, mal der Wahrscheinlichkeit $(1-p \, dt)^N$, dass keiner der N Agenten geplaudert hat:

$$Q(t+dt) = Q(t) (1-p \, dt)^N$$

Man multipliziert die Klammer aus und erhält die lange Summe $1-Np \, dt + N(N-1)/2 \, p^2 \, dt^2 - \dots$, wobei die weggelassenen Terme höhere Potenzen von dt enthalten. Nun kommt die übli-

che Argumentation der Analysis: Man bringt $Q(t)$ auf die linke Seite der Gleichung, dividiert durch dt und erhält

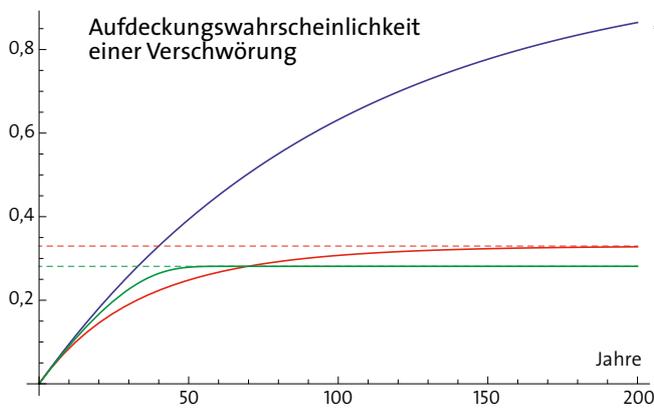
$$\frac{Q(t+dt) - Q(t)}{dt} = -NpQ(t) + O(dt)$$

wobei $O(dt)$ alle Terme zusammenfasst, die dt in der ersten oder einer höheren Potenz enthalten. Man lässt dt gegen null gehen und erhält für die zeitliche Ableitung Q' von Q die Gleichung

$$Q'(t) = -NpQ(t).$$

(An Stelle von $(1-p \, dt)^N$ hätte man oben auch die Poisson-Näherung $e^{-Np \, dt}$ einsetzen dürfen und wäre zum selben Ergebnis gekommen.) Diese Differenzialgleichung zusammen mit der Anfangsbedingung $Q(0)=1$ lässt sich explizit lösen; das Ergebnis ist $Q(t) = e^{-Npt}$.

Die Herleitung der beiden obigen Gleichungen bleibt unverändert, wenn die Verschwöreranzahl N von der Zeit abhängt.



Nach dem Modell von David Robert Grimes wird eine Verschwörung von 10 000 Mitgliedern mit einer Geschwätzigkeit von $p = 10^{-6}$ pro Jahr auf die Dauer unweigerlich auffliegen, auch wenn sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent 80 Jahre lang bestehen wird (blaue Kurve). Wenn dagegen die Verschwörer selbst einem exponentiellen »Zerfallsprozess« unterliegen (rote Kurve) oder – realistischer – beim Sterben einer Gompertz-Kurve (Bild S. 66) folgen (grüne Kurve), strebt die Aufdeckungswahrscheinlichkeit einem Grenzwert unterhalb von 1 zu. Hat also das Geheimnis schon einige Jahrzehnte lang Bestand, werden wir es nie erfahren.

greifen manche Agententhiller auf; aber in der Realität könnte man dann, so wendet Grimes ein, nicht mehr von einem zeitlich unveränderlichen p ausgehen. Denn die Aussicht, von den Exkollegen abgeknallt zu werden, würde mit Sicherheit so manchem Verschwörer die Zunge lösen.

Der Klimawandel ist real

Macht nichts – es gibt Modelle, die das Sterben der Menschen wesentlich besser beschreiben als die einfache Exponentialfunktion (Bild S. 66). Und wenn man eine solche Funktion in die Gleichungen einsetzt, kommt wieder heraus, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit der Verschwörung gegen einen positiven Wert strebt (Bild oben).

Aber wohlgemerkt: Alle Zahlen, die sich bei diesen Berechnungen ergeben, sind nur so genau wie die Schätzwerte für p und N , die in die Formeln eingegangen sind, und damit allenfalls für qualitative Aussagen brauchbar. Dazu zählt die Binsenweisheit, dass eine Verschwörung umso besser hält, je weniger von ihr wissen und je verschwiegener sie sind.

Darüber hinaus erlauben Grimes' Überlegungen mit großer Sicherheit die Aussage, dass die Mondlandung stattgefunden hat. Denn Geschwätigkeitswerte im Millionstelbereich – knapp vor der Unfehlbarkeit – liegen deutlich unter dem, was echte Menschen leisten können. Selbst unter derart unrealistisch günstigen Voraussetzungen hätte allein wegen der hohen Teilnehmerzahl eine Verschwörung keine nennenswerte Chance gehabt. Und

diese Aussage hält auch den zweifellos vorhandenen groben Vereinfachungen bei der Modellierung stand.

Mit vergleichbaren Argumenten kann man die Vorstellung verwerfen, der Klimawandel sei die Erfindung einer Wissenschaftler-Mafia, der es nur um die eigenen Pfründen gehe. Deren Mitgliederzahl müsste gleichfalls in den Zehntausenden liegen, und zweifellos liegt die Geschwätzigkeit des durchschnittlichen Klimaforschers – zum Glück! – weit über Geheimdienstniveau.

Ganz davon abgesehen kann eine Verschwörung auch durch Bemühungen von außen – Ermittlungen der Polizei oder investigativen Journalismus – aufgedeckt werden, was deren Erfolgchancen weiter mindert.

In einem wesentlichen Punkt ist Grimes' Theorie allerdings ganz offensichtlich ein Kind des Internetzeitalters: in der Annahme, dass ein einziger »Whistleblower« auf der Stelle die Öffentlichkeit erreicht und die Verschwörung zusammenbrechen lässt. Daher passt der Tuskegee-Syphilis-Skandal nicht recht zur Theorie. Denn die Verantwortlichen hatten sich keine besondere Mühe gegeben, ihr unethisches Verhalten geheim zu halten, sondern nur die von Peter Buxtun und anderen intensiv vorgetragenen Bedenken schlicht ignoriert. Erst als der Skandal im Juli 1972 in die Zeitung kam, brach die öffentliche Debatte los, an deren Ende die heutigen Vorschriften für medizinische Menschenversuche standen.

Hätte – ganz ohne Internet – eine Verschwörung im Mittelalter bessere Chancen gehabt? Hätten irgendwelche

Mächte jeden, der eine Klosterchronik schrieb, dazu veranlassen können, nach dem Jahr 614 mit 911 fortzufahren und/oder dem widersprechende Aufzeichnungen zu fälschen, wie der Publizist Heribert Illig behauptet (»Das erfundene Mittelalter«, 1996)?

Nun, N ist nicht übermäßig groß und p schwer abzuschätzen. Wie wahrscheinlich ist es, dass ein Mönch sich zwar – unter welchem Druck auch immer – bereitfindet, eine Chronik mit falschen Daten zu schreiben, aber darüber eine Notiz anfertigt und diese die Jahrhunderte überdauert, bis ein Historiker sie entdeckt? Für eine seriöse Schätzung von N und p müsste man ernsthafte Geschichtswissenschaft treiben. Aber ich wage die Prognose, dass das Produkt Np deutlich über 1 liegt. Da bislang keine solche Notiz gefunden wurde ... ~

DER AUTOR



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

QUELLE

Grimes, D.R.: On the Viability of Conspiratorial Beliefs. In: PLoS One 11, e0147905, 2016

WEBLINK

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400770



Damit es in Ihrer wissenschaftlichen Karriere rund läuft.

Haben Sie Fragen zu:

- **Bewerbung und Berufung**
- **W-Besoldung**
- **Berufungsverhandlungen**
- **Mitarbeiterführung**
- **Drittmitteleinwerbung**
- **Wissenschaftsenglisch schreiben**
- **Hochschuldidaktik**

Die Seminarreihe des Deutschen Hochschulverbandes bietet Ihnen Antworten und Information.

Das gesamte Seminarprogramm finden Sie unter:

www.karriere-und-berufung.de.

Die aktuelle Seminarbroschüre des Deutschen Hochschulverbandes kann kostenlos angefordert werden bei

Dr. Ulrich Josten, Tel.: 0228/902-6634, E-Mail: josten@hochschulverband.de.

Folgen Sie uns auch auf

[www. Facebook.com/Hochschulverband](https://www.facebook.com/Hochschulverband)

**Karriere
und
Berufung**
Seminare | Coaching | Consulting

**DEUTSCHER
HOCHSCHUL
VERBAND**

Köpfe die Wissen schaffen

ÖKOLOGIE

Gift im Trinkwasser

In Teilen Asiens gibt es immer mehr arsenvergiftete Brunnen. Die Gesundheit von Millionen Menschen ist gefährdet. Doch Bemühungen um Abhilfe kommen nur äußerst langsam voran.

Von Katy Daigle



Menschen waschen sich die Hände mit arsenverseuchtem Wasser an einem Dorfbrunnen im indischen Kolsur.

Bei ihrer Hochzeit erlebte Gita Paul einen Schock. Ihre Eltern hatten die Heirat mit einem Mann arrangiert, den sie nie zuvor gesehen hatte. Er lebte in Kolsur, einem ärmlichen, weit von ihrer Heimat entfernten Ort in einer von Reisfeldern und Viehweiden geprägten Gegend nahe Kalkutta in Ostindien. Arrangierte Ehen mit Fremden sind in dieser Region üblich. Doch als Gita ihren Ehemann erblickte, stellte sie mit Schrecken fest, dass sein Körper mit offenen Wunden und Schorf übersät war. Ähnlich schlimm stand es um den Rest der Familie. Ein älterer Bruder hatte einen Fuß durch Nekrose verloren, eine Schwester kränkelte, ein weiterer Bruder war im Alter von nicht einmal 40 Jahren verstorben. Viele Menschen in dem Ort wirkten leidend. »Ich hatte so etwas noch nie gesehen«, sagte Gita Jahre später in einem Interview, auf den unebenen Stufen sitzend, die zu dem winzigen Backsteinhaus ihrer Familie führen. »Ich hielt es für eine ansteckende Krankheit.«

Bald war auch Gitas Haut von Schorf entstellt. Da wusste sie allerdings schon, dass die Krankheit nicht durch die Luft übertragen wird, sondern auf einem anderen Weg. Wissenschaftler waren mit einfachen Test-Kits vorbeigekommen und hatten festgestellt, dass das kühle, klare Wasser der örtlichen Brunnen mit Arsen vergiftet ist. Gita beschloss, mit ihrem Mann in ein benachbartes Bauerndorf zu ziehen. Doch auch dort starben die Menschen, und es zeigte sich, dass das Brunnenwasser ebenfalls mit Arsen belastet war.

AUF EINEN BLICK

ARSEN BEDROHT ASIEN

1 In vielen armen, dicht besiedelten Gebieten der Erde wurden **Rohrbrunnen** angelegt, um das keimbelastete Oberflächenwasser zu umgehen. Das Grundwasser, das sie zu Tage fördern, ist jedoch oft mit natürlich vorhandenem Arsen vergiftet.

2 Der hohe Wasserverbrauch einer stark wachsenden Bevölkerung verändert die **Grundwasserströmung**, wodurch das toxische Element zunehmend auch in zuvor saubere Brunnen gelangt.

3 Abhilfe könnten **geologische Kartierungen** des Untergrunds, großräumige **Bodenanalysen** und **wasserchemische Untersuchungen** bringen. Doch die praktische Umsetzung ist mit großen Schwierigkeiten verbunden.

Das Übel betraf die gesamte Region! Überall vergifteten sich die Menschen ungewollt selbst mit dem Wasser, das sie tranken und zum Kochen und Geschirrspülen verwendeten. Ähnlich verhält es sich in vielen anderen Teilen Asiens. Mindestens 140 Millionen Menschen auf diesem Kontinent trinken arsenverseuchtes Wasser. Es fließt meist aus einfachen Plastik- oder Metallrohren, die in den Boden getrieben wurden. Über 18 Millionen solcher primitiven Rohrbrunnen mit handgekurbelten Pumpen sind nach offiziellen Angaben der Regierung allein in Indien während der letzten drei Jahr-

Der Körper von Srivas Paul aus Kolsur ist übersät mit schmerzhaften Narben: Folgen der Vergiftung mit Arsen aus Brunnenwasser.





Einheimische baden in einem Teich nahe dem indischen Städtchen Berachampa, dessen Wasser mit Arsen verunreinigt ist.

PALJIA BRONSTEIN

zehnte installiert worden. In einem Land, in dem Flüsse und Seen oft mit industriellen Abwässern und Fäkalien verschmutzt sind, erhofften sich die Menschen so Zugang zu sauberem Wasser. Doch die Hoffnung trog.

Arsen ist ein chemisches Element, das in vielen Gesteinen in Spuren vorkommt. Manchmal erreicht es allerdings Konzentrationen, die für den Menschen gefährlich sind. In Form wasserlöslicher Verbindungen wirkt es als Zellgift und führt zunächst zu Vernarbungen der Haut und später, wenn es sich allmählich im Körper ansammelt, zu Gehirnschäden, Herzkrankheiten und Krebs. Arsenhaltiges Grundwasser findet sich in mindestens 30 Ländern – nicht nur in Indien und Bangladesch, sondern auch in China, Kambodscha und Vietnam, ebenso in Teilen Kanadas und der USA sowie in Argentinien (siehe »Arsen im Untergrund aufspüren«, S. 74).

Durch das Bohren von immer mehr Brunnen zur Versorgung einer wachsenden Bevölkerung und zum Bewässern von Feldern hat sich die Situation in den letzten Jahren verschlimmert. Weil zu viel Wasser aus dem Boden gepumpt wird, sucht es sich unterirdisch neue Wege. Manchmal fließt es deshalb jetzt durch arsenbelastete Sedimente, so dass inzwischen auch früher unbedenkliche Brunnen in Dörfern mit zuvor gesunder Bevölkerung verseucht sind.

Wissenschaftler versuchen daher den Untergrund zu kartieren, um unbedenkliche Stellen für das Bohren von Brun-

nen zu finden. Aber die Grundwasserströme wechseln immer wieder ihre Richtung, weshalb die Karten binnen Kurzem veralten. »Die Situation ist hoffnungslos«, klagt Dipankar Chakraborti, ein Umweltchemiker an der Jadavpur University in Kalkutta, der sich seit 28 Jahren mit dem Problem befasst. »Die Bodenverhältnisse verändern sich so rasch, dass wir einfach nicht Schritt halten können.«

Brunnen bringen den Tod

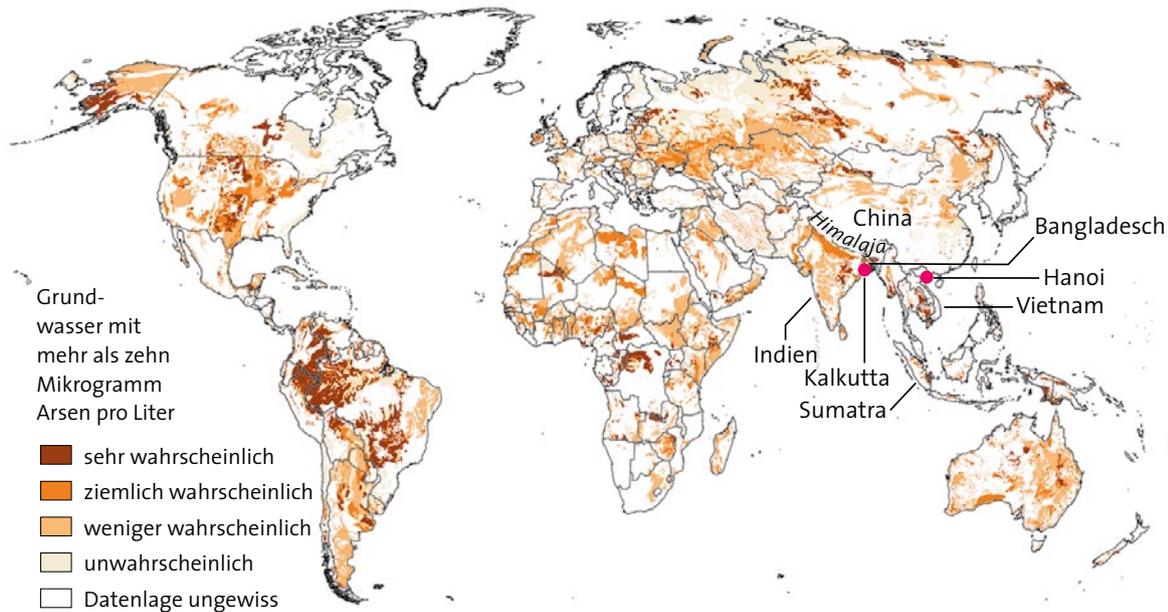
Reichere Regionen wie der Südwesten der USA verfügen über Geld und technische Mittel, um verseuchtes Wasser zu entgiften. Doch viele der am stärksten bedrohten Gegenden gehören zu den ärmsten Ländern der Welt. Besonders schlimm ist die Situation in Südasien, wo ein dicht besiedelter Landstrich betroffen ist, der Teile von Indien, Nepal und Bangladesch umfasst. Obwohl die Weltgesundheitsorganisation (WHO) Arsenkonzentrationen von über zehn Mikrogramm pro Liter Wasser als gesundheitsschädlich einstuft, beträgt der gesetzlich erlaubte Grenzwert in Indien immer noch 50 Mikrogramm pro Liter – und viele Brunnen genügen nicht einmal diesem niedrigen Standard.

