

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

100 JAHRE
ALLGEMEINE
RELATIVITÄTS-
THEORIE

Einstein und die
Quanten-
mechanik



NOVEMBER 2015

EVOLUTION

Der späte Siegeszug
der Tyrannosaurier

KLIMA

Kalifornien
verdurstet

SINNE

Lärm schädigt das Gehör –
auf bislang unbekannte Weise

Dunkle Materie

Sie scheint noch seltsamer zu sein,
als die Physiker dachten

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



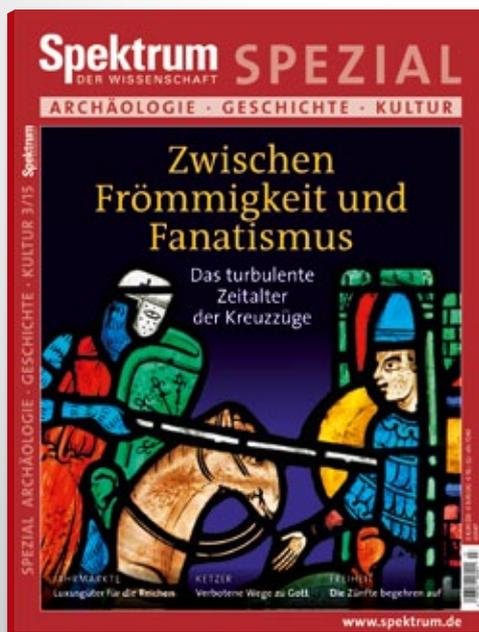
Unsere Neuerscheinungen



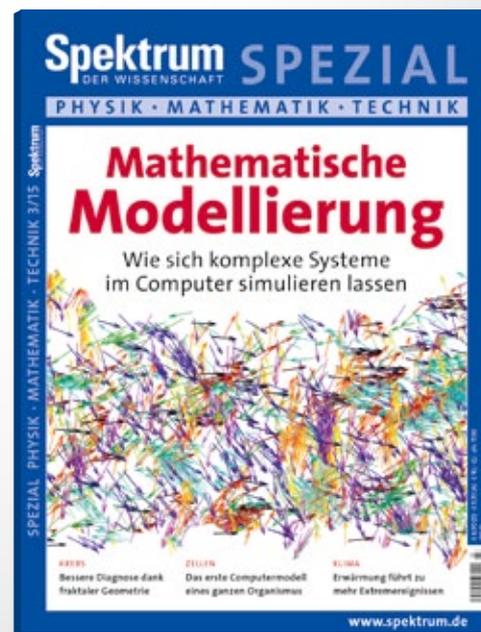
Kooperation: Das Erfolgsrezept des modernen Menschen • Geborene Jäger: Der Mensch als oberstes Raubtier • Archaische DNA: Neanderthaler- und anderes Erbe • € 8,90



Anders denken: Psychotherapie bei Trauer und Sorgen • Augen auf und durch: Konfrontation mit Prüfung • Gelassen bleiben: Wie Yoga, Achtsamkeit und Hypnose wirken • € 8,90



Jahrmärkte: Luxusgüter für die Reichen • Ketzer: Verbotene Wege zu Gott • Freiheit: Die Zünfte begehren auf • € 8,90



Strömungstechnik: Der Weg zum schwimmenden Nanoroboter • Molekulardynamik: Die Geheimnisse des Lebens simulieren • Krebs: Berechnung eines Tumors • € 8,90

Alle Hefte auch im Handel erhältlich!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Braucht die Welt noch Wissenschaftsjournalisten?

Am 29. September wurde in Berlin zum 20. Mal der Georg von Holtzbrinck Preis für Wissenschaftsjournalismus verliehen. Anlässlich des Jubiläums diskutierten die Gäste intensiv darüber, wie es denn wohl in den nächsten 20 Jahren um das Metier bestellt sein werde. Nach mehr als einem Jahrzehnt sinkender Auflagen bei vielen Zeitungen wie Zeitschriften und angesichts des Kostendrucks bei öffentlich-rechtlichen Sendern sehen viele die Zukunft düster. Auch die Wissenschaftsjournalismusforschung sorgt sich um ihren Untersuchungsgegenstand. So sieht der Experte Martin W. Bauer von der London School of Economics den Wissenschaftsjournalismus gleich von zwei Seiten in die Mangel genommen. Einerseits geben wissenschaftliche Institutionen heute selbst Magazine heraus, produzieren Filme und so fort. Andererseits rücken auch Wissenschaftler den Journalisten auf die Pelle, indem sie ihre Forschung etwa in Blogs präsentieren oder Mitschnitte ihrer Vorträge im Netz hochladen.

Und noch aus einer dritten Richtung bekommt die Branche Druck: Im Ringen um Aufmerksamkeit tritt längst ein neuer Schlag von Publizisten auf, die im Internet aus Enthusiasmus – oder schlicht, um Geld zu verdienen – mit meist sehr persönlicher Note über Wissenschaft berichten. Manche erzielen dabei Wirkungen, von denen selbst große Redaktionen nur träumen können. Ein fulminantes Beispiel ist die 2012 gestartete englischsprachige Seite »I fucking love science« (www.iflscience.com), deren Reichweite die der Portale großer Magazine wie »National Geographic« oder »Scientific American« locker in den Schatten stellt.

In einen Abgesang auf den Wissenschaftsjournalismus mag ich dennoch nicht einstimmen. So sehe ich es als großen Gewinn an, wenn Wissenschaftler ihre Arbeit selbst nach außen tragen und auch bereitstehen für Nachfragen und Diskussionen, denn das verankert Forschung fester in unserer Gesellschaft. Kritischer sehe ich institutionell erwünschte Selbstbeweihräucherung nach dem Strickmuster »Wir lösen bald das und das Problem und haben die und die Gelder eingeworben«. Die neuen Wissenschaftspublizisten aus den sozialen Netzwerken schließlich entwickeln einerseits erfrischend neue Darstellungsformen und zugkräftige Ansprachen, andererseits erreichen sie mit meist kurzen Clips und Textschnipseln häufig nicht die Tiefe der Auseinandersetzung, die vielen Themen angemessen ist.

Für den Wissenschaftsjournalismus bedeutet all das: Da immer mehr Stimmen anheben, Forschung zu erklären, zu promoten oder auch unterhaltend durch den Kakao zu ziehen, braucht die Gesellschaft mehr denn je Instanzen, die in der Sache unabhängig berichten, die die einschlägige Fachliteratur auch wirklich sichten und einordnen können, die Querbezüge herstellen sowie den Wissenschaftsbetrieb und seine Protagonisten von außen betrachten. Wer hier gute redaktionelle Arbeit macht – und das nehmen wir bei »Spektrum« im Heft wie online für uns in Anspruch –, wird auch in Zukunft nachgefragt werden.

Viel Freude mit den Früchten unserer Arbeit in dieser Ausgabe wünscht Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Paläontologe **Stephen Brusatte** ist Experte für die Anatomie und Evolution von Dinosauriern. Ab S. 20 schildert er den langen Weg der Tyrannosaurierentwicklung bis zum berühmten *T. rex*.



Bei 10 bis 20 Prozent der Depressiven wirken die gängigen Therapien nicht. Vielen von ihnen lässt sich aber mit elektrischen Pulsen helfen, die über Elektroden ins Gehirn verabreicht werden, berichten **Andres M. Lozano** und **Helen S. Mayberg** ab S. 36.



Die Dunkle Materie könnte wesentlich komplexer und vielfältiger sein, als Teilchenphysiker bislang vermutet haben. **Bogdan A. Dobrescu** und **Don Lincoln** beschreiben ab S. 42 ihre Suche jenseits der üblichen Verdächtigen.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Kollision mit Merkur fällt aus • Kein Herzinfarkt durch Sex • Die raffinierte Lunge der Quastenflosser • Neuer Superwerkstoff trotz dem Verschleiß • Futterhäuschen als Infektionsquelle für Vögel? • »Klumpiges« Wasser

9 Bild des Monats

Zirrusnebel im Sternbild Schwan

10 Forschung aktuell

Sensation *Homo naledi*

Neu entdeckte Frühmenschenart wirft Rätsel auf

Krebsimmuntherapie

Mutationen machen Tumorzellen angreifbar

Rekordsupraleiter

Schon ab –70 Grad Celsius fließt Strom verlustfrei

Elektronik mit Biomolekül

Transistor und Solarzelle aus Hämoglobinbaustein

Im Sog der Plasmawelle

Technik bringt Teilchen rekordschnell auf Tempo

SPRINGER'S EINWÜRFE

Wenn der Markt versagt
Kollaps im Energiebereich

20



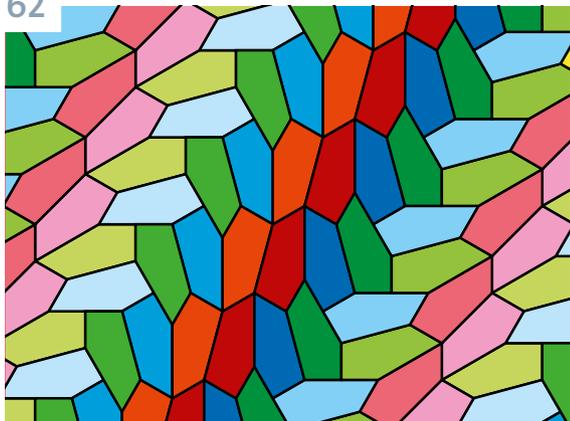
JAMES GURNEY

54



SHOUT (ALESSANDRO GOTTARDO)