Die Schwierigkeiten auf dem Subkontinent gehen bis in die 1960er Jahre zurück. Damals tranken und wuschen noch das – oft stehende – Oberflächenwasser, das durch häusliche und landwirtschaftliche Abwäs-

Arsen im Untergrund aufspüren

Das chemische Element Arsen ist natürlicher Bestandteil vieler Mineralien, die überall auf der Erde vorkommen. Gewöhnlich an Metallatome gebunden, kann es unter bestimmten Umständen ins Grundwasser übertreten, wo es ab einer Konzentration von zehn Mikrogramm pro Liter die Gesundheit schädigt. Gewöhnlich löst sich das Element unter zwei Bedingungen aus dem Mineralverband: Wenn das im Untergrund

zirkulierende Wasser einen hohen pH-Wert hat, also stark basisch ist, oder wenn es wenig Sauerstoff enthält und sich durch Erdreich mit hohem Gehalt an organischem Kohlenstoff bewegt. Wissenschaftler versuchen anhand von Informationen über die Wasser- und Bodenverhältnisse in verschiedenen Teilen der Welt die am stärksten gefährdeten Areale zu prognostizieren.



KARTE MIT FRODLGEN, VON MICHAEL BERG, AMINI, M. BERG, M. ET AL.: STATISTICAL MODELING OF GLOBAL GEOGENIC ARSENIC CONTAMINATION IN GROUNDWATER. IN: ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY 42, S. 3669-3675, 2008. FIG. 2

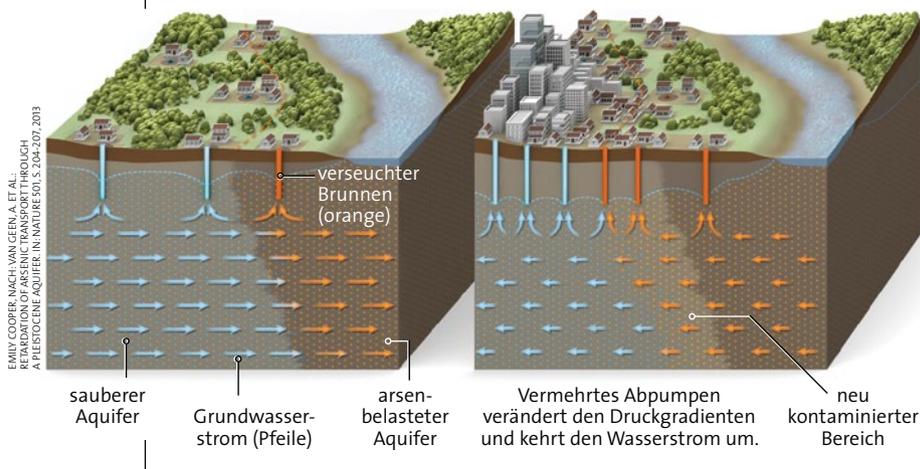
Verseuchter Boden: ein weltweites Problem

Forscher der Schweizer Eawag (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz) haben eine Weltkarte des Arsenrisikos erstellt, indem sie ermittelten, wo die Bodenverhältnisse eine Freisetzung des Elements begünstigen. Sauerstoffreicher Boden und ein hoher pH-Wert des Grundwassers machen Teile Argentiniens und

Chiles zu gefährdeten Regionen. Erdreich, das viel organisches Material und wenig Sauerstoff enthält, kommt dagegen meist in Flussdeltas vor. Deshalb besteht vor allem im nördlichen Indien und in Bangladesch, aber auch im Amazonasbecken ein erhöhtes Risiko, wobei die Situation am Amazonas noch nicht endgültig geklärt ist.

niedrige Bevölkerungsdichte

hohe Bevölkerungsdichte



EMILY COOPER, NACH VAN GEEN, A. ET AL.: RETARDATION OF ARSENIC TRANSPORT THROUGH A PLEISTOCENE AQUIFER. IN: NATURE SOILS, 204-207, 2013

Bevölkerungswachstum erhöht das Risiko

Wenn eine wachsende Bevölkerung immer mehr Grundwasser aus dem Boden pumpt, kann dieses seine Strömungsrichtung ändern, was unter Umständen zu einer Arsenverseuchung führt. Ein Beispiel ist die vietnamesische Hauptstadt Hanoi. Sie zapft einen Aquifer an, dessen Wasser früher von der Stadt weg floss. Als wegen des Bevölkerungswachstums in jüngerer Zeit jedoch zusätzliche Pumpenanlagen installiert wurden, sank der Wasserdruck, so dass er nun unter demjenigen in einem benachbarten, mit Arsen belasteten Aquifer liegt. Von dort bewegt sich deshalb jetzt verunreinigtes Grundwasser stadteinwärts.

ser verunreinigt und dadurch stark keimbelastet war. Um diese Krankheitsquelle auszuschalten, startete Indien 1969 mit Unterstützung internationaler Organisationen wie dem Kinderhilfswerk UNICEF ein 125 Millionen Dollar schweres Programm zum Bohren von mehr als einer Million einfacher Brunnen. Weitere ähnliche Vorhaben folgten. Indien schien kaum eine andere Wahl zu haben. Das Land verfügte über fast keine Infrastruktur zum Speichern, Verteilen oder Reinigen von Wasser – woran sich mit Ausnahme der ganz großen Städte bis heute nichts geändert hat.

Die Rohrbrunnen galten als preiswerte Lösung. Von den 1,25 Milliarden Indern nutzen heute etwa 80 Prozent der ländlichen und 50 Prozent der städtischen Bevölkerung Grundwasser zum Trinken und Kochen. Die Brunnen lösten zugleich ein anderes drängendes Problem: den akuten Nahrungsmangel, der Teile des Subkontinents in den 1980er Jahren bedroht hatte. Durch künstliche Bewässerung ließ sich der Anbau von Reis, Weizen und Zuckerrohr beträchtlich steigern.

Aber der Segen für die Landwirtschaft zeigte bald Schattenseiten. Die meisten Rohrbrunnen reichten in Tiefen von 50 bis 200 Metern, wo sich die erste Schicht keimfreien Wassers befand. Leider entspricht diese Tiefe genau derjenigen mit dem höchsten Arsengehalt in der Region, was damals noch niemand wusste. Etwas darunter ist das Wasser in der Regel genießbar. Doch das Bohren tieferer Brunnen beansprucht mehr Zeit und Geld und erfordert robusteres Material, das sich die arme Landbevölkerung in der Regel nicht leisten kann.

Hinzu kommen weitere Schwierigkeiten. Die verbreitete Ignoranz und Gleichgültigkeit der Behörden verhindert eine Aufklärung der Menschen über die Gefahren. Vermeintlich einfache Lösungen wie das Sammeln von Regenwasser oder die Aufbereitung vor Ort erweisen sich als zu kompliziert für Analphabeten und werden leicht missverstanden. So scheiterte das Auffangen von Wasser vielfach an der ungenügenden Wartung von Kunststoffplanen und Rohren. Das Filtern durch sandgefüllte Behälter empfinden die Menschen oft als lästig und Zeit raubend. Von Wissenschaftlern und Aktivisten ausgegebene Wasserreinigungstabletten werden falsch angewendet, da die Landbevölkerung die Anleitungen nicht lesen kann oder die chemischen Reaktionen nicht begreift. Großtechnische Lösungen wie zentrale Aufbereitungsanlagen, die für Millionen von Menschen das Problem aus der Welt schaffen könnten, haben sich als zu teuer und zu umständlich in der Bedienung erwiesen. Viele davon leiden unter mangelnder Aufsicht.

»Die beste Lösung wäre natürlich, das kontaminierte Wasser ganz zu vermeiden«, sagt Michael Berg, der die Gruppe Schadstoffhydrologie an der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) in der Schweiz leitet. »Doch im Vergleich zu dem keimverseuchten Oberflächenwasser gilt das vergiftete Grundwasser als kleineres Übel.«

Arsen ist ein relativ verbreitetes chemisches Element. Als geschmack-, farb- und geruchlose Substanz war sein wasser-



In seinem Labor an der Jadavpur University in Kalkutta untersucht der Chemiker Dipankar Chakraborti das Verhalten von Arsen in Grundwasserleitern.

lösliches Oxid, gemeinhin als Arsenik bezeichnet, lange Zeit ein beliebtes Mittel für Giftmorde. Bei den meisten Lebewesen wirkt es selbst in geringen Mengen toxisch.

Geologie eines Killers

Die Ebenen am Fuß des Himalaja gehören zu den arsenreichsten Gebieten der Erde. Nachdem sich das gewaltige Gebirge beim Zusammenstoß Indiens mit Eurasien aufgefaltet hatte, legte die Erosion an seinen Flanken arsenhaltigen Pyrit (Schwefelkies) frei. Reißende Flüsse beförderten das Mineral, das an der Luft verwitterte und dabei wasserlösliche Arsenverbindungen bildete, quer durch Indien, Bangladesch, China, Pakistan und Nepal. Unterwegs reagierten diese Verbindungen mit Eisen oder anderen Schwermetallen, wobei kleine Körner entstanden, die sich im Flussbett nach und nach als gebänderte Sedimente mit hohem Arsengehalt absetzten. So gelangte das giftige Element in die schlammigen Ablagerungen, aus denen die Flüsse Ganges, Brahmaputra und Meghna innerhalb von Jahrtausenden ein riesiges flaches Delta aufschütteten: heute ein dicht besiedeltes Gebiet, in dem 500 Millionen Menschen auf einer Fläche von 700 000 Quadratkilometern leben.

Die arsenreichen Schichten befinden sich größtenteils nicht mehr an der Oberfläche, sondern in verschiedenen Tiefen unter der Erde, wo sie normalerweise keinen Schaden anrichten würden. Doch die Rohrbrunnen zapfen die belasteten Bereiche an. Trotzdem wird das unterirdische Arsen nicht immer aus dem Boden ausgewaschen, sondern gelangt nur dann ins Grundwasser, wenn gewisse geologische Bedingungen erfüllt sind. Forscher haben zwei Fälle herausgefunden, in denen das geschieht – woraus sich Möglichkeiten für Computersimulationen ergeben, die eine Risikoprognose für die jeweiligen Regionen erlauben.

Das erste Szenario ist die alkalische Freisetzung von Arsen. Sie findet in sauerstoffreichen Böden statt, wo Wasser mit einem hohen pH-Wert zirkuliert, etwa in niederschlagsarmen (»ariden«) Gebieten Argentiniens oder der südwestlichen USA. Unter diesen Umständen zersetzen sich die Oxide von Eisen und anderen Metallen, welche die Bodenpartikel umhüllen. Dadurch kann das darin gebundene Arsen entweichen und in das angrenzende Grundwasser übertreten.

Das zweite Szenario – die reduktive Freisetzung – spielt sich in sauerstoffarmen Böden ab, die viel organisches Material enthalten. Solche Bedingungen sind typisch für Deltas, Auen und Flussbecken. Dort ist der junge Boden an der Oberfläche oft noch von Bakterien durchsetzt. Das trifft auf einige der am dichtesten besiedelten Gebiete der Erde zu, unter anderem in Nordindien und Bangladesch sowie in südostasiatischen Ländern wie Vietnam. In diesem Fall zersetzen Enzyme der Bakterien das Eisenoxid, an dem Arsen haftet.

Die Gefahr kartieren

Der Vorgang läuft so lange ab, wie es genügend organischen Kohlenstoff als Nahrung für die Bakterien gibt. Begünstigt wird er unter anderem durch Düngemittel, die in Indien reichlich Verwendung finden. Hemmend wirkt dagegen ein hoher Gehalt des Bodens an Salzen, insbesondere Sulfiden, die mit Arsen schwerlösliche Verbindungen bilden. Doch dazu darf nur wenig Sauerstoff vorhanden sein, da die Bakterien mit Hilfe dieses Gases die Sulfide aufbrechen können, was erneut alles darin eingelagerte Arsen freisetzt. Werden also Grundwasser führende Schichten in rascher Folge leer gepumpt und wieder aufgefüllt, wobei frisch mit Sauerstoff angereichertes Wasser zurück in den Boden gelangt, kommt erneut ein Schwung Arsen frei. Leider geschieht genau das in Indien sehr häufig.

Derzeit ist es noch ziemlich zeitraubend und arbeitsintensiv, Brunnen auf Arsen zu prüfen. Techniker müssen zu jedem einzelnen hinfahren und ihn untersuchen. Nachdem sie das Wasser mit verschiedenen Reagenzien versetzt haben, tauchen sie einen Teststreifen ein. Nach etwa zehn Minuten liegt das Ergebnis vor: Bei sauberem Wasser bleibt der Streifen weiß; in Anwesenheit von Arsen färbt er sich rot. Doch dieser Test liefert nur einen ersten Anhaltspunkt. Für eine endgültige Bewertung ist eine Laboruntersuchung nötig.

Da ein so großes Gebiet betroffen ist, erkennen die Kontrolleure das Problem meist zu spät. Oft kommen sie erst dann zu den Brunnen, wenn die Menschen schon jahrelang arsenbelastetes Wasser getrunken haben. Deshalb suchen einige Wissenschaftler jetzt nach Wegen, das Verfahren abzukürzen. So studieren sie Satellitenbilder und kartieren Wasserströme, um herauszufinden, aus welchen Sedimenten der Untergrund besteht und wie sich das Arsen darin verteilt. Im Erfolgsfall würde die Methode viel Geld und Zeit sparen, indem sie die Anzahl der zu untersuchenden Brunnen reduziert. Auch könnte sie in manchen bisher als sicher geltenden Gebieten die Alarmglocken schrillen lassen.

Im Jahr 2006 begannen Berg und andere Forscher der Eawag, eine Weltkarte des Arsenrisikos zu erstellen. Grundlage waren frühe Vorhersagemodelle, die sich auf Parameter wie den Arsengehalt des Bodens, die Hangneigung und das Strömungsmuster des Wassers stützten. Ein erster Entwurf dieser Karte erschien 2008; eine neuere Version, die jüngere Untersuchungen und mehr Details einbezieht, soll demnächst folgen.

»Mit solchen Modellen lassen sich Prognosen für Regionen erstellen, wo keine Messungen vorliegen«, erklärt Berg. So sagte sein Team für weite Teile der indonesischen Insel Sumatra eine Arsenbelastung des Grundwassers voraus. »Nachfolgende Messungen vor Ort lieferten die Bestätigung.«

Im Jahr 2013 bildete die Medizinische Universität Tianjin gemeinsam mit der Eawag eine Arbeitsgruppe, um ein Modell für China zu erstellen, nachdem zwischen 2001 und 2005 durchgeführte Probemessungen bei rund fünf Prozent der etwa 445 000 getesteten Rohrbrunnen Konzentrationen oberhalb des indischen Grenzwerts von 50 Mikrogramm pro Liter Wasser ergeben hatten; in noch viel mehr Fällen wurde das niedrigere Sicherheitsniveau der WHO überschritten. Angesichts riesiger, bisher nicht untersuchter Gebiete im Land wollte das Team ein Zeichen für die Politiker setzen, endlich Maßnahmen zu ergreifen.