62



WOLFRAM DEMONSTRATIONS PROJECT, [HTTP://DEMONSTRATIONS.WOLFRAM.COM/PENTAGONTILINGS/](http://demonstrations.wolfram.com/PentagonTilings/); AUTOR: ED FEGG JR.; EINFÄRBUNG: CHRISTOPH PÖPPE

BIOLOGIE & MEDIZIN

► 20 Der späte Siegeszug der Tyrannosaurier

Mindestens 80 Millionen Jahre lang führten sie ein Schattendasein. Erst kurz vor dem Ende des Erdmittelalters entstanden gigantische Arten wie *Tyrannosaurus rex*.

Stephen Brusatte

► 29 Versteckter Hörverlust

Lärm schädigt unser Gehör auch auf bislang unbekanntem Wegen – perfiderweise ohne dass man es zunächst merkt!

M. Charles Liberman

36 Depression an der Wurzel packen

Nervenfaserbündel elektrisch zu reizen, kann schwere psychische Störungen lindern.

Andres M. Lozano und Helen S. Mayberg

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

52 Wirbel auf dem Honigbrot

Ein zäher Strahl windet sich zu Spiralen, wenn feste und flüssige Eigenschaften zusammenspielen.

H. Joachim Schlichting

SERIE »100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE« TEIL 2

► 54 Kosmische Würfelspiele

Einstein war kein Gegner der Quantenmechanik. Er hatte erkannt: Der Zufall wirkt im All auf verschiedenen Ebenen.

George Musser

MENSCH & KULTUR

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

62 Unordentliche Fünfeckspflasterungen

Ein neuer, fünfeckiger Stein ist entdeckt worden, mit dem man die Ebene lückenlos bedecken kann.

Christoph Pöppe

42 Der verborgene Kosmos

Bogdan A. Dobrescu und Don Lincoln

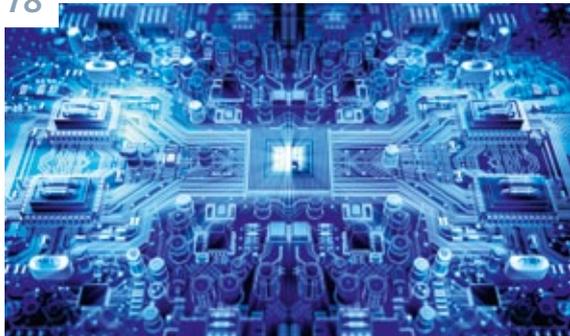
Beobachtungen im Universum legen nahe, dass es neben der sichtbaren Materie noch eine andere, »dunkle« Komponente gibt. Lange waren die Forscher von nur einer Sorte an Teilchenkandidaten dafür ausgegangen. Aber möglicherweise ist die unsichtbare Seite des Alls weitaus vielfältiger.

68



GETTY IMAGES / JUSTIN SULLIVAN

78



ISTOCK / HENRIK 5000

ERDE & UMWELT

► 68 Kalifornien verdurstet

Ist die extreme Dürre, die den Sonnenstaat derzeit heimsucht, nur ein vorübergehendes Phänomen – oder der Vorgeschmack auf den künftigen Normalzustand?

Dan Baum

TECHNIK & COMPUTER

78 Quantenoptik auf dem Sprung

Neu entdeckte Wechselwirkungen von Licht und Materie eröffnen oft auch Anwendungsmöglichkeiten. Doch es ist schwierig, die Konzepte in die Industrie zu bringen.

Jürgen Stuhler

84 Die Tücken tragbarer Elektronik

Bald werden wir zahlreiche Mobilgeräte am Körper tragen. Die dadurch anfallende Informationsflut wirft große technische und datenrechtliche Probleme auf.

Kat Austen

61 Wissenschaft im Rückblick

Vom Speiseplan des Mammuts bis zum Schreibmaschinenunterricht durch Roboter

87 Rezensionen

Bärbel Morstadt: Die Phönizier • *Brian Clegg: Eine kleine Geschichte der Unendlichkeit* • *Andreas Quatember: Statistischer Unsinn* • *Lutz Jäncke: Ist das Hirn vernünftig? u. a.*

94 Leserbrief/Impressum

96 Futur III

Kyle L. Wilson und Andrew B. Barbour: Altern ist nichts für Feiglinge

98 Vorschau

Titelmotiv: Ralf Kaehler, Oliver Hahn & Tom Abel (KIPAC/SLAC); Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft; Einstein oben rechts: Ferdinand Schmutzer, 1921 / public domain [M]. Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

ASTRONOMIE

Kollision mit Merkur fällt aus

Der innerste Planet unseres Sonnensystems, Merkur, bewegt sich auf einer stark elliptischen Bahn: Ihr sonnenfernster Punkt ist rund 1,5-mal so weit vom Zentralgestirn entfernt wie ihr sonnennächster.