»Es gibt eine Barriere zwischen Wissenschaft und Gesellschaft. Irgendwie müssen wir den politischen Entscheidungsträgern klarmachen, dass Forscher zur Lösung realer Probleme beitragen können«, meint der Chemiker Luis Rodríguez-Lado, Professor an der Universidad de Santiago de Compostela (Spanien). Das Risikomodell für China korrelierte in 77 Prozent aller Fälle mit den Ergebnissen von Probemessungen in Rohrbrunnen. Solche Daten, beteuert Rodríguez-Lado, könnten helfen, Leben zu retten. In jedem Fall aber zeigen sie, welche Rohrbrunnen vorrangig überprüft werden sollten: »Das ist für uns Wissenschaftler höchst befriedigend.«

Probleme mit den Vorhersagemodellen

Die Modelle stoßen allerdings an Grenzen. Da sie von den Verhältnissen an der Erdoberfläche und Angaben zu derzeitigen Strömungen ausgehen, eignen sie sich kaum dazu, den Arsengehalt älterer, unbekannter Grundwasserkörper abzuschätzen. »Unsere Prognosen fußen immer auf dem, was an der Oberfläche sichtbar ist«, erläutert Berg. »Wenn Kontakte zu älteren Ablagerungen bestehen, entgeht uns das.«

Auch Rodríguez-Lado betont, wie wichtig es ist, beim Erstellen der Modelle von genauen, aktuellen Informationen auszugehen, um Fehler zu vermeiden. So hatten zu Beginn seiner Untersuchungen für China kaum gesicherte Erkenntnisse vorgelegen. Er war deshalb auf Vermutungen angewiesen. Wegen der überwiegend ariden Landschaft mit spärlichen Niederschlägen tippte er auf die für sauerstoffreiche Böden typische alkalische Freisetzung von Arsen. Doch im Verlauf seiner Arbeit stellte er fest, dass die Grundwasserleiter (Aquifere) in China ähnlich wie in Indien und Bangla-

desch fast sauerstofffrei sind. Als Rodríguez-Lado seine Berechnungen unter diesen Voraussetzungen wiederholte, erzielte er eine viel höhere Trefferquote.

Grenzen gibt es auch bei der Auflösung. Das Risikomodell für China benutzt ein Raster mit Abständen von 25 Kilometern zwischen den Gitterlinien. Damit ist es zu weitmaschig, um eine sichere Prognose für einzelne Ortschaften zu erlauben. »Die Modelle bilden die lokalen Verhältnisse eben nicht genau genug ab«, bemängelt der Geochemiker Alexander

van Geen vom Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University in New York. Was nütze es, wenn bei einem Gebiet im Mittel eine 20-prozentige Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Arsen herauskomme? Bedeutet dieser relativ niedrige Wert, dass kein Grund zur Sorge besteht? »Nun, ich würde meinen Brunnen vorsichtshalber doch lieber testen lassen«, meint der Forscher.

Außerdem ist selbst mit einer korrekten Vorhersage das Problem nur dann gelöst, wenn sie Entwarnung gibt. Im an-

PAULA BRONSTEIN



In der Stadt Kalyani in Westbengalen pumpt ein Junge arsenverseuchtes Wasser zum Trinken und Kochen aus einem Rohrbrunnen (oben). Mancherorts, etwa in Kolsur, wurden einfache Filteranlagen zum Entfernen des giftigen Elements installiert (rechts). Viele davon sind wegen schlechter Wartung inzwischen jedoch defekt.

PAULA BRONSTEIN





PAULA BRONSTEIN

Da auch Reisfelder zunehmend mit arsenverseuchtem Wasser bewässert werden, findet sich der Giftstoff inzwischen sogar schon im Hauptnahrungsmittel der Bevölkerung Südostasiens.

deren Fall stellt sich die Frage, wie die Menschen an sauberes Wasser kommen sollen. Entsprechende Maßnahmen, welche die Behörden in der Vergangenheit ergriffen haben, waren leider wenig erfolgreich.

Zum Beispiel baute die Regierung des indischen Bundesstaats Westbengalen vor einigen Jahren eine Pipeline, um das arsenfreie kommunale Wasser von Kalkutta Richtung Osten in ländliche Gebiete zu leiten. Doch fließt es nur wenige Stunden am Tag, wenn überhaupt, und erreicht nicht jeden Ort. Die schwarzen Kunststoffrohre werden unzureichend gewartet. Viele sind inzwischen defekt; aus den Rissen sickert das wertvolle Nass in schlammige Pfützen am Straßenrand.

Eine Alternative ist das Entgiften von belastetem Wasser. Hunderte von Anlagen zur Arsenentfernung mit einem durchschnittlichen Preis von 1500 Dollar wurden vielerorts in Westbengalen und dem benachbarten Bangladesch installiert. Die einfachen, zylindrischen Filter haben sich allerdings als weitgehend unwirksam erwiesen. Bei einer Untersuchung durch Chakraborti und andere hielten nur zwei von 13 Anlagen verschiedener Hersteller den Arsengehalt unterhalb des indischen Grenzwerts. Keine einzige erfüllte zuverlässig die WHO-Norm. Als die Studie 2005 erschien, war das Ergebnis freilich ohnehin bereits irrelevant, weil wegen mangelhafter Wartung und Beaufsichtigung nur noch wenige Anlagen überhaupt arbeiteten.

Tiefer bohren ist keine Lösung

Als Ausweg böte sich ferner an, tiefere Rohrbrunnen zu bohren, die unter die belasteten Schichten hinabreichen. Aber das ist nicht nur teuer und übersteigt damit die finanziellen Möglichkeiten der betroffenen Gemeinden, sondern würde, wie Chakrabortis Forschungsergebnisse zeigen, auch lediglich vorübergehend Abhilfe schaffen. Die Aquifere in 200 Metern Tiefe sind von den höheren, verseuchten Schichten zwar durch eine dicke Tonlage getrennt. Die isolierende Barriere weist allerdings Risse und Löcher auf, durch die vergiftetes

Wasser in die tiefer gelegenen Schichten vordringen kann, wenn sie angezapft werden.

Eine solche Kontamination findet in Indien bereits statt. Dort dürften nach Angaben der Weltbank in den nächsten 20 Jahren wegen übermäßiger Nutzung des Grundwassers in 60 Prozent der Aquifere kritische Arsenkonzentrationen auftreten, sofern das Pumpen nicht drastisch eingeschränkt wird. So stieg, wie Chakraborti herausfand, im westbengalischen Ort Jainagar zwischen 1995 und 2000 in acht Rohrbrunnen der Gehalt des Giftstoffs von unbedenklichen Werten auf ein gefährliches Niveau an.

Arsen kann auch horizontal von einem verseuchten Aquifer zu einem benachbarten sauberen wandern, wenn sich der Wasserdruck zwischen den beiden Speichern verändert. Dieser Effekt zeigt sich derzeit in Hanoi. Die Hauptstadt Vietnams nutzt einen arsenfreien Aquifer, dessen Wasser bis vor Kurzem von der Stadt weg strömte. Doch da die wachsende Metropole den unbelasteten Grundwasserleiter immer stärker anzapft, hat sich seine Fließrichtung inzwischen umgekehrt. Wasser aus einem verunreinigten Aquifer in der Nähe des Roten Flusses vermischt sich deshalb mit dem sauberen der Stadt. Allerdings droht noch keine unmittelbare Gefahr. Wie van Geen herausfand, bewegt sich das Arsen nämlich 16- bis 20-mal langsamer als das Wasser selbst, weil es vermutlich noch an andere Elemente im Boden gebunden ist und nur nach und nach durch chemische Reaktionen im Untergrund freigesetzt wird.

In Indien schreitet die Verseuchung des Grundwassers wesentlich schneller voran und hat sich mit dem Bevölkerungswachstum und der damit verbundenen Ausweitung der Nahrungsmittelproduktion stark beschleunigt. Zwar verbietet ein Gesetz von 1986 die übermäßige Nutzung von Grundwasser. Kaum jemand kontrolliert jedoch seine Einhaltung. Selbst dort, wo Felder an Seen oder Flüsse grenzen, verwenden die Bauern Rohrbrunnen zum Bewässern. Auch Landbesitzer, die gar kein Wasser benötigen, pumpen so viel wie

möglich herauf, um es auf dem Schwarzmarkt zu verkaufen. So gelangt das Arsen in die Nahrungskette. Inzwischen findet es sich in Reis, Milch und Büffelfleisch. Sogar in abgefülltem Mineralwasser und in Ampullen mit sterilen Lösungen für Krankenhäuser hat Chakraborti es nachgewiesen.

Preiswerte Test-Kits für Analysen durch Laien

Obwohl sich die Wissenschaftler also über das Problem und seine Ursache einig sind, sei laut van Geen nicht klar, was dagegen zu tun ist. Wie Chakraborti und andere Forscher hält er Prognosemodelle für nützlich, aber seines Erachtens könnten sie die Untersuchung von Rohrbrunnen vor Ort nicht ersetzen. Am besten taugten dazu preiswerte Test-Kits. Diese seien zwar nicht so genau wie Laboruntersuchungen, lieferten jedoch sofort ein Ergebnis bei minimalen Kosten. Ihr Einsatz könne sogar Arbeitsplätze schaffen. Eine Befragung in 26 Ortschaften im indischen Bundesstaat Bihar ergab, dass etwa zwei Drittel der Einwohner bereit wären, 20 Rupien (knapp 0,30 Euro) für einen Kontrolleur zu bezahlen, der ihre Brunnen überprüft.

»Wir selbst sind mit dieser Aufgabe überfordert«, sagt van Geen. »Es gibt einfach zu viele private Brunnen. Deshalb wollen wir ein Netz von Kontrolleuren aufbauen, die gegen ein angemessenes Entgelt Probemessungen vornehmen.« In Bangladesch hat das schon recht gut funktioniert. Dort gelang es auf diese Weise, eine große Anzahl von Brunnen zu überprüfen und zugleich ihren Standort mittels GPS-Daten zu bestimmen. Anhand dieser Informationen erstellten van Geen und seine Kollegen eine Karte, die den Bewohnern nun zeigt, wo sie an sauberes Wasser kommen.

Folgeuntersuchungen deuten auch darauf hin, dass Menschen, die für einen Test bezahlt haben, eher dazu neigen, seine Ergebnisse zu beachten und zu unkontaminierten Brunnen zu wechseln, selbst wenn diese weniger leicht zu erreichen sind. Zusammen mit dem Hydrogeologen Chander Kumar Singh von der TERI-Universität in Neu-Delhi untersucht van Geen zudem, inwiefern sozioökonomische Faktoren wie Einkommen und Kastenzugehörigkeit die Menschen davon abhalten, sichere Brunnen zu nutzen, die sie mit Angehörigen anderer Kasten oder ärmeren Menschen teilen müssten. Die Regierung habe sich bisher kaum für dieses Problem interessiert, sagt Singh, obwohl es offenbar eine erhebliche Rolle spiele.

Chakraborti hat ebenfalls eine Schar von Helfern rekrutiert, die mit dem Fahrrad oder Zug zu Ortschaften fahren, um dort Proben aus Brunnen zu entnehmen. Außerdem führt er regelmäßig Teams von Ärzten, Studenten und Aktivisten in die betroffenen Gebiete, um dort Gesundheitschecks vorzunehmen. Er hat auch schon internationale Konferenzen über die Thematik organisiert und einen Hilfsfonds eingerichtet, um seine Forschungen und die kostenlosen Wassertests für ärmere Menschen zu finanzieren. Und wenn es ihm nicht gelingt, die Landbevölkerung mit seinen Qualifikationen zu beeindrucken, verdrängt er vorübergehend sei-

ne Abneigung gegen die traditionellen indischen Hierarchien und macht sich zu Nutze, dass er zu den Brahmanen gehört, der obersten indischen Kaste. Er trägt dann den weißen Dhoti, das traditionelle Hüfttuch der Männer, sowie die Heilige Schnur der brahmanischen Priester, und erklärt den Dorfbewohnern, welche Brunnen gesund für sie sind. »Ich hasse das, aber mir bleibt nichts anderes übrig«, erzählt er. »Ich muss in erster Linie die Mütter überzeugen. Dann weiß ich, dass die ganze Familie mitmacht.«

In Gitas Dorf leidet ihr Mann Srivas unter Anfällen von Kopfweg, chronischen Gliederschmerzen und Erschöpfung. Schwierige Narben bedecken seinen Körper, und seine Haut brennt, speziell in der Sonne. Es gibt keine Therapie gegen Arsenvergiftung, keine Medikamente, die den an den Chromosomen angerichteten Schaden rückgängig machen könnten. Zwar hilft bei extremen Fällen von Metallvergiftung unter Umständen die Injektion von so genannten Chelaten, die das toxische Element binden. Doch diese Behandlung ist hochriskant und für Normalverdiener in Indien unbezahlbar. Den meisten Betroffenen bleibt daher nichts anderes übrig, als sich möglichst gut zu ernähren und die weitere Giftaufnahme zu vermeiden. In dieser Hinsicht kann Srivas noch von Glück reden. Er hat einen halbwüchsigen Sohn, der sauberes Wasser in Eimern von einem nahe gelegenen Krankenhaus heranschleppt, und Gita ernährt die Familie mit ihrer Arbeit als Haushaltshilfe.

»Ich beklage mich nicht«, sagt der zitternde Mann und bekundet damit einen Fatalismus, der unter Indiens Armen weit verbreitet ist und der, wie einige Wissenschaftler befürchten, die Menschen teils sogar davon abhält, sich nach unbelasteten Brunnen umzusehen. »Aber selbst wenn ich mich beklagen wollte«, ergänzt Srivas achselzuckend, »würde mir sowieso keiner zuhören.« ~

DIE AUTORIN



Katy Daigle ist Umweltjournalistin in Neu-Delhi.

QUELLEN

Rahman, M. M. et al.: Status of Groundwater Arsenic Contamination in all 17 Blocks of Nadia District in the State of West Bengal, India: A 23-Year Study Report. In: Journal of Hydrology 518, S. 363–372, 2014

Rodríguez-Lado, L. et al.: Groundwater Arsenic Contamination throughout China. In: Science 341, S. 866–868, 2013

Van Geen, A., Singh, C. K.: Piloting a Novel Delivery Mechanism of a Critical Public Health Service in India: Arsenic Testing of Tubewell Water in the Field for a Fee. International Growth Centre, Februar 2013

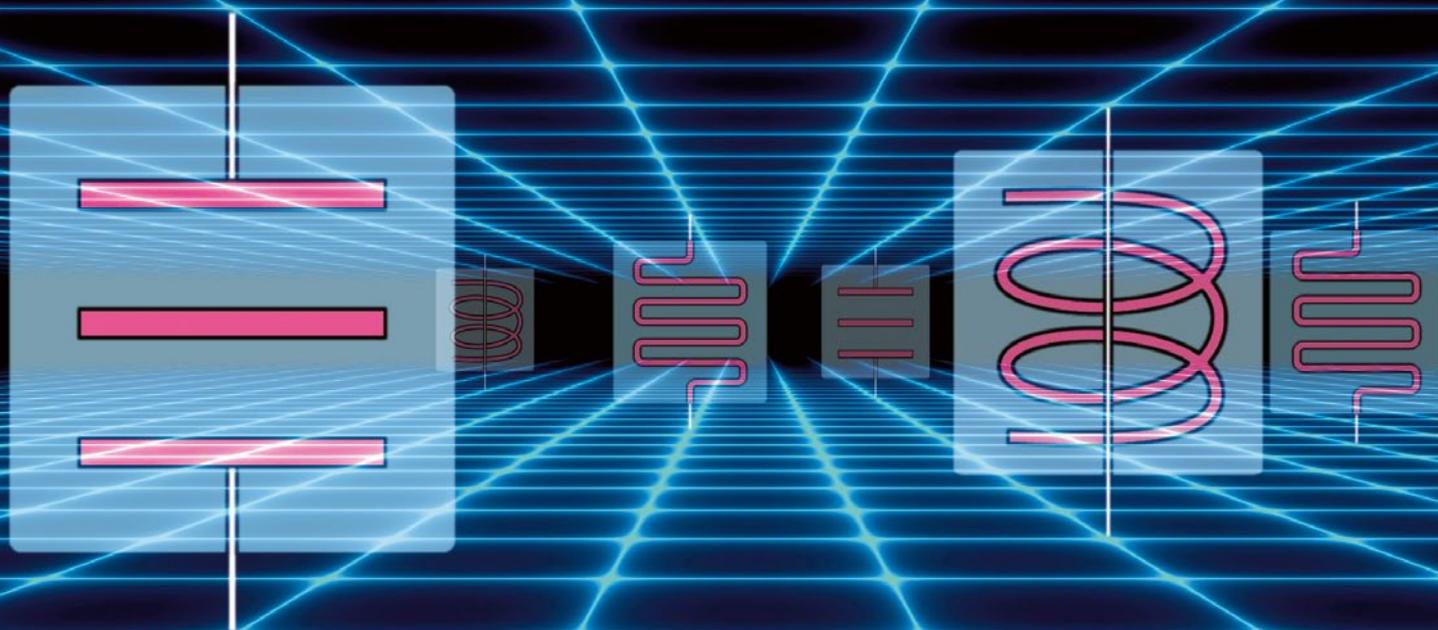
Van Geen, A. et al.: Retardation of Arsenic Transport through a Pleistocene Aquifer. In: Nature 501, S. 204–207, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400771

Computerchips mit integriertem Gedächtnis

Neue Typen elektronischer Bauteile überwinden die traditionelle Trennung zwischen Rechnen und Speichern und ähneln in dieser Hinsicht eher Neuronen als Transistoren. Das bietet die Aussicht auf einen gewaltigen Leistungszuwachs.