Einige Astronomen spekulieren, die Schwerkraft des Jupiters könne den Merkurorbit irgendwann völlig destabilisieren und den Gesteinsplaneten durchs innere Sonnensystem driften lassen. Dabei könnte Merkur entweder direkt mit der Erde zusammenstoßen oder die Venus auf einen Kollisionskurs zu uns schicken.

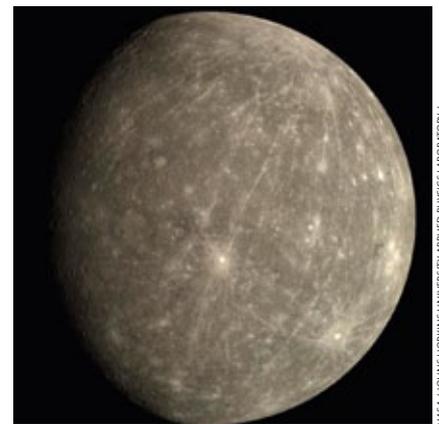
Richard Zeebe, Physiker an der University of Hawaii in Manoa (USA), hat daher simuliert, wie sich unser Planetensystem in den kommenden 5 Milliarden Jahren verändert. Sein Ergebnis: Der Erde droht zumindest keine direkte Gefahr. In sechswöchiger

ununterbrochener Rechenzeit an einem Supercomputer »Cray CS300« simulierte er 1600 Szenarien mit geringfügig unterschiedlichen Anfangsbedingungen. Das Modell enthielt die Bewegungsgleichungen aller acht Planeten sowie Plutos als einflussreichstes Objekt aus dem Kuipergürtel und berücksichtigte Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie.

In keinem Szenario reichte Jupiters Schwerkraft aus, um Merkur auf eine Bahn zu zwingen, die ihn in die Nähe des Erdborbits brachte. Rund ein Prozent der Modellläufe ergab immerhin eine deutliche Zunahme der Merkurbahnexzentrizität. In drei Fällen stürz-

te Merkur in die Sonne, in sieben kollidierte er mit der Venus – jeweils erst in vielen hundert Millionen Jahren. Der Erdborbit bleibe den Simulationen zufolge in den kommenden Jahrmilliarden höchstwahrscheinlich stabil, so Zeebe.

The Astrophysical Journal
10.1088/0004-637X/811/1/9, 2015



NASA / JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY / ARIZONA STATE UNIVERSITY / CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Wird Merkur in ferner Zukunft die Erde rammen? Eine aufwändige Simulation gibt Entwarnung.



Mehr Aktualität!

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

MEDIZIN

Kein Herzinfarkt durch Sex

Patienten, die bereits einen Herzinfarkt hinter sich haben, befürchten oft, durch sexuelle Aktivität einen weiteren zu erleiden. Diese Sorge ist wohl unbegründet, berichtet ein Team um den Ulmer Kardiologen Dietrich Rothenbacher. In einer Langzeitstudie beobachteten die Forscher 536 Herzinfarktpatientinnen und -patienten im Alter zwischen 30 und 70 Jahren über einen Zeitraum von zehn Jahren hinweg. Via Fragebogen erfassten sie dabei deren Lebensgewohnheiten einschließlich der sexuellen Aktivität.

Laut den Daten geht häufiger Geschlechtsverkehr nicht mit einem höheren Infarktrisiko einher. Im Gegenteil: Das Risiko einer zweiten Herzattacke war bei jenen Patienten, die sich öfter als einmal pro Woche sexuell betätigten, statistisch nur etwa halb so groß wie bei weniger aktiven Teilneh-

mern. Zudem löse Sex sehr selten ein kardiovaskuläres Ereignis direkt aus, betont Rothenbacher. Lediglich drei Studienteilnehmer erfuhren in den ersten zwei Stunden nach einem Geschlechtsakt einen Infarkt. Das entspricht 0,6 Prozent aller Probanden im Beobachtungszeitraum.

Die meisten Patienten können sich ohne Bedenken wieder der schönsten Nebensache der Welt hingeben, folgern die Autoren – nur bei besonderen Komplikationen seien Vorsicht und weitere Abklärung geboten. Damit entkräften sie die nach wie vor verbreitete Angst vor einem »mors in coitu«. Nur relativ wenige Infarktpatienten werden diesbezüglich von ihrem Arzt beraten: Bei den Männern sind es etwa 50 Prozent, bei den Frauen lediglich rund 30.

JACC 10.1016/j.jacc.2015.07.053, 2015

Die raffinierte Lunge der Quastenflosser

Quastenflosser besitzen Lungen, berichten Wissenschaftler um Paulo M. Brito von der Universidade do Estado do Rio de Janeiro (Brasilien). Zumindest in frühen Embryonalstadien bilden die Tiere solche Atmungsorgane aus. Während sie heranwachsen, verkümmert die Lunge aber immer mehr und macht einem fetthaltigen Organ Platz, das der Auftriebskontrolle dient.

Weithin bekannt geworden sind die Quastenflosser als »lebende Fossilien«. Die Knochenfische gibt es schon seit hunderten Millionen Jahren, wie Fossilfunde belegen. Lange galten sie als ausgestorben, bis man im 20. Jahrhundert lebende Exemplare entdeckte. Besonders interessant sind die Fische, weil der Bau ihrer Brust- und Bauchflossen an den von Landtiergliedmaßen erinnert. Sie stehen nahe dem evolutionären Zweig, der zu den Landwirbeltieren führte (siehe auch SdW 11/2013, S. 16).

Die Forscher um Brito untersuchten mehrere Individuen, die in den

zurückliegenden Jahrzehnten gefangen worden waren und verschiedene Entwicklungsstadien repräsentieren. Den Ergebnissen zufolge bilden die frühen Embryonalstadien potenziell funktionierende Lungen aus, die aber mit fortschreitendem Alter degenerieren. Laut den Forschern könnte das eine Anpassung an das Leben in mehreren hundert Meter Wassertiefe sein, wo die lebenden Exemplare gefangen beziehungsweise beobach-

tet wurden. In früheren Erdzeitaltern besiedelten Quastenflosser wahrscheinlich landnahe Flachwasserbereiche, in denen sie die Lunge gut gebrauchen konnten. Während des Erdmittelalters passten sich dann einige offenbar an ein Leben in der Tiefe an, wo sie die Umweltkatastrophe an der Kreide-Tertiär-Grenze überstanden und die Jahrmillionen bis heute überlebten.

Nature Communications 6, 8222, 2015



Das Präparat eines Quastenflossers.

SMERIKAL / CC-BY-SA-2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/2.0/LEGALCODE)

Neuer Superwerkstoff trotz dem Verschleiß

Der Physiker Pei Wang von der Sichuan University (China) und seine Kollegen haben eine Mischung aus Diamant und Bornitrid hergestellt und damit ein extrem widerstandsfähiges Material geschaffen, das die Vorzüge beider Ausgangsstoffe vereint. Es ist fast genau so hart wie Diamant, aber deutlich hitzebeständiger als dieser.

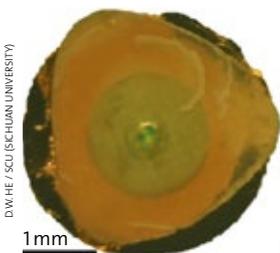
Aus ihm lassen sich äußerst verschleißarme Schneidwerkzeuge herstellen.

Die Industrie benötigt spezielle Materialien, um widerstandsfähige Werkstoffe wie gehärteten Werkzeugstahl zu bearbeiten. Diamant ist dabei wegen seiner unübertroffenen Härte meist das Mittel der Wahl. Allerdings hält er keine hohen Temperaturen aus: Ab zirka 680 Grad Celsius oxidiert er, weshalb er sich nicht als Schleif- und Poliermittel für eisenhaltige Legierungen eignet. Kubisches Bornitrid (cBN) dagegen ist als Schleifmaterial äußerst temperaturbeständig, aber nur halb so hart wie Diamant.

Die chinesischen Forscher vermischten Diamant- und cBN-Staub im

Verhältnis 1:1, wobei die Größe der Staubkörnchen zwischen zwei und vier Mikrometern lag. Dann setzten sie das Gemenge mehrere Minuten lang Drücken zwischen 11 und 20 Gigapascal und Temperaturen zwischen 1000 und 2300 Grad Celsius aus. Unter diesen Bedingungen sintert das Gemisch zu einem transparenten, kristallinen Feststoff. Er ist ähnlich hart wie Diamant, oxidiert aber erst ab etwa 800 Grad Celsius. Versuche zeigten, dass das Material sowohl Werkzeugstahl als auch Granit sehr gut schneidet und dabei viel weniger verschleißt als Diamant und cBN einzeln.

Applied Physics Letters 107, 101901 (2015)



Eine gesinterte Diamant-Bornitrid-Mischung. Das Material ist durchsichtig und sehr belastbar.

BIOLOGIE

Futterhäuschen als Infektionsquelle für Vögel

Vögel, die sich lange an Futterhäuschen aufhalten, scheinen anfälliger für Bindehautentzündungen zu sein. Zudem übertragen sie die Krankheit schneller auf Artgenossen. Dies berichten Biologen um Dana Hawley von der Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.