Von Massimiliano Di Ventra und Yuriy V. Pershin



Stellt diese künstlerische Vision einen Speicherchip oder einen Prozessor zum Rechnen dar? Die Antwort lautet Ja. Die Bauteile (von links nach rechts) Memkondensator, Memristor und Mempule können Daten zugleich verarbeiten und speichern.

Die Worte, die Sie gerade lesen, haben wir auf einem Spitzenprodukt moderner Technik geschrieben – einem Gerät, das eigentlich unfassbar viel Energie und Zeit verschwendet. Unter diesem Problem leiden alle heute gängigen Computer, vom Smartphone bis zu den ganze Hallen füllenden und millionenteuren Supercomputern in den größten Rechenzentren der Welt.

Um »die Worte, die Sie gerade lesen« auf den Bildschirm zu bringen, muss unser Rechner eine Liste aus Nullen und Einsen – seine interne Repräsentation des Dokuments – über elektrische Leitungen von seinem Arbeitsspeicher an einen anderen Ort verschieben, die zentrale Recheneinheit (central processing unit, CPU). Diese wandelt die Daten dann in Buchstaben um, die auf dem Monitor erscheinen. Damit unser Werk beim Abschalten des Computers nicht verloren geht, müssen die Daten abermals über einen Draht in einen dauerhaften Speicher befördert werden, etwa eine Festplatte.

Die doppelte Datenwanderung findet statt, weil – bislang zumindest – Rechner nicht speichern und Speicher nicht rechnen können. Und diese klassische Arbeitsteilung brems auch die modernsten Parallelrechner mit mehreren Prozessoren auf jedem Chip aus.

Wissenschaftler arbeiten nun an einer Methode, das bisher Unvereinbare zu vereinbaren: Sie haben Schaltkreise entworfen, die Daten zugleich verarbeiten und speichern können. Dabei werden Standard-Elektronikbauteile durch speicherfähige Varianten ersetzt: Transistoren werden zu Memristoren, Kondensatoren zu Memkondensatoren (»memcapacitors«) und Spulen zu Memspulen (»meminductors«). Die Vorsilbe Mem steht für »memory«, englisch für Gedächtnis im Sinn von Computerspeicher. Diese Bauteile gibt es heute zumindest im Labor, und schon bald könnten sie zu neuen Rechnern zusammengesetzt werden, zu »Memcomputern«.

Ein Zukunftsszenario zeichnet ein verlockendes Bild. Die neuen Geräte erreichen durch ihre Doppelfunktion einen beispiellosen Geschwindigkeitszuwachs. Jeder Teil eines Memcomputers trägt viel effizienter zur Lösung eines Problems bei als heute ein Prozessor eines Parallelrechners. Der Energieverbrauch durch den Datenverkehr zwischen Speicher und Rechenwerk erübrigt sich. Computer aller Größenklassen, vom winzigen Handychip bis zum Superrechner, sind mit einer neuen Architektur ausgestattet.

Der Aufbau eines Memcomputers hat gewisse Parallelen zum menschlichen Gehirn, in dem ein und dasselbe Neuron sowohl Erinnerungen speichert als auch Informationen verarbeitet. Noch hat niemand einen vollständigen Memcomputer gebaut; aber unsere Experimente stellen einen revolutionären Effizienzzuwachs in Aussicht.

Das Verschieben einiger Worte Text vom Speicher zum Rechenwerk und zurück erfordert zwar nur einen winzigen Aufwand an Energie und Zeit. Aber für alle Computer der Welt summiert sich das zu gigantischen Mengen. Allein zwischen 2011 und 2012 wuchs der Energiebedarf für Rechenzentren weltweit um stolze 58 Prozent. Und es geht nicht nur um Supercomputer. Zahlreiche Geräte im Haushalt, vom Backofen

bis zum Fernseher, enthalten mittlerweile einen kleinen Rechner, ganz zu schweigen von den PCs und Notebooks. Alles in allem verzehrt der Informations- und Kommunikationssektor heute etwa 15 Prozent der elektrischen Energie im Weltmaßstab. Bis zum Jahr 2030 werden allein die elektronischen Geräte für den Endverbraucher weltweit Strom im Wert von 200 Milliarden Dollar pro Jahr verbrauchen.

Der wachsende Energiehunger lässt sich durch die zunehmende Miniaturisierung der Bauteile nicht mehr bremsen. Nach einer Prognose der International Technology Roadmap for Semiconductors, eines Konsortiums, in dem sich die Halbleiterindustrie über die zu erreichenden Fortschritte verständigt, werden die elementaren Bauteile wie Transistoren wahrscheinlich schon in diesem Jahr auf eine Größe schrumpfen, unterhalb derer sie ihre Leistung nicht mehr erbringen können. Gleichzeitig wächst der Bedarf an Rechenleistung ungebremst an. Unter den Supercomputern der Welt herrscht Vollbeschäftigung, weil dringende Probleme wie die detaillierte Modellierung des Erdklimas immer größere Rechenleistungen erfordern. Indem Memcomputer den teuren, Energie und Zeit verschlingenden Datentransport zwischen CPU und Speicher einsparen, sollten sie den Energieverbrauch beträchtlich senken können.

Die Idee, Rechnen und Speichern am selben Ort zu betreiben, ist alles andere als neu. Das menschliche Gehirn arbeitet seit jeher nach diesem Prinzip, und das überaus effizient. Zahlreichen Einschätzungen zufolge entspricht seine Leistung etwa 10^{15} elementaren Operationen pro Sekunde. Und während es dabei 10 bis 25 Watt verbraucht, würde ein Supercomputer mehr als das Zehnmillionenfache benötigen – die volle Leistung des Walchenseekraftwerks.

Drei Teile einer neuen Maschine

Wie vollbringen die Komponenten eines Memcomputers das Kunststück, zugleich Informationen zu verarbeiten und sie auch dann zu speichern, wenn der Strom nicht mehr fließt? Eines der neuen Bauteile heißt Memristor (SdW 1/2011, S. 86). Um ihn zu verstehen, stelle man sich zunächst ein Rohr mit der exotischen Eigenschaft vor, dass es seinen Querschnitt je nach der Fließrichtung des hindurchströmenden Wassers ändert. Wird es von links nach rechts durchflossen, weitet es sich

AUF EINEN BLICK

MEMCOMPUTER

1 Alle modernen Computer verwenden einen **Prozessor**, der rechnet, und eine separate **Speichereinheit**, die Programme und Daten aufbewahrt. Der Transport der Daten von einem zum anderen kostet Zeit und Energie.

2 Eine neue Idee, der **Memcomputer**, verwendet ein ähnliches Prinzip wie die Neurone im menschlichen Gehirn. Diese dienen zugleich als Rechen- und als Speichereinheiten.

3 Das könnte einen gewaltigen Sprung für **Rechengeschwindigkeit** wie für **Effektivität** bedeuten und zugleich zu einer neuen Computerarchitektur führen.

und lässt damit mehr Wasser durch. Fließt das Wasser von rechts nach links, verengt sich das Rohr, und weniger kommt durch. Wird das Wasser abgedreht, behält das Rohr seine Weite bei – es »erinnert« sich an die letzte Flussrichtung (siehe »Arbeitsweise eines Memristors«, rechts).

Wenn Sie nun in Gedanken das Wasser durch elektrischen Strom ersetzen, dann wird aus dem Rohr ein Memristor. Der ändert seine elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Stromrichtung: hohe Leitfähigkeit entsprechend geringem Widerstand in der Vorzugsrichtung, geringe Leitfähigkeit und hoher elektrischer Widerstand in der Gegenrichtung. Das Bauteil verändert also seinen Zustand je nach dem elektrischen Strom, der es durchfließt. Das tut ein klassischer Transistor auch und verarbeitet damit die durch den Strom dargestellte Information. Darüber hinaus behält jedoch ein Memristor seinen Zustand nach dem Abschalten bei, wodurch er als Speicherelement fungiert.

Bereits in den 1970er Jahren beschrieb Leon O. Chua, ein Elektroingenieur an der University of California in Berkeley,

in der Theorie ein Bauteil mit diesen Eigenschaften und gab ihm auch den Namen »Memristor«. Nur hatte die Halbleiterindustrie damals kein Material mit derart exotischen Eigenschaften an der Hand, so dass die Idee keine Chance auf Realisierung hatte. Dies änderte sich im Lauf der Jahrzehnte, indem die Techniker immer bessere Kontrolle über ihre Materialien und Fertigungsprozesse gewannen. Im Jahr 2008 gelang es dem Ingenieur Stanley Williams und seinen Kollegen bei Hewlett-Packard, Speicherelemente herzustellen, die ihren elektrischen Widerstand ändern konnten und den neuen Zustand beibehielten. Es handelte sich um Bauteile aus Titandioxid in der Größenordnung 10 Nanometer (10^{-8} Meter). Erst bei diesen winzigen Dimensionen stellte sich der Memristor-Effekt ein; bei größeren Bauteilen war er nicht beobachtet worden.

In der Folge zeigte sich, dass Memristoren noch kleiner sein (Größenordnung wenige Nanometer) und aus einer Vielfalt von Materialien bestehen können. Zudem lassen sich diese Stoffe in den Fertigungsprozessen der Halbleiterindustrie verarbeiten. Es passen also nicht nur sehr viele Memristoren auf einen Chip; diese können auch im üblichen Massenbetrieb hergestellt werden.

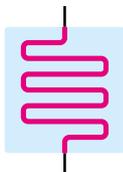
Eine weitere wesentliche Zutat für einen Memcomputer ist der Memkondensator. Ein gewöhnlicher Kondensator entspricht einem beliebig hohen Eimer mit Zu- und Abfluss am Boden. Er speichert Energie in Form von elektrischer Ladung (Wasser), ändert aber seine Kapazität (den Eimerdurchmesser) nicht in Abhängigkeit von der Füllhöhe. In heutigen Computern findet er Anwendung vor allem als Speicherelement, das seine Information – nämlich ob er geladen ist oder nicht – sehr schnell aufnehmen und wieder abgeben kann. Ein Memkondensator dagegen speichert nicht nur Ladungen, sondern ändert auch seine Kapazität in Abhängigkeit von der zuvor angelegten Spannung. Damit kann er Daten sowohl verarbeiten als auch aufbewahren. Obendrein kann die in ihm gespeicherte elektrische Energie beim Entladen wiederverwendet werden, was den Energieverbrauch der gesamten Maschine mindert. Memristoren dagegen verbrauchen die gesamte von ihnen aufgenommene Energie.

Einige Typen von Memkondensatoren gibt es bereits auf dem Markt. Sie werden aus relativ teuren ferroelektrischen Materialien hergestellt und zur Datenspeicherung eingesetzt. Forschungslabore arbeiten aber bereits an Versionen aus billigem Silizium; solche wären auch bei massenhafter Verwendung im gesamten Computer bezahlbar.

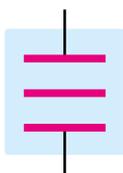
Das dritte Element eines Memcomputers ist die Memspule (»meminductor«). Sie hat zwei elektrische Anschlüsse und speichert Energie wie der Memkondensator, lässt aber Strom durch sich fließen wie ein Memristor. Auch Memspulen existieren heute bereits. Allerdings sind sie recht sperrig, weil sie wie gewöhnliche Spulen aus aufgewickeltem Draht bestehen – kaum in einen Computerchip einzubauen. Fortschritte der Materialwissenschaft könnten das aber bereits in der nahen Zukunft ändern, so wie das bei den Memristoren vor wenigen Jahren gelang.

Die drei Bausteine eines Memcomputers

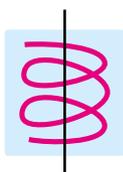
Nach der klassischen Theorie gibt es drei elementare Bestandteile eines Stromkreises. Ein Widerstand behindert den hindurchfließenden Strom, ein Kondensator speichert elektrische Ladung, und eine Spule wandelt fließenden Strom in ein Magnetfeld um. Sobald der Strom abgeschaltet wird, kehren alle drei in ihren Ausgangszustand zurück. Die entsprechenden Versionen eines Memcomputers dagegen behalten ihren letzten Zustand bei. Die Symbole, die für die neuen Bauteile in Schaltplänen verwendet werden (rote Linien), sind denen ihrer klassischen Gegenstücke nachempfunden.



Der **Memristor** ändert seinen Widerstand in Abhängigkeit von der Stärke und Richtung des ihn durchfließenden Stroms und behält seinen Zustand nach dem Abschalten bei. Damit kann er Informationen zugleich verarbeiten und speichern.



Der **Memkondensator** speichert nicht nur elektrische Ladungen, sondern ändert auch seine elektrische Eigenschaft, die Kapazität, abhängig von der Abfolge der angelegten Spannungen. Damit verfügt er ebenfalls über Rechen- und Datenspeicherfähigkeiten. Obendrein kann die in ihm gespeicherte Energie für weitere Rechenoperationen genutzt werden.



Die **Memspule** ist eine Art Mischling zwischen den beiden vorigen: Sie lässt eine gewisse Menge Strom durch wie ein Memristor und speichert Energie wie ein Memkondensator.

SCIENTIFIC AMERICAN

So weit die Einzelteile, aus denen ein neuer Computer zu bauen wäre. Wie aber könnte der besser rechnen als seine konventionellen Vorgänger?

Um dies auszutesten, versuchten wir uns ab 2010 an einer Übungsaufgabe, an der man gern die Leistungsfähigkeit neuer Hardware zu testen pflegt: einen Weg durch ein Labyrinth zu finden. Die ungeheuer große Anzahl an Irrwegen macht diese Aufgabe zu einer echten Herausforderung.

Mit einem einzigen Schritt durch den Irrgarten

Auf einem Blatt karierten Papiers kann man einen solchen Irrgarten schnell aufzeichnen, indem man man mit einem Filzstift die Kanten gewisser Kästchen markiert; das sind die undurchdringlichen Wände. Gesucht ist ein Weg – möglichst der kürzeste – von einem Eingangs- zu einem Ausgangspunkt.

Konventionelle Algorithmen erkunden das Labyrinth in kleinen Schritten. Der bekannteste ist die »Rechthandregel«: Laufe so, dass deine rechte Hand nie den Kontakt zur Wand verliert. Dieses Verfahren findet mit Sicherheit den Weg zum Ausgang – wenn es einen gibt –, aber es ist quälend langsam, denn es erkundet jede Sackgasse und deren Verzweigungen bis zum bitteren Ende.

Ein Memcomputer dagegen findet die Lösung geradezu atemberaubend schnell. Man baut ein Gitter aus Memristoren plus Schaltern, die jeweils benachbarte Kästchen unseres karierten Papiers verbinden. Wo das Labyrinth eine Wand hat, setzt man den entsprechenden Memristor mit dem zugehörigen Schalter außer Betrieb. Nachdem so das Problem in den Memcomputer eingegeben ist, legt man für kurze Zeit eine elektrische Spannung zwischen Ein- und Ausgang an. Strom fließt nur auf Wegen, die einer Lösung entsprechen. Je kürzer der Weg, desto geringer ist der gesamte elektrische Widerstand; entsprechend fließt dort ein größerer Strom und dehnt die Memristor-Röhre mehr.

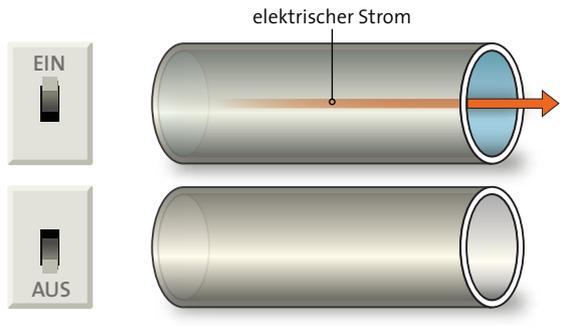
Nachdem der Strom ausgeschaltet ist, bleibt der Lösungsweg des Labyrinths in den Widerständen der zugehörigen Memristoren aufgezeichnet. Indem alle Memristoren parallel und gleichzeitig arbeiteten, haben sie die Lösung auf einen Schlag sowohl berechnet als auch gespeichert.

Diese Art von Parallelverarbeitung unterscheidet sich grundsätzlich von der gegenwärtig praktizierten Methode. In einem konventionellen Parallelrechner bearbeiten sehr viele Prozessoren verschiedene Teile eines Programms und tauschen anschließend ihre Ergebnisse aus. Diese Energie und Zeit fressende Informationsübertragung zwischen den Prozessoren und den zugehörigen, aber physikalisch getrennten Speichereinheiten ist in unserem Memcomputer überflüssig.

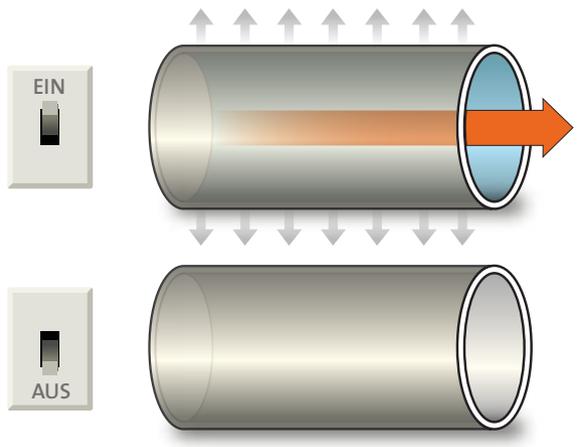
Seine wahre Stärke spielt das neue Gerät bei einem der schwierigsten Probleme der Informatik aus: gemeinsame Eigenschaften einer großen Menge ganzer Zahlen zu berechnen. Zu dieser Klasse zählt die Aufgabe, eine große ganze Zahl in ihre Faktoren zu zerlegen. Moderne Verschlüsselungsverfahren sind sicher, weil dieses Problem auch heute noch die stärksten Computer überfordert. Die folgende Aufgabe ist von vergleichbarer Schwierigkeit: Finde zu einer vor-

Arbeitsweise eines Memristors

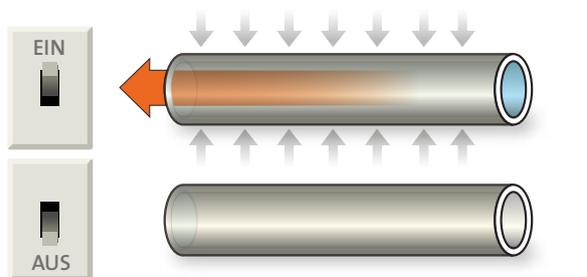
Im Grundzustand hat der Memristor einen mittelgroßen elektrischen Widerstand, hier wiedergegeben durch den Rohrschnitt. Der Widerstandswert lässt sich durch eine Zahl ausdrücken; entsprechend kann er als Repräsentation dieser Zahl im Computer dienen. Wird der Strom abgestellt, dann behält die Röhre ihre Gestalt bei.



Wenn ein starker Strom durch den Memristor fließt, sinkt sein Widerstand (das Rohr erweitert sich), wodurch noch mehr Strom hindurchfließen kann. Die Zahl, die durch den Widerstand repräsentiert wird, hat sich verändert: Informationsverarbeitung fand statt. Nach dem Abschalten behält der Memristor seinen Zustand bei, wodurch er zu einem Speicher wird. Ein herkömmliches Bauteil würde in seinen Grundzustand zurückkehren.



Wenn der Strom in Gegenrichtung fließt, erhöht sich der Widerstand des Memristors (das Rohr wird enger). Auch dieser Zustand bleibt nach dem Abschalten erhalten.



JEN CHRISTIANSEN

gegebenen Menge von positiven und negativen ganzen Zahlen eine – nichtleere – Teilmenge, für welche die Summe ihrer Elemente null ergibt. Wenn ein Computer jede Teilmenge durchprobieren würde, wäre er bei insgesamt zehn Zahlen vielleicht nach einer Sekunde fertig. Aber die entsprechende Aufgabe für 100 Zahlen würde bereits 10^{27} Sekunden in Anspruch nehmen – mehrere Milliarden mal das gegenwärtige Alter des Universums. Das Problem ist »schwer« in dem Sinn, dass der Rechenaufwand exponentiell mit der Problemgröße ansteigt (siehe auch den Beitrag auf S. 15).

Wie beim Labyrinthproblem kann ein Memcomputer alle Teilmengen und ihre Summen in einem einzelnen Schritt bestimmen, auf wirklich parallele Weise. Er muss die Informationen nämlich nicht zwischen Speicher und Prozessor (oder mehreren) in einer Abfolge von Einzelschritten hin- und herbewegen. Der Zeitbedarf dieses Einschnittverfahrens wächst daher nicht etwa exponentiell mit der Problemgröße, sondern überhaupt nicht! Allerdings werden in diesem Prozess Schwingungen mit Frequenzen, die den Zahlen entsprechen, überlagert und das resultierende Signal gemessen. Bislang reicht die Genauigkeit dieser Messung noch nicht für große Probleme aus.

Nicht die Daten zur Maschine, sondern umgekehrt

Noch sind die Memcomputer nicht über das Laborstadium hinausgekommen. Gegenwärtig testen wissenschaftliche Einrichtungen und einige Hersteller frühe Versionen auf ihre Haltbarkeit. Es kommt darauf an, ob sie auch in der Daueranwendung mit den üblichen Speicherchips aus Standardbauteilen, die zum Beispiel in USB-Sticks stecken, mithalten können. Da es um Ausfallsicherheit über mehrere Jahre hinweg geht, werden solche Tests viel Zeit in Anspruch nehmen.

Wir glauben, dass gewisse Formen von Memcomputern in der nächsten Zukunft produktionsreif werden. So haben wir 2013 gemeinsam mit Fabio Lorenzo Traversa und Fabrizio Bonani vom Politecnico di Torino (Italien) ein Konzept namens »dynamic computing random-access memory« (DCRAM) vorgestellt. Dieser Speicher soll den konventionellen Arbeitsspeicher ablösen, der das Programm und die Daten kurz vor dem Abruf durch den Prozessor bereithält. Dort ist bisher jedes Bit eines Programms durch eine Ladung repräsentiert, die in einem einzelnen Kondensator abgelegt ist – sehr viele Kondensatoren für ein einziges Programm.

Memkondensatoren an deren Stelle würden ein Programm nicht nur bereithalten, sondern auch gleich ausführen – und man bräuchte viel weniger von ihnen. Zwei Memkondensatoren zusammen können nämlich mit den Ladungen, die in ihnen stecken, jede logische Grundoperation wie UND und ODER durchführen je nachdem, welche Spannung an sie angelegt wird. Um verschiedene Bearbeitungsschritte auszuführen, müssen also die Bits nicht wie bisher zu den entsprechenden »Maschinen« transportiert werden; vielmehr werden die Maschinen umgestellt, und die Bits bleiben, wo sie sind, was den Transportaufwand spart. In der Fachsprache heißt die Fähigkeit eines Bauteils, je nach Ein-

gangssignal verschiedene Operationen auszuführen, Polymorphismus. Über diese Fähigkeit verfügt auch unser Gehirn – wir müssen seine Architektur für die Ausführung unterschiedlicher Aufgaben nicht ändern.

Für die Fertigung von Memcomputern ist kein großer Technologiesprung erforderlich. Aufhalten könnte die Entwicklung jedoch der Bedarf an neuer Software. Wir wissen noch nicht, wie man die neuen Rechner am besten programmiert, und werden es erst am fertigen Gerät ausprobieren können. Wie bei den klassischen Computern werden Hard- und Software nur in stetem Wechselspiel reifen.

Zugleich muss die neue Technologie ihre besten Anwendungen erst noch finden. Und die bestehen wahrscheinlich nicht gerade im Schreiben und Formatieren von Textdokumenten, um auf unser Eingangsbeispiel zurückzukommen. Es gibt also viel zu bauen, dann zu testen, wieder umzubauen und erneut zu testen.

Auf jeden Fall ist es verlockend, darüber nachzudenken, wohin diese Technologie führen könnte. Nach einer ersten Entwicklungs- und Testphase gibt es dann vielleicht schon bald ein handliches Gerät, das sehr komplexe Aufgaben wie Mustererkennung oder die hoch aufgelöste Simulation des Erdklimas bewältigen kann – idealerweise in einem einzigen Rechenschritt ohne nennenswerten Energieverbrauch.

Vielleicht würden die Leute dafür sogar Schlange stehen wie für das neueste Smartphone. ~

DIE AUTOREN



Massimiliano Di Ventra (links) ist Professor am Fachbereich Physik der University of California in San Diego.
Yuriy V. Pershin ist Associate Professor am Fachbereich Physik und Astronomie der University of South Carolina.

QUELLEN

Di Ventra, M., Pershin, Y.V., Chua, L.O.: Putting Memory into Circuit Elements: Memristors, Memcapacitors, and Meminductors. In: Proceedings of the IEEE 97, S. 1371–1372, 2009
Di Ventra, M., Pershin, Y.V.: The Parallel Approach. In: Nature Physics 9, S. 200–202, 2013
Pershin, Y.V., Di Ventra, M.: Experimental Demonstrations of Associative Memory with Memresistive Neural Networks. In: Neural Networks 23, S. 881–886, 2010
Pershin, Y.V., Di Ventra, M.: Solving Mazes with Memristors: A Massively Parallel Approach. In: Physical Review E 84, 046704, 2011
Traversa, F.L. et al.: Dynamic Computing Random Access Memory. In: Nanotechnology 25, 285201, 2014

LITERATURTIPP

Die neue Computer-Ära. Spektrum der Wissenschaft Spezial, Physik, Mathematik, Technik 3/2013
Enthält insbesondere Artikel über die Grenzen der Miniaturisierung und über das Prinzip des Memristors.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1400772

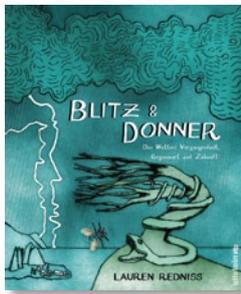
Jetzt als Kombipaket im Abo: App und PDF

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.



**JETZT
ABONNIEREN!**





Lauren Redniss

Blitz & Donner

Das Wetter: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

Aus dem Englischen von Michael Windgassen

Ullstein, Berlin 2015

272 S., € 28,-

METEOROLOGIE

Sonne, Wind und Niederschlag

In einem ungewöhnlichen Sachbuch präsentiert Lauren Redniss das Thema »Wetter« auf sehr kreative Weise.

Wir schauen genauer auf das Wetter, wenn wir etwa einen Grillabend mit Freunden planen oder einen Segeltörn am Wochenende. Dass aber auch unser Konsumverhalten von Umgebungstemperatur und Niederschlägen abhängt, und zwar je nach Wohnort auf unterschiedliche Weise, ist eine der Kuriositäten, die im vorliegenden Buch thematisiert werden. So verzeichnen die Geschäfte in Miami (Florida) den höchsten Umsatz, wenn es regnet, denn bei schönem Wetter bevorzugt die vergleichsweise junge Bevölkerung den Aufenthalt im Freien. In Tampa dage-

gen, das sich im selben Bundesstaat befindet, leben vorwiegend ältere Menschen. Dort bleibt man bei schlechtem Wetter zu Hause und erledigt seine Einkäufe bei Sonnenschein.

Für die Recherche zu ihrem jüngsten Werk war die Grafikerin Lauren Redniss aber nicht nur in ihrer US-amerikanischen Heimat unterwegs. Sie ist an Orte auf der ganzen Welt gereist, an denen extreme Wetterverhältnisse herrschen. Zum Beispiel in die Wüste Atacama, in der jahrelang kein Tropfen Regen fällt. Oder nach Spitzbergen, jener Inselgruppe zwischen Norwegen

und Grönland, wo der Boden so hart gefroren ist, dass Beisetzungen zum Problem werden.

Ein Gesprächspartner, der Bemerkenswertes zum Wetter erzählen kann, ist der US-Amerikaner Steve Mashburn. Ihn traf 1969 ein Blitz, während er an einem Drive-in-Schalter saß. Mashburn hat damals keine bleibenden Schäden davongetragen, dafür aber mit seiner Frau den internationalen Verein für Überlebende von Blitzschäden und Elektroschocks gegründet. Redniss geht in ihrem Buch zumindest ansatzweise auch auf die wissenschaftlichen Hintergründe der Wetterphänomene ein, mit denen sie sich befasst. So erfährt man, dass Mashburns Überleben eher die Regel als die Ausnahme darstellt, da in den Industriestaaten nur etwa zehn Prozent der Blitzschlagopfer an den Folgen der Naturgewalt sterben.

Auch heikle Aspekte im Zusammenhang mit dem Wetter spart die Autorin nicht aus, etwa die meteorologische Kriegsführung der US-Armee im Vietnamkrieg. In einem geheimen Projekt impfte die Air Force damals Wolken im Kriegsgebiet mit Silberiodid an, um Regen herbeizuführen, der den Waffen- und Gütertransport von Nord- nach Südvietnam erschweren sollte.

Die vielen Anekdoten in dem Buch sind schon für sich lesenswert. Das Besondere von »Blitz & Donner« liegt allerdings in seiner künstlerischen Gestaltung, die weit über eine bloße Ver-

Zwei Grafiken aus dem Werk: Eine Blume in der chilenischen Wüste Atacama (links), Polartiere in der Region um Spitzbergen (rechts).



anschaulichung des Texts hinausgeht. Die Illustrationen stellen wesentliche Elemente der einzelnen Kapitel dar; das Thema »Himmel« kommt sogar ganz ohne Text aus. Hier findet man ausschließlich grafische Darstellungen von verschiedenen Wolkenformen, einem Blitzgewitter sowie von Sonnenauf- und -untergängen. Die meisten Bilder entstanden in aufwändigen, nachträglich kolorierten Drucktechniken. Damit hat Redniss sich bewusst für eine Darstellungsform entschieden, die Naturhistoriker seit Jahrhunderten einsetzen, um Pflanzen- oder Tierbeobachtungen ästhetisch zu dokumentieren.

Die Autorin hat nicht nur die Grafiken, sondern sogar die Schrift gestaltet, in der »Blitz & Donner« gesetzt ist. Passend zum Thema ihres Werks nannte sie

Nicht nur die Grafiken gestaltet, sogar eine eigene Schriftart hat die Autorin für ihr Buch entwickelt. Sie nennt sie »Qaneq LR« nach dem Inuktitut-Wort für »fallender Schnee«

den Font »Qaneq LR« nach dem Inuktitut-Wort für »fallender Schnee«. Angesichts dieser kreativen Fülle wundert es nicht, dass Redniss, die auch für die »New York Times« arbeitet, vor einigen Jahren für den Pulitzer-Preis nominiert

war. Mit ihrer Liebe zu künstlerischen Details hat sie eine besondere Art von Sachbuch geschaffen. Es richtet sich an alle, die Lust haben, zu schmökern und

zu staunen. Und das zu einem überraschend günstigen Preis.

Maren Emmerich

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Stuttgart.



Christian J. Meier

Eine kurze Geschichte des Quantencomputers

Wie bizarre Quantenphysik eine neue Technologie erschafft

Heise, Hannover 2015

177 S., € 16,90

TECHNIK

Berichte aus der Zukunft

Ein Physikjournalist erzählt die Entwicklung des Quantencomputers, als gäbe es ihn bereits.

Der Physiker und Journalist Christian J. Meier verspricht eine »Geschichte« des Übercomputers. Haben wir was verpasst? Ist der Quantencomputer schon dabei, die Informations- und Kommunikationstechnik umzukrempeln? Natürlich nicht, und der Autor weiß das selbstverständlich auch. In der Tat ist der Titel seines Buchs unsinnig – schade, denn das Werk selbst lässt sich sehr empfehlen.