Die Forscher statteten Hausgimpel (Singvögel aus der Familie der Finken) mit Chips aus, um nachzuverfolgen, wo sich die Tiere aufhalten und wie viel Kontakt sie zu Artge-

nossen haben. Dabei zeigte sich: Das Risiko, an Bindehautentzündung zu erkranken, ist umso höher, je mehr Zeit die Tiere an Futterhäuschen verbringen. Wie oft sie Kontakt zu anderen Vögeln haben, spielt hingegen nur eine untergeordnete Rolle.

In einem weiteren Versuch infizierte das Team in Gefangenschaft lebende Hausgimpel mit dem Bakterium *Mycoplasma gallisepticum*, das diese Krankheit verursacht. Anschließend beobachteten die Forscher, welche Tiere die Infektion besonders schnell an andere weitergeben. Auch hier waren es jene Individuen, die auffällig lange an Futterhäuschen verweilten.

Eine Bindehautentzündung ist zwar nicht direkt lebensbedrohlich, kann wilden Vögeln wegen der eingeschränkten Sicht aber dennoch zum Verhängnis werden. Deswegen empfehlen die Forscher, Futterspender beim Nachfüllen gründlich zu reinigen und am besten zu desinfizieren, um das Ansteckungsrisiko für die Tiere klein zu halten. Allerdings lassen sich die Beobachtungen eventuell auch anders erklären – nämlich damit, dass Hausgimpel umso länger an Futterstellen hocken, je kränklicher sie sind. In diesem Fall wären die Häuschen selbst an der Verbreitung dieser Infektion »unschuldig«.

The Royal Society 10.1098/rspb.2015.1429, 2015

MIT FELDGEN VON SIBILLE FRANZ



Wenn Vögel lange in der Nähe eines Futterspenders bleiben, könnte das darauf hindeuten, dass sie kränkeln.

CHEMIE

»Klumpiges« Wasser

Die Eigenschaften von Wasser sind sehr ungewöhnlich. So hat der Stoff seine größte Dichte bei rund 4 Grad Celsius (»Dichteanomalie«) sowie eine sehr hohe Schmelz- und Siedetemperatur, Wärmekapazität und Oberflächenspannung. Forscher um Johannes Hunger vom Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz sind nun auf eine weitere Besonderheit gestoßen. Sie untersuchten Vibrationsbewegungen der Wassermoleküle mit verschiedenen Spektroskopiemethoden. Dabei stellten sie fest, dass lokale Strukturen in flüssigem Wasser langlebiger sein können als bisher angenom-

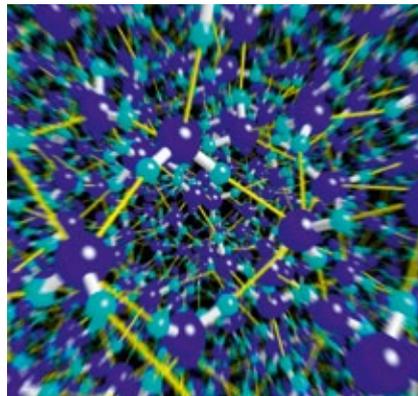
men. Auf den Zeitskalen, in denen typische chemische Reaktionen ablaufen, sei Wasser deshalb »klumpig«, was bislang zu wenig berücksichtigt worden sei.

Wassermoleküle bilden untereinander so genannte Wasserstoffbrücken aus und lagern sich deshalb zu Clus-

tern zusammen. Diese Verbünde zerfallen aber praktisch sofort wieder, worauf ihre Moleküle sich zu neuen Clustern zusammenfügen und so weiter. Der Vorgang ist dermaßen schnell, dass man bisher annahm, er störe die Homogenität des Wassers nicht. Hunger und seine Kollegen fanden nun heraus, Wassercluster können mehr als eine Pikosekunde (billionstel Sekunde) lang bestehen – deutlich länger als bisher vermutet. Das wirkt sich, schreiben die Forscher, auf chemische Reaktionen aus, die in der Wasserphase ablaufen: Wegen der »Klumpigkeit« des Wassers im Bereich typischer Reaktionszeiten werde die Reaktionswärme langsamer abgeführt als bisher angenommen, was in entsprechenden Simulationen bislang nicht erfasst worden sei.

Nature Communications 6:8384, 2015

MASAKAZU MATSUMOTO / CC-BY-2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/2.0/LEGALCODE)



Künstlerische Illustration von Wasserstoffbrücken, die sich zwischen Wassermolekülen ausbilden. Die Cluster, die dabei entstehen, sind sehr kurzlebig.

SCHILLERNDE SCHWANENFEDER

Die neue Falschfarbenaufnahme des Weltraumteleskops Hubble zeigt einen kleinen Teil des Zirkusnebels im Sternbild Schwan – Überreste einer Sternexplosion in rund 2000 Lichtjahren Entfernung. In diesem etwa zwei Lichtjahre großen Ausschnitt entspricht Rot leuchtendem Wasserstoff, Grün Schwefel und Blau Sauerstoff. Der Vergleich mit Bildern von 1997 ergab enorme Geschwindigkeiten: Die Gasfilamente würden die Strecke zwischen Erde und Mond in weniger als einer Viertelstunde zurücklegen.

PALÄANTHROPOLOGIE

Homo naledi – eine neue Frühmenschenart?

Lange fieberte die Fachwelt den ersten Ergebnissen des Jahrhundertfonds in Südafrika entgegen. Nun sind sie da – und bescheren uns einen neuen Verwandten im Menschenstammbaum.

VON JAN DÖNGES

Es ist der ergiebigste Fund frühmenschlicher Fossilien, den Forscher je verzeichneten. Bald nach der Entdeckung im Herbst 2013 in Südafrika förderte die von Lee Berger von der University of the Witwatersrand in Johannesburg in Windeseile zusammengetrommelte Expedition rund 1550 Knochenfragmente von Homininen aus einer der Rising-Star-Höhlen ans Tageslicht (SdW 1/2015, S. 22). Danach hüllte sich das internationale Team, das den Fund untersucht, erst einmal in Schweigen. Aber im September 2015 präsentierte es in zwei Veröffentlichungen erste Resultate (*eLife* 2015;4:e09560 und 09561).

Demnach gehören alle Knochen wohl zu Individuen einer einzigen, bislang unbekanntes Frühmenschenart, der die Forscher den Namen *Homo naledi* gaben. Benannt ist sie nach dem Sesotho-Wort für »Stern«. Die Höhlenkammer selbst taufte sie Dinaledi. Von mindestens 15 Individuen seien Überreste geborgen worden – damit ist die neue Art gleich um ein Vielfaches besser belegt als sämtliche anderen frühen Angehörigen unseres Stammbaums. Denn in der Regel finden Forscher kaum mehr als ein paar einzelne Fragmente.

Trotz der Materialfülle bleiben noch viele Rätsel offen, urteilt Chris Stringer vom Natural History Museum in London in seinem passend betitelten Kom-

mentar »The many mysteries of *Homo naledi*«. Den Ausführungen der Forscher ist zu entnehmen, dass es sich um einen noch recht urtümlichen Vertreter der Gattung *Homo* handelt. Vor allem fällt auf, dass der zierliche *H. naledi* mit seinen teils noch sehr archaischen, teils aber auch ziemlich modernen Merkmalen wie ein evolutionäres Mosaik wirkt. So hatten Vertreter der Art offenbar recht menschenähnliche Füße, aber ihr Gehirn erinnert mit seiner geringen Größe eher an Australopithecinen – es hat gerade einmal das Volumen einer Orange und liegt damit außerhalb der Spannweite, die von frühen ostafrikanischen Vertretern der Gattung *Homo* bekannt ist, wie etwa dem *H. habilis* oder dem *H. rudolfensis*.

Mit seinem schwachen Gebiss unterscheidet sich *H. naledi* dennoch von den *Australopithecus*-Arten und dem robusten *Paranthropus*. Anders als Letzterer war er demnach wohl weniger auf zähe und harte Nahrung spezialisiert, sondern bevorzugte anscheinend wie spätere Angehörige der Gattung *Homo* eine leichtere und vermutlich nahrhaftere Kost. Auch seine Hände und Handgelenke wirken modern. Gleichzeitig erinnern die gebogenen Finger an nichtmenschliche Primaten. Mit ihnen, ebenso wie mit seinen Schultern, hätte der rund 1,50 Meter große und 40 bis 50 Kilogramm schwere Frühmensch gut in Bäumen klettern können. Seine moder-

ne Hand mag sich allerdings dennoch für Werkzeuggebrauch geeignet haben, erklärt Tracy Kivell vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, die sich mit den Handknochenfossilien befasst hat. Einen ganz ähnlichen Merkmalsmix beobachteten Forscher jüngst an *Australopithecus sediba*, der kürzlich – ebenfalls von Berger – unweit des Rising-Star-Höhlensystems gefunden wurde (SdW 9/2012, S. 22).

»Das ist eine höchst seltsame Kombination von Merkmalen. Einige davon haben wir nie zuvor gesehen, und von anderen hätten wir nie erwartet, dass wir sie einmal beieinander finden«, erklärt Teammitglied John Hawks von der University of Wisconsin in Madison, der an der Organisation der Untersuchung maßgeblich beteiligt war. Die Vielfalt an Ausprägungen geht so weit, dass sich längst nicht alle Forscher der Interpretation von Berger und Kollegen anschließen mögen. So etwa der Evolutionsbiologe Jeffrey Schwartz von der University of Pittsburgh in Pennsylvania, der im Magazin »Nature« erklärt, die Funde seien zu verschiedenartig, um zu einer einzelnen Spezies zu gehören. Zweifel an der Einstufung in die Gattung *Homo* – und nicht etwa *Australopithecus* – wurden allerdings bislang nicht laut. Dabei ist dies häufig der strittigste Aspekt bei der Beschreibung neuer Fossilfunde von Homininen.

Diese Rekonstruktion von John Gurche verleiht dem *Homo naledi* teils recht moderne Züge. An sich war seine Stirn jedoch flach.



MARK THIESSEN / NATIONAL GEOGRAPHIC (AUS NATIONAL GEOGRAPHIC 10/2015)

Unklar bleibt bei alledem die Verbindung der neuen Art zu anderen Früh- oder Vormenschen wie *H. habilis* oder *H. ergaster* (dem »afrikanischen« *H. erectus*). Derzeit dürften wohl nur wenige Forscher in dieser Spezies einen direkten Vorläufer des modernen Menschen sehen – wo sich sein Ast von der Hauptlinie abspaltete, ist unbekannt.

Entscheidend: Alter der Knochen

Überhaupt enden die Rätsel längst nicht bei der Anatomie. Eine der größten bislang ungelösten Fragen betrifft das Alter der Knochen. Die Wissenschaftler des Berger-Teams haben noch keinen Versuch unternommen, die Fossilien zu datieren – nicht einmal eine grobe zeitliche Einordnung sei vorgenommen worden, kritisiert Stringer erkennbar verwundert in seinem Kommentar. Das erschwere jegliche weiter gehende Interpretation. Es könnte durchaus sein, dass die Funde ein sehr hohes Alter von über zwei Millionen Jahren aufweisen. Dann würden sie aus der Frühzeit der *Homo*-Entwicklung stammen und aufschlussreiche Einblicke in die kritische Phase der Herausbildung unserer Gattung geben. Hier stünde etwa die Frage im Raum, ob die entscheidenden Schritte der Menschwerdung nicht wie lange angenommen in Ostafrika, sondern im Süden des Kontinents abliefen.

Wären sie dagegen deutlich jünger, könnten es die Wissenschaftler mit ei-

nem ähnlichen Phänomen wie beim nicht minder rätselhaften *Homo floresiensis* zu tun haben. Nach Meinung mancher Forscher handelt es sich bei dieser Art um eine verzweigte Form des *Homo erectus*, die auf der Insel Flores bis in jüngste Zeit überlebte.

Hatte es im Süden Afrikas etwas Ähnliches gegeben? Freilich sind bislang von anderen Orten keine Funde von *H. naledi* bekannt, die klären könnten, ob es sich bei den Individuen aus der Dinaledi-Kammer um Angehörige einer isolierten Population handelte – oder ob die Art vielleicht sogar weit verbreitet war.

Auszuschließen ist Letzteres jedenfalls nicht. In Forscherkreisen herrscht Verwunderung über rund 1,8 Millionen Jahre alte *Homo-erectus*-Fossilien aus dem georgischen Dmanisi. Die fünf dort über einen längeren Zeitraum ausgegrabenen Individuen wirken teils recht urtümlich und weisen insgesamt eine große Merkmalsvielfalt auf. Laut Stringer erinnert *H. naledi* am ehesten an die grazilen Individuen aus Georgien. Am Ende könnten die Dinaledi-Funde sogar in einem Zusammenhang mit einer über die Grenzen Afrikas hinaus verbreiteten frühen Menschenart stehen.

Fast noch größer ist das Rätselraten darüber, wie die *Homo-naledi*-Individuen so geschlossen ihren Weg in die Kammer fanden. Das Team um Berger hat verschiedene Szenarien dazu durch-

gespielt – nur eines konnte sie überzeugen: Demnach wurden die Frühmenschen absichtlich dorthin gebracht. Es könnte sich mithin um den bislang ältesten Beleg für Bestattungen handeln. Die Verhältnisse ähneln in einigem denen der Sima de los Huesos im spanischen Atapuerca, wo zahlreiche Angehörige der Art *Homo heidelbergensis* offenbar in eine unzugängliche Grube geworfen wurden.

Die Dinaledi-Kammer hatte nie einen direkten Zugang zur Außenwelt. Zudem fanden die Ausgräber, von einigen Kleintieren abgesehen, dort ausschließlich die menschlichen Fossilien. Es scheint sich daher nicht um den einstigen Bau eines Raubtiers zu handeln, das seine hominine Beute dorthin schleppte – zumal die Knochen keine typischen Biss- und Verletzungsspuren aufwiesen. Auch die Interpretation als »Wohnhöhle« des *H. naledi* komme nicht in Betracht.

»Nachdem wir alle anderen Möglichkeiten ausgeschlossen hatten, blieb uns als plausibelste Variante nur die bewusste Beseitigung der Toten durch *Homo