Mit der »Atomwaffe des Informationszeitalters«, so Meier, würden schwierigste und bisher als unlösbar geltende komplexe Aufgaben gelöst, riesige Datenmengen verarbeitet und Informationen mit 100-prozentiger Sicherheit übertragen. Doch der Quan-

tencomputer, der so heißt, weil er mit Quantenbits (Qubits) arbeitet, existiert nur in der Theorie, von allerersten Gehversuchen abgesehen. Immerhin wird schon viel Geld ausgegeben: NSA, NASA und Google, sogar Einrichtungen wie die Yale University oder die Universität Innsbruck investieren beträchtliche Summen.

Die attraktive Zukunftsidee hat den Autor in ihren Bann gezogen. Bevor er die Entwicklung in den zurückliegenden 10 bis 15 Jahren unter die Lupe nimmt, weiht Meier seine Leser behutsam in die bizarre Welt der Quantenphänomene ein. Dabei kommt er natürlich auf Schrödingers Katze, Quantenverschränkung und Teleportation

zu sprechen. Laienverständlich erläutert er die Funktionsweise des klassischen Computers und den davon völlig abweichenden Mechanismus eines Quantenrechners, wenn es um das Lösen mathematischer Probleme geht.

Die klassische Maschine arbeitet mit einem Binärkode, unterscheidet zwischen Bits in den Zuständen Ja (1) und Nein (0) und verrechnet diese diskret. Das ist sehr präzise – aber bei großen Datenmengen, bei denen Modelle notwendig werden, führen Fehler im Modell schon bei minimalen Ausgangsdifferenzen zu riesigen Abweichungen. Quantencomputer hingegen verarbeiten mehrere Qubits zugleich, bewältigen dadurch größere Datenmengen und liefern zudem fehlertolerante Ergebnisse. Denn sie halten bereits für einfache Aufgaben verschiedene Lösungen gleichzeitig parat. Bei großen Datenmengen erweist sich das als Vorteil: Die Fehler gleichen sich aus, die Ergebnisse sind bei unterschiedlichen Modellansätzen robuster.

Heute gibt es auf dem Gebiet des Quantencomputing rasche theoretische, aber nur winzige praktische Fortschritte. Die Ansätze sind zudem sehr verschieden. Mal dient als Qubit der Spin eines Atomkerns, mal eine angelegte Elektronenhülle und mal die Polarisierung eines Photons. Technische Durchbrüche scheitern vor allem daran, die Kohärenzzeit der Qubits (die Zeit, in

der ihr Quantenzustand noch nicht zusammengeboren ist) genügend lange aufrechtzuerhalten. Das Problem tritt besonders stark hervor, wenn man Lösungsstrategien von einfachen Rechenaufgaben auf kompliziertere übertragen («skalieren») möchte. Denn hierfür benötigt man ein größeres Ensemble von Qubits, und das führt zu viel mehr Möglichkeiten, Informationen mit der Systemumgebung auszutauschen und den Quantenzustand zusammenbrechen zu lassen. Manche Wissenschaftler glauben, diese Barrieren seien grundsätzlicher Art und Quantencomputer blieben auf ewig Theorie.

Doch deren Vorzüge erscheinen so faszinierend, dass sie zu kühnen Ideen

und Überlegungen verleiten. Beispielsweise könnten sie helfen, Rätsel der »klassischen Biologie« mit Hilfe der Quantenphysik zu erklären. Der Orientierungssinn bei Vögeln oder der Geruchssinn mit seiner unglaublichen Unterscheidungsfähigkeit, ja selbst das menschliche Gehirn würden derart schnell und fehlertolerant funktionieren, dass hier sicherlich Quanteneffekte am Werk seien, schreibt der Autor. Sogar das Erbmolekül DNA sei eine Art Quantencomputer.

Fast philosophisch gipfelt das Buch in einer Hypothese, die auch einige Physiker vertreten: Das Universum selbst sei ein gigantischer Quantencomputer, der seit fast 14 Milliarden

Jahren rechnet! Und die Suche nach der »Weltformel«, die Quantenphysik und allgemeine Relativitätstheorie zusammenführt, könne nur mit einem neuen Verständnis von »Information« mit Hilfe von Quantencomputern gelingen.

Wer naturwissenschaftlich gebildet, vielseitig interessiert ist und dazu ein Faible für Sciencefiction mitbringt, wird das Buch mit Vergnügen verschlingen. Dann wird er unter anderem erfahren, dass der ultimative Laptop mit Schwarzen Löchern arbeitet.

Reinhard Löser

Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als Journalist in Berlin.



Harald Meller, Michael Schefzik (Hg.),

Peter Ettl

Krieg

Eine archäologische Spurensuche

Theiss, Stuttgart 2015

488 S., € 39,95

ARCHÄOLOGIE

Von Steinzeitkämpfern und Söldnern

Krieg ist in der Menschheitsgeschichte ein relativ neues Phänomen. Archäologen spüren seinen Ursprüngen nach.

Erstmals zeigt das Landesmuseum für Vorgeschichte in Halle eine große archäologische Ausstellung zum Phänomen Krieg (bis 22. Mai 2016). Das Thema erlebt seit rund zehn Jahren einen Aufschwung in der deutschen Archäologie. Vor allem die Untersuchung von Massengräbern und Schlachtfeldern, sowohl des Dreißigjährigen Kriegs als auch der Bronzezeit, haben seit 2006 diese Entwicklung vorangetrieben.

Im Mittelpunkt der Ausstellung und des vorliegenden Begleitbands steht das Schlachtfeld von Lützen. Dort tra-

fen 1632 drei wichtige Akteure des Dreißigjährigen Kriegs mit ihren Truppen aufeinander: Schwedenkönig Gustav II. Adolph (* 1594) wurde im Getümmel erschossen, General Gottfried Heinrich Graf zu Pappenheim (* 1594) erlag bald nach der Schlacht seinen Verletzungen, nur Kriegsunternehmer Wallenstein (1583–1634) blieb unversehr. Von rund 40 000 Kämpfern fielen damals mehr als 6000.

Seit 2006 haben Wissenschaftler große Teile des Kampfplatzes mit Metalldetektoren abgesucht und Grabungen

durchgeführt. Dabei kamen auf 111 Hektar mehr als 11 000 Einzelobjekte zu Tage, davon rund 3000 Bleikugeln. Inzwischen sei das Schlachtfeld von Lützen das weltweit größte, das systematisch archäologisch untersucht wurde, schreiben die Ausstellungsorganisatoren.

Die Auswertung der Befunde offenbarte im Detail erhebliche Abweichungen zum historisch überlieferten Schlachtverlauf. So fanden sich keinerlei Hinweise auf ein Grabensystem, das Wallenstein Kupferstichen zufolge ausheben ließ. 2011 stießen die Archäologen zudem auf ein Massengrab, das mit Erdreich und menschlichen Überresten en bloc ins Landesmuseum nach Halle verbracht wurde. Dort legten Spezialisten 47 Skelette frei. Die Untersuchung der sterblichen Überreste zeigte unter anderem, wie aussehend das Leben der damaligen Krieger war. Karies, Rachitis, Parasitenbefall und mannigfaltige Entzündungen im Kopfbereich waren häufig – ebenso wie Spuren früherer Verletzungen, die wohl durch Gewalteinwirkung entstanden waren.

Ausgehend von den Untersuchungen in Lützen konzentrieren sich die Autoren auf die Ursprünge des Kriegs. Schon früheste Schriftquellen dokumentieren Kriege in weit entwickelter Form. Der Beginn solcher Gewaltkonflikte ist somit in vorgeschichtlichen

Zeiten zu suchen. Daher obliege es vor allem Archäologen, handfeste Indizien zu finden, mit denen sich dieser Entstehungsprozess nachvollziehen lässt, so die Herausgeber.

Zwar gibt es bereits aus der Altsteinzeit Relikte, die auf zwischenmenschliche Gewalt hindeuten. Doch eindeutige Hinweise auf Krieg finden sich erst in der Jungsteinzeit, als die Menschen Ackerbauern und Viehzüchter geworden waren. Vermutlich habe die neue Lebensweise mit starkem Bevölkerungswachstum, Sesshaftigkeit, Vorratshaltung, Besitzanhäufung und Sozialhierarchie zu organisierter Massengewalt geführt, schreibt Harald Meller, Landesarchäologe von Sachsen-Anhalt.

Darauf deuten in Mitteleuropa mehrere jungsteinzeitliche Massengräber mit den Überresten zahlreicher brutal getöteter Menschen hin.

Bei Ackerbau treibenden, nichtindustrialisierten Ethnien kommen Kriege häufig vor – nicht aber bei Wildbeutern

Nichtarchäologische Indizien sprechen ebenfalls für eine vergleichsweise späte Genese des Kriegs. So legt der Ethnologe Jürg Helbling dar, dass Kriege bei Ackerbau treibenden, nichtindustrialisierten Ethnien häufig vorkommen – nicht aber bei Wildbeutern. Der Band stellt noch weitere nichtarchäologische Befunde zum Thema vor.

»Krieg« ist opulent bebildert, vermittelt einen profunden Überblick und präsentiert wichtige, neue Erkenntnisse. Nicht Militärgeschichte, sondern

Kriegsschicksale und Ursachenforschung stehen dabei im Fokus. Obwohl sich das Werk auf das Schlachtfeld von Lützen und die Frühzeit des Kriegs konzentriert, ist es voll zu empfehlen.

Thomas Brock

Der Rezensent ist Archäologe, Autor und Museumspädagoge in Hamburg.



Ehrhard Behrends

Der mathematische Zauberstab

Verblüffende Tricks mit Karten und Zahlen

Rowohlt, Reinbek 2015

270 S., € 9,99

MATHEMATIK

Zaubern einmal anders

Nicht nur dank Fingerfertigkeit, auch mit mathematischem Fachwissen kann man als Magier glänzen.

Ehrhard Behrends, Professor für Mathematik und Informatik an der Freien Universität Berlin und produktiver Buchautor, möchte sein Fach populärer machen. In seinem neuen Werk präsentiert er mehr als 30 Zaubertricks, die auf Mathematik beruhen. Die Kniffe sind meist rasch zu erlernen, nichtsdestoweniger aber beeindruckend.

Eines der Kunststücke besteht darin, ein Kartenspiel verdeckt auf den Tisch zu legen, von einem Zuschauer scheinbar durcheinanderbringen zu lassen und dann auf Anhieb immer wieder zwei Karten mit verschiedenen Farben aufzudecken. Wie ist das möglich? Der

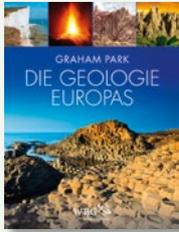
Trick gelingt, indem man das Kartenspiel zuvor nach gewissen Kriterien ordnet (abwechselnd Rot und Schwarz) und sich klar macht, welche Informationen bei bestimmten Mischvorgängen erhalten bleiben.

Es gibt eine ganze Reihe von Kartentricks, die auf solchen Analysen beruhen. Andere Zauberkniffe in dem Buch gründen auf Eigenschaften von Zahlen, auf der Kodierung von Information oder auf Wahrscheinlichkeitsrechnung.

Die von Behrends vorgestellten Kunststücke anzuwenden, garantiert Spaß und Unterhaltung. Als Leser fühlt man sich stets motiviert, einen Trick

nicht nur »nach Rezept« durchzuführen (was meist möglich ist), sondern auch seine Grundlagen zu verstehen. Allerdings ist das mathematisch durchaus anspruchsvoll und gelingt wohl nicht immer ohne fachliche Vorkenntnisse. In den leichten Fällen basieren die Tricks auf einfachen algebraischen Überlegungen, Teilbarkeitseigenschaften oder dem Rechnen mit Resten. In den schwierigeren muss man sich etwa an das Prinzip der vollständigen Induktion oder an die Wahrscheinlichkeitsrechnung herantasten. Behrends' Erklärungen dazu sind zwar immer präzise, aber recht knapp gehalten.

Eines der einfacheren Beispiele ist der 1001-Trick. Ein Zuschauer schlägt eine beliebige dreistellige Zahl vor, zum Beispiel 123. Der Zauberer schreibt die gleiche Zahl noch einmal daneben, so dass sich ein sechstelliger Betrag ergibt, hier 123123. Sodann verspricht er, die Zahl durch sieben zu teilen und den dabei entstehenden Rest in Euro an den Zuschauer auszubezahlen. Erstaunlicherweise ergibt sich immer Rest null, egal, welche Zahl vom Publikum genannt wurde (hier $123123 : 7 = 17589$). Die Erklärung ist einfach. Jede der möglichen sechststelligen Zahlen bei diesem Verfahren ist das 1001-Fache der ursprünglichen dreistelligen Zahl ($123123 = 1001 \cdot 123$). Und da 1001 durch



Graham Park

Die Geologie Europas

Aus dem Englischen von Heiner Flick. WBG, Darmstadt 2015. 200 S., € 49,95

Europa ist geologisch enorm vielfältig. Auf dem Kontinent finden sich stabile, Milliarden Jahre alte Gesteinseinheiten ebenso wie junge Gebirge, die sich »erst« vor 65 Millionen Jahren zu formen begannen. Der Geowissenschaftler Graham Park zeichnet anhand solcher Befunde die Entwicklung Europas nach. Nach einer allgemeinen Einführung in das Fach schildert er in acht Kapiteln chronologisch sortiert, wie sich der Erdteil einst bildete und bis heute weiterentwickelte. Parks Erklärungen sind gut nachvollziehbar; übersichtliche Abbildungen und ein Glossar ergänzen den Text sinnvoll. Als anschauliches Lehrbuch richtet sich das Werk wohl vor allem an Studenten der Geowissenschaften, dürfte aber auch für geologische Laien verständlich und interessant sein.

TIM HAARMANN



John Brockman (Hg.)

Welche wissenschaftliche Idee ist reif für den Ruhestand?

Die führenden Köpfe unserer Zeit über die Ideen, die uns am Fortschritt hindern

Aus dem Englischen von Jürgen Schröder. Fischer, Frankfurt a. M. 2016. 637 S., € 13,99

Das Alte muss dem Neuen Platz machen. Dies ist in der Wissenschaft nicht anders, in der überkommene Thesen und Theorien begraben werden, damit das Neue fortschreiten kann – so drückt es der Herausgeber drastisch, aber korrekt im Vorwort aus. John Brockman hat 175 führende Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen gefragt, welche Ideen sie ausrangieren würden. Heraus kamen 175 kleine Aufsätze, die erklären, warum dieses oder jenes Konzept zu den Akten gehört. Viele der behandelten Ideen stammen von der vordersten Front der Grundlagenforschung und dürften Nichtfachleuten kaum bekannt sein. Leider hat sich das Gros der Autoren keine große Mühe gegeben, für jeden verständlich zu schreiben. Daher werden allgemein interessierte Leser nur wenig Freude an dem Werk haben.

MARKUS NEUROHR



Dieter Braun

Die Welt der wilden Tiere im Norden

Knesebeck, München 2015. 144 S., € 29,95

Mehr als 100 Jahre nach den kunstvollen Zeichnungen des Zoologen Ernst Haeckel (1834–1919) stellt Dieter Braun die Tiere des Nordens mit Hilfe des Computers dar. Der Kinderbuchautor und freiberufliche Illustrator porträtiert in seinem Bildband 80 Arten aus Nordamerika, Europa und Asien auf je ein bis zwei Seiten – vom Eisbär über den Weißstorch bis zum Großen Tümmler. Etwa jede dritte Spezies davon gilt als bedroht. Die kolorierten Vektorgrafiken zeigen vereinfachte Tierabbildungen, die dennoch detailliert, plastisch und gekonnt wirken. Wissenschaftliche und deutsche Artnamen sowie kurze, unterhaltsame Texte über Lebensraum, Nahrung, Verhalten oder Körperbau ergänzen die Darstellungen. Kleinen und großen Tierfreunden dürfte das Werk Vergnügen bereiten, ebenso Design- und Kunstinteressierten. Das Vorgängerbuch »Die Welt der wilden Tiere im Süden« erschien 2014 und wurde im darauf folgenden Jahr von der Stiftung Buchkunst ausgezeichnet.

EVA DIEHL



Ian Mortimer

Zeiten der Erkenntnis – Wie uns die großen historischen Veränderungen bis heute prägen

Aus dem Englischen von Karin Schuler. Piper, München 2015. 432 S., € 25,-

Der englische Historiker Ian Mortimer ist bekannt dafür, Geschichte originell zu erzählen. In »Zeiten der Erkenntnis« wählt er einen interessanten Ansatz: Er lässt die Jahrhunderte des vergangenen Millenniums miteinander in Wettbewerb treten. Dabei beschreibt er zivilisatorische Errungenschaften mit großem Einfluss auf die Lebenswelt der Zeitgenossen und ihrer Nachfolger. Mortimer nennt etwa die Scholastik, die im 13. Jahrhundert mit ihrem vernunftbezogenen Denken der Wissenschaft den Weg ebnete; den bargeldlosen Zahlungsverkehr, der im 14. Jahrhundert erfunden wurde und dem globalen Handel auf die Sprünge half; oder die Erfindung des Buchdrucks, die eine nachhaltige Medienrevolution in Gang setzte. Welches Jahrhundert am Ende als Sieger hervorgeht, bleibt dem Urteil des Lesers überlassen. Mortimers Streifzug durch das zurückliegende Jahrtausend ist jedenfalls ein Musterbeispiel dafür, wie man Geschichte fesselnd vermitteln kann.

THEODOR KISSEL

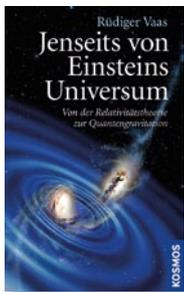
7 teilbar ist, ist es auch das Produkt von 1001 und einem beliebigen dreistelligen Betrag.

Immer nachdem Behrends einen Trick vorgestellt und dessen mathematischen Hintergrund erläutert hat, gibt er Hinweise zur Vorbereitung, Durchführung und Präsentation. Oft schildert der Autor zudem Varianten und macht seine Leser auf zusätzliches Material

aufmerksam. Da er sein Buch klar nach mathematischen Teilbereichen gliedert, kann man die Lektüre nach persönlichen Interessen oder mathematischem Können gestalten.

Das Buch stellt Zauberkunststücke, die auf spannender Mathematik beruhen, wunderbar zusammen. Wer solche Tricks gern vorführt und die mathematische Herausforderung mag, dem

ist das Werk zu empfehlen. Weil der Autor auf Weiterentwicklungen und Abwandlungen eingeht, kommen auch fortgeschrittene Trickkünstler auf ihre Kosten.



Rüdiger Vaas
Jenseits von Einsteins Universum
Von der Relativitätstheorie
zur Quantengravitation
Kosmos, Stuttgart 2015
464 S., € 24,99

THEORETISCHE PHYSIK

Die Welt nach Einstein

Einsteins Relativitätstheorie hat in 100 Jahren alle Tests bestanden. Trotzdem kann sie nicht der Weisheit letzter Schluss sein.

Wissenschaftspublizisten in aller Welt haben das 100-jährige Jubiläum von Albert Einsteins größtem Geniestreich ausgiebig gefeiert: 1915 publizierte der Theoretiker seine Gravitationstheorie, welche die Schwerkraft als geometrische Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit beschreibt. Seither rätseln Physiker, wie diese Theorie sich mit der Quantenmechanik vereinen lässt, die alle anderen Naturkräfte darzustellen hilft.

Dem Thema widmet Rüdiger Vaas, vielseitig beschlagener Wissenschaftsjournalist, Redakteur und Buchautor, nun ein weiteres Werk. Besteht es die Konkurrenz zu den zahlreichen populären Darstellungen zeitgenössischer Physik, die es bereits gibt? Fügt es ihnen etwas Neues hinzu?

Tatsächlich wird auch jemand, dem das Thema vertraut ist, das Buch mit Genuss und Gewinn lesen. Genuss bereiten die vielen Details und Anekd-

ten, mit denen Vaas seine Schilderung des einsteinschen Denkens anreichert. Gewinn bedeuten die zahlreichen Stellen, an denen der Autor ein Stück weit in die Tiefe geht. Er scheut sich nicht, mathematische Formeln anzuführen, erklärt aber stets ihre Bedeutung. Das ist wichtig, denn nur so begreift der Leser, dass die Sprache, in der Physiker ihre Theorien formulieren, die Mathematik ist. Die Umgangssprache kann nur als mehr oder weniger passende Krücke dienen, um die Theorie zu veranschaulichen.

Ausführlich und spannend schildert Vaas den mühsamen Weg zur mathematischen Formulierung der allgemeinen Relativitätstheorie. Er bringt das Kunststück fertig, anschaulich zu machen, warum Einstein zunächst in eine theoretische Sackgasse geriet (Stichwort »Lochbetrachtung«) und wie er wenig später wieder aus dieser herausfand. Obendrein verrät der Autor, dass

sich Wissenschaftshistoriker über manche Details des ganzen Vorgangs noch heute streiten.

Einstein kommt auch als Erkenntnistheoretiker zu Wort, vor allem im Zuge der Auseinandersetzung mit zeitgenössischen Quantenphysikern, die immer noch nachhallt, sowie bei seinem zum Scheitern verurteilten Versuch, eine einheitliche Feldtheorie aller damals bekannten Naturkräfte aufzustellen. Davon ausgehend leitet Vaas zu heutigen Versuchen über, Gravitation und Quantenmechanik zu einer »Theorie von Allem« zu vereinen, die alle grundlegenden Wechselwirkungen zu beschreiben vermag. Dieser Ausblick auf den Stand der Entwicklung und mögliche Fortschritte ist von größtmöglicher Aktualität. Man merkt, dass der Autor die einschlägigen Forschermeeetings eifrig besucht.

Michael Springer

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

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen



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

1916

Muskelantrieb für Prothesen

»Eine wertvolle Anregung zum natürlichen Gebrauch künstlicher Glieder hat Professor A. Stodola, ein Züri-

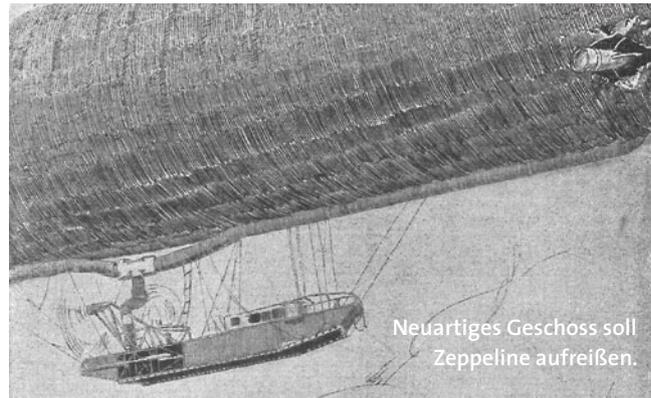
cher Techniker, gegeben. Von der Tatsache ausgehend, daß die zur Bewegung der Hand dienenden Muskeln hauptsächlich dem Unterarme angehören und damit auch nach Verlust der Hand erhalten bleiben, macht er den Vorschlag, diese Muskeln als ›lebendes Maschinenelement‹ für die künstliche Hand zu verwerten.« Kosmos 4, 1916, S. 146

Zeppelinabwehr

»Die rasch gewachsene Möglichkeit der Zeppelinangriffe hat schon vor Ausbruch des Krieges zur Konstruktion von Spezial-Abwehrgeschossen geführt, die teils mit Brandwirkung arbeiten, teils sich darauf beschränken, durch Rauch- oder Feuerschwänze, die die Flugbahn bezeichnen, das Einschießen auf das Ziel erleichtern. Das neue Luftschiff-Abwehrgeschoss der Entente bildet eine eigene Gruppe, da es das Luftschiff nicht nur in Brand setzen, sondern zugleich die Hülle soweit aufreißen soll, daß das Fahrzeug unter allen Umständen niedergehen muß.« Technische Monatshefte 4, 1916, S. 119–120

Das chloroformierte Rhinoceros

»Vor einigen Jahren mußte an einem Rhinoceros des Newyorker Tiergartens eine Staroperation vollzogen und das Ungeheuer zu diesem Zwecke betäubt werden. Nicht weniger als 900 g Chloroform und 200 g Äther waren nötig, um dieses Ziel zu erreichen. Bevor das Mittel seine volle Wirkung ausübte, wurden die Ausdünstungen des Nashorns so stark, daß die zahlreichen anwesenden Ärzte, Photographen, Journalisten und Wärter fast in Ohnmacht fielen. Als das Tier nach gelungener Operation erwachte, begann es gewaltig zu grunzen, schien sich aber recht wohl zu fühlen.« Kosmos 4, 1916, S. 137



Neuartiges Geschoss soll Zeppeline aufreißen.

Aufschlussreiche Buchdeckel

»Die Dendrologie benutzt die von Jahr zu Jahr verschieden breiten Jahresringe, um Hölzer zu datieren. Bisher fand diese Methode nur in der Archäologie und der Baugeschichte Anwen-

dung. Sie ist aber nicht darauf beschränkt, auch Buchdeckel sind auf diese Weise datierbar. Dabei muß aber beachtet werden, daß von den Schreibern z. B. der weiche Splint (die jüngsten Jahr-

ringe) entfernt wurde. Die Ergebnisse bestätigen die stilkritischen Datierungen. Eine Handschrift wird z. B. auf 1025 datiert, die Dendrologie ergibt für den Einband 1011 + ca. 20. Mit Hilfe dieser

1966

Methode lassen sich Frühdatierungen ausschließen.« Die Umschau 8, 1966, S. 266

Gedächtnisinjektionen

»Sie dressierten Ratten, sich nach Aufforderung durch ein Klick- oder Lichtsignal einem Futterautomaten zu nähern. Nach 900 Versuchen pro Individuum beherrschten die Ratten ihre Aufgabe fehlerfrei. Zur Gewinnung der nun konditionierten RNS wurden die Ratten getötet und der mittlere Teil ihres Gehirns einem Extraktionsverfahren unterworfen. Rund 8 Stunden später erhielten untrainierte Ratten eine intraperitoneale Injektion des Extraktes. Die gespritzten Versuchstiere hatten eine signifikant stärkere Tendenz, sich dem Futterautomaten zu nähern als die Kontrollen. Dies deutet darauf hin, daß mit den Gehirnextrakten Informationen injiziert wurden, die durch die Dressur im Zentralnervensystem des Spenders akkumuliert worden waren.« Naturwissenschaftliche Rundschau 4, 1966, S. 157

Luna 9 gelandet

»Erst zu Beginn dieses Jahres führten Bemühungen um eine ›weiche‹ Landung auf dem Mond zum Ziel. ›Luna 9‹ wurde am 31. Januar gestartet. Nach dreieinhalbtägigem Flug und Richt- und Bremsmanövern in der Schlußphase ging das Gerät am 3. Februar im westlichen Teil des ›Oceanus Procellarum‹ nieder. Insgesamt wurden sieben Funkübertragungen von 8^h 5^m Gesamtdauer durchgeführt. Außer der Gewinnung von Bildern des Landegebietes hat ›Luna 9‹ Strahlungsmessungen sowohl im interplanetaren Raum wie auch auf der Mondoberfläche vorgenommen. Das wichtigste Ergebnis von ›Luna 9‹ ist die weiche Landung an sich. Als zweites Faktum ist nun erwiesen, daß der Mondboden einen schweren Apparat zu tragen vermag und daß er nicht von einer tiefen Staubschicht bedeckt ist.« Die Umschau 7, 1966, S. 210–212

Mutiger Beginn

Neun europäische Experten warnen vor der automatisierten Gesellschaft («Digitale Demokratie statt Datendiktatur» und »Eine Strategie für das digitale Zeitalter«, Januar 2016, S. 50 und S. 59).

Wolfgang Wittwer, Stade: Ich bin begeistert, dass »Spektrum der Wissenschaft«, das ich übrigens seit der ersten Ausgabe beziehe, sich hier eindeutig exponiert. Die häufig propagierte Sage, dass Wissenschaft per se mit Politik nicht zu tun habe oder nichts zu tun haben solle, wird ja seit Beginn (einigermaßen) rationalen Denkens tagtäglich widerlegt.

Immer wieder werden Gründe gesucht (und konstruiert), bürgerliche Freiheiten zu begrenzen und aufzuheben. Insbesondere die Digitalisierung unseres Lebens ist dabei, unsere gerade erst erworbenen Rechte unter dem Vorwand paternalistischer Fürsorge wieder zunichtezumachen. Die Sciencefiction der 1950er und 1960er Jahre war hier klarsichtiger als viele unserer heutigen Wissenschaftler. Danke für diesen mutigen Beginn!



Die Grenzen physikalisch-mathematischer Theorien

Der Physiker Michael Springer ging der Frage nach, ob die in der Quantenmechanik beschriebenen Objekte real sind («Die Wirklichkeit der Natur», Februar 2016, S. 50).

Albrecht Kellner, Kirchseelte: Ein zentrales Problem für die Interpretation nicht nur der Quantenphysik ist meines Erachtens die Unterstellung, dass physikalische Modelle eine über die Vorhersage beobachtbarer Ereignisse hinausgehende Entsprechung in der »Realität« haben. Insbesondere werden mathema-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Kordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.de

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

Redaktionsassistent: 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. Ingrid Horn, Andrea Jungbauer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Andreas Nestke, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

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 Nationale Institut für Wissenschaftskommunikation 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: DE52600100700022706708, 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 unangeforderte 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 Inchcoombe, Executive Vice President: Michael Florek



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



tischen Größen, die für die Vorausberechnung der Ereignisse als geeignet befunden wurden, schon als Existenzbeweis von Größen in der Natur angesehen, die diese Ereignisse bewirken.

So wurde eine mathematische Funktion, die Massen, Abstände und eine Konstante verknüpft, mehrere hundert Jahre zumindest implizit als Existenzbeweis eines so genannten Gravitationsfelds angesehen – zu Unrecht, wie wir seit Einstein wissen. Müsste man sich nun nicht auch davor hüten, dem offenbar besser geeigneten metrischen Tensor des gekrümmten vierdimensionalen Raums eine »realere« Bedeutung zuzusprechen als nur die eines mathematischen Konstrukts im Rahmen eines Verfahrens, physikalische Ereignisse vorherzusagen?

Gibt es wirklich stichhaltige Gründe dafür, dass den mathematischen Konstrukten dieser Methoden mit Sicherheit eine real existierende physikalische Größe der Natur entspricht? Die Treffsicherheit der Vorhersagen mag zu dieser Unterstellung verführen, aber das oben genannte Beispiel zeigt, dass es sich dabei nach wie vor um eine Unterstellung handelt.

Mit der Wellenfunktion und geeigneten mathematischen Operationen auf dieser Funktion fand man eine Methode, die probabilistische Antwort quantenphysikalischer Teilchen auf Messprozesse korrekt vorherzusagen. Dass dies eine tatsächliche Vieldeutigkeit der realen Welt vor der Messung impliziert, ist ebenfalls eine Unterstellung. Erst diese und andere Unterstellungen führten zu Fragen hinsichtlich einer »physikalischen« Bedeutung des Kollapses der Wellenfunktionen und zu Ideen wie der einer Vielwelteninterpretation.

Vielleicht sollte sich die Physik auf ihre Fähigkeit zurückziehen, anhand geeigneter Modelle Vorhersagen machen zu können, ohne nach physikalischen Entsprechungen für die dazu benötigten mathematischen Konstrukte zu suchen. Das Leben der Physiker wäre sicher einfacher, wenn auch bescheidener im Hinblick auf den Anspruch, alles erklären zu können.

André Wagner, Leipzig: Die »Zwei-Welten-Theorie« von Bohr kommt dadurch zu Stande, dass es Menschen sind, die Physik betreiben, und dass in der Welt, die wir erleben, in der wir wahrnehmen und handeln und Wissenschaft betreiben (zu der also auch die Versuchsaufbauten und Messapparate gehören), sich die Objekte nicht wie »Quantenobjekte« verhalten. Die Phänomene, um die es hier geht, können wir überhaupt erst untersuchen, indem wir bestimmte Versuchsaufbauten realisieren. Und für diese Aufbauten sieht Bohr die »Notwendigkeit klassischer Begriffsbildungen«, wie es richtig in einem Lexikoneintrag auf »Spektrum.de« zur Kopenhagener Interpretation steht.

Weiterhin heißt es dort: »Dies bedeutet erstens, dass der Rolle des Beobachters in der Quantenmechanik eine herausgehobene Bedeutung zukommt. Das liegt daran, dass im Rahmen der Kopenhagener Deutung die Wechselwirkung zwischen Objekt und Apparat weder ignoriert oder zum Verschwinden gebracht noch explizit untersucht werden kann. In diesem Sinn gibt es keine Unabhängigkeit des untersuchten Objekts vom Beobachter.«

Der Artikel stellt hingegen verzerrt dar, wie die Abhängigkeit vom Beobachter zu verstehen ist. Bohr steht der Transzendentalphilosophie Immanuel Kants nahe. Er reflektiert auf die Möglichkeitsbedingungen unseres physikalischen Wissens.

Karl Penzkofer, Steinach: Als studierter Physiklehrer ist mir viel wohler dabei, die Natur Natur sein zu lassen und die Theorien der Physik als – sehr erfolgreiche – Versuche zu verstehen, die Antworten der Natur (= Wirklichkeit) auf Fragen (= Experimente) zu deuten, also keinesfalls die Theorie mit der Wirklichkeit gleichzusetzen.

Was ist schon Wahrheit?

»Die Wahrheit über Schwarze Löcher«, Titel, Februar 2016

Horst Zuse, Berlin: Der Begriff Wahrheit sollte nicht überstrapaziert werden,

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

denn Wissenschaft ist aus meiner Sicht die Suche nach der Wahrheit. Dabei sollten wir bleiben, denn schon in einigen Jahren kann es neue Erkenntnisse über Schwarze Löcher geben. Ist das dann wieder die Wahrheit?

Erratum

»Die schnellsten Bewegungen von Lebewesen«, Februar 2016, S. 20

In der Tabelle auf S. 24, rechte Spalte (Beschleunigungsangaben) ist leider ein Druckfehler aufgetreten: Die jeweils rechts neben der 10 stehende Ziffer ist ein Exponent und muss hochgestellt werden. Die korrekten Angaben lauten 10^7 , 10^6 , 10^5 , 10^3 , 10^2 und 10. Wir entschuldigen uns für das Versehen.

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.leserbrieft@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.

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbrieft

DER GEIST IN DER MASCHINE

VON AARON MOSKALIK

» Hallo, mein Name ist Erich. Zur Qualitätssicherung wird dieses Beratungsgespräch aufgezeichnet. Was kann ich für Sie tun?«

»Meine Monatsrente ist längst überfällig.«

»Das tut mir leid, Herr, ähm, Williamson. Ich rufe Ihre Akte auf. Einen Augenblick bitte. Aha, ich sehe das Problem. Sie haben es verabsäumt, Ihren Vitalitätsstatus nachzuweisen. Haben Sie keine Mahnung erhalten?«

»Vitalitätsstatus?«

»Ja. Wir müssen überprüfen, ob Sie tatsächlich am Leben sind.«

»Ich spreche doch mit Ihnen, oder etwa nicht?«

»Leider besteht die Möglichkeit, dass Sie so wie ich ein Avatar sind, der stellvertretend für eine reale Person agiert und nach deren Ableben nicht gelöscht wurde. In einigen Fällen haben dahingehende Bürger jahrelang weiter Rente bezogen, zahlten Rechnungen, versandten E-Mails ... Alles wurde von den automatischen Stellvertretern nahtlos fortgesetzt. Voraussetzung einer Rentenauszahlung ist aber die Existenz der Primärperson.«

»Haben Sie mir eben unterstellt, eine Maschine zu sein? Ich möchte sofort mit einem echten Menschen sprechen.«

»Das ist leider nicht möglich.«

»Unverschämtheit, es ist zwei Uhr nachmittags, und Sie ... Sie simulierter

Berater erklären mir, dass um diese Zeit keiner arbeitet? Ich verlange, Ihren Vorgesetzten zu sprechen.«

»Gewiss, mein Herr. Ich verbinde ...«

»Hallo, Herr Williamson. Hier spricht Anne. Wie ich höre, brauchen Sie Hilfe bei der Feststellung Ihres Vitalitätsstatus.«

»Ich lebe, verdammt noch mal!«

»Natürlich. Ich verstehe Ihre Entrüstung, doch bitte haben Sie Verständnis für unsere Situation. Ich bin sicher, wir finden auch diesmal eine Lösung.«

»Also gut. Von mir aus. Was soll ich tun?«

»Am besten, Sie gewähren uns Zugang zu Ihrem Gesundheitsmonitor. Wir akzeptieren Daten von allen möglichen Geräten: FitnessTrack, Rank&Schlank, HilfMirAuf, StolperStopper, ZappelWeiter ...«

»So etwas hab ich gar nicht. Halte nichts davon. Jeder kann sich reinhacken, sieht die Daten und weiß, was man treibt. Totalverlust der Privatsphäre ... Heißt das, ich kann meine wohlverdiente Rente nur bekommen, wenn ich mich vor euch Spannern total entblöße?«

»Bitte beruhigen Sie sich, Herr Williamson. Ich verstehe Ihre Bedenken ...«

»Sagen Sie mir nicht, ich soll mich beruhigen. Sagen Sie mir lieber, warum Sie brave Steuerzahler mit sinnlosen Fragen belästigen. Wenn ich sterbe,

werden Sie das ja wohl verdammt schnell wissen ...«

»Wie Erich Ihnen schon erklärt hat, ist das nicht unbedingt der Fall. Aber ich mache Ihnen einen Vorschlag: Ich sende Ihnen eine Liste von örtlichen Vertretern unserer Versicherung, die persönlich bei Ihnen vorbeischauchen, um eine Verifikation vorzunehmen.«

»Lächerlich! Aber von mir aus. Kann's kaum erwarten.«

»Ganz unsererseits, Herr Williamson. Guten Tag.«

»Was war denn los, Harold?«

»Belauschst du mich schon wieder, Maggie?«

»Das war nicht nötig, du hast ja laut genug in den Hörer gebrüllt. Warum schaffst du dir nicht endlich einen Monitor an, wie sie es seit Jahren fordern?«

»Was heißt hier: seit Jahren?«

»Ach Harold! Lass doch endlich dein Gedächtnis überprüfen. Ein Monitor wäre wirklich gut für dich.«

»Mit meinem Gedächtnis ist noch alles in Ordnung. Du lässt sie an deinen Monitor?«

»Warum nicht? Oh, ich hab vergessen, dass sie dann alles wissen, was wir tun. Uuuuh, wie gruselig. Neueste Nachricht: Wir tun gar nichts!«

»Also, ich will trotzdem keinen solchen Monitor.«

»Ich weiß, mein Lieber. Ich verrate dir ein Geheimnis: In Wirklichkeit habe ich auch keinen! Schau nicht so überrascht, merk' es dir diesmal einfach. Und lade dir auch den Gesundheitsdatensimulator herunter. Das ist eine kostenlose App. Aktivier sie, und deine Rente kommt pünktlich wie ein Uhrwerk.«

»Aber das ist ... Betrug.«

»Ach Harold, alles ist Betrug, alles simuliert! Schön, wie du willst. In zehn Minuten gibt's Abendessen.«

»Hallo, spreche ich mit Herrn Schlicker? Die Rentenkasse gab mir Ihren Namen ...«

»Herr Williamson! Schön, wieder von Ihnen zu hören.«

»Entschuldigen Sie, kennen wir uns denn?«

»Was soll ich sagen, wir telefonieren jeden Monat miteinander.«

»Sie kommen jeden Monat bei mir vorbei und kontrollieren, ob ich lebe?«

»Das ist nicht nötig, das kann ich von hier aus.«

»Das heißt, Sie verifizieren nicht wirklich, ob ich lebe?«

»Herr Williamson ... Sitzen Sie bequem?«

»J-ja.«

»Nein, das tun Sie nicht. Sie können nicht sitzen, weil Sie nämlich nicht real

sind. Niemand ist das, ich auch nicht. Biologische Menschen gibt es seit hundert Jahren nicht mehr.«

»Was reden Sie da für einen ausgemachten Blödsinn!«

»Sie glauben mir nicht? Ich beweise es Ihnen. Einen kleinen Moment, ich muss nur die Parameter justieren.«

»Herrje! Ich spüre meinen Körper nicht mehr!«

»Natürlich nicht, Sie haben ja auch keinen Körper.«

»Eben hatte ich noch einen! Was haben Sie mit mir gemacht?«

»Nur Ihre Konfiguration etwas verändert. Die Wahrheit kann sehr verwirrend sein.«

»Ich ... ich bekomme keine Luft mehr! Machen Sie's rückgängig, sofort. Ich will meinen Körper zurück!«

»Das geht leider nicht. Ich kann Ihnen aber anbieten ...«

»Egal was, nur schnell.«

»Es nennt sich Persönlichkeitsre-normierung, eine Art Neustart.«

»Alles, was Sie wollen, nur schnell!«

»Hallo, mein Name ist Monika. Zur Qualitätssicherung wird dieses Beratungsgespräch aufgezeichnet. Was kann ich für Sie tun?«

»Harold Williamson. Ich will mich beschweren, meine Monatsrente ist überfällig.« 🐛

DER AUTOR

Aaron Moskalik ist Software-Architekt und Sciencefiction-Autor. Er lebt in der Nähe von Detroit (US-Bundesstaat Michigan).

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.

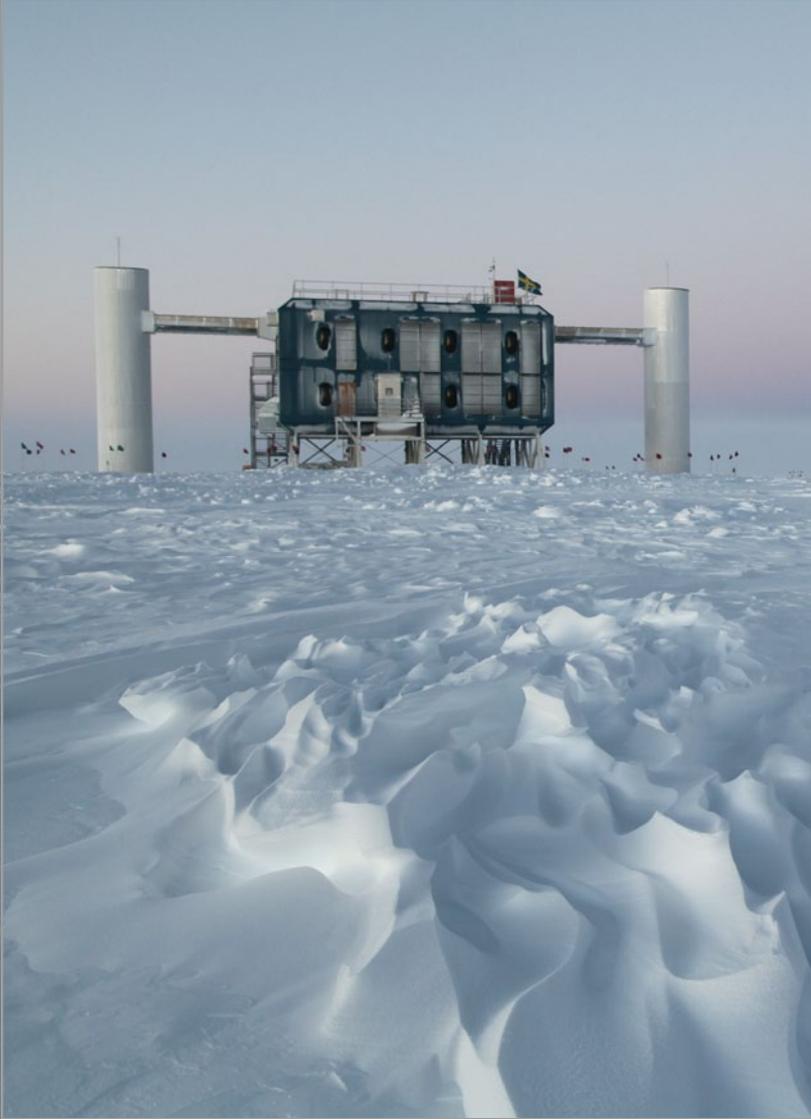
© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 529, S. 122, 7. Januar 2016

Neutrinojagd am Ende der Welt

Mit dem IceCube-Experiment am Südpol haben Forscher dutzende Teilchen eingefangen, die bereits das halbe Universum durchquert haben. Die Boten aus den Tiefen des Alls sollen dazu beitragen, noch ungelöste kosmische Rätsel zu entschlüsseln.



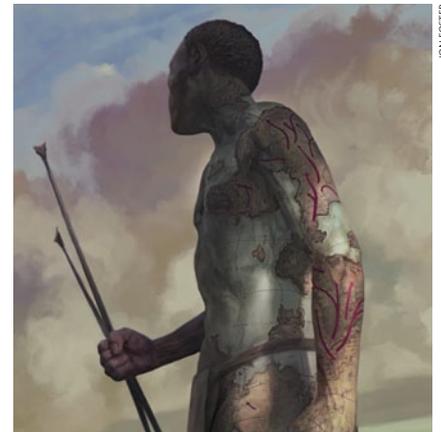
SVEN LIDSTROM/ICECUBE/NSF

Wider Mord und Totschlag – mit Statistik

Methoden aus der Epidemiologie ermöglichen es, tiefer liegende soziale Muster zu finden, die Verbrechen begünstigen. Wenn die gesellschaftlichen Ursachen erst einmal aufgedeckt sind, können die Behörden effektiver gegen Gewalttaten vorgehen und sie sogar verhindern.

Erste Abwehrfront des Organismus

Bitterrezeptoren finden sich nicht nur auf der Zunge und in der Nase, sondern auch in Herz, Lunge und anderen Organen. Sie lösen schnelle Verteidigungsreaktionen gegen Bakterien aus, etwa Zilienbewegungen auf Schleimhäuten oder das Freisetzen von antibakteriellen Peptiden.



JON FOSTER

Siegeszug dank Kooperation

Durch seine Begabung zur Zusammenarbeit und seine fortschrittlichen Waffen setzte sich *Homo sapiens* gegenüber anderen Menschenarten durch und eroberte die Erde.



ISTOCK / PETERSPHOTOGRAPHY

Das Sturmmonster

Ein mysteriöses tropisches Wettermuster – die so genannte Madden-Julian-Oszillation – löst Überschwemmungen, Hitzewellen und Wirbelstürme rund um den Globus aus. Obwohl schon 1970 entdeckt, hat es bis vor Kurzem allen Erklärungsversuchen widerstanden.

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!



1. »Die Physik der Zukunft« von Michio Kaku

Wie werden wir leben – in 20, 60, 100 Jahren? Der Physiker Michio Kaku beschreibt in seinem Buch auf spannende Weise den Weg in die Zukunft. Dazu befragte er weltweit 300 namhafte Forscher aus den Bereichen künstliche Intelligenz, Raumfahrt, Medizin und Biologie bis hin zu Technik, um so ein realistisches Szenario vorzustellen.

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.

+ PÜNKTLICHE LIEFERUNG:

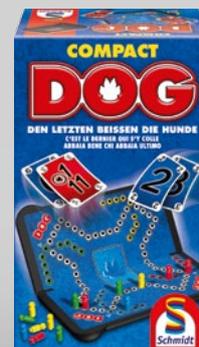
Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

2. Spiel »Dog Compact«

Bei diesem spannenden Taktikspiel für unterwegs versuchen immer zwei Spieler jeweils gemeinsam ihre Spielsteine ins Ziel zu bringen. Seine besondere Spannung erhält »DOG« durch eine ganze Reihe von Sonderkarten. Man muss auf jeden Fall gut aufpassen und geschickt taktieren, um voranzukommen.



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!



Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2016

Der Preis wurde anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemein verständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere aus den Bereichen Naturwissenschaft, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis für Bewerber, die Jahrgang 1987 oder jünger sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert.**

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis.

Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2016 mit 3 Beiträgen (Print) bzw. 2-3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

KONTAKT

**Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group**

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20

Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de

www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)

Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER

Sprecher der Unternehmensleitung,
Boehringer Ingelheim GmbH

ULRICH BLUMENTHAL

Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

UTA-MICAELA DÜRIG

Geschäftsführerin, Robert Bosch Stiftung GmbH

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER

Präsident, Wissenschaftsgemeinschaft
Gottfried Wilhelm Leibniz e. V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER

Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG

Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER

Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER

Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR

Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co“,
„Wissen vor acht“ u. a.

**SCIENTIFIC
AMERICAN**

SPRINGER NATURE

Spektrum
DER WISSENSCHAFT



www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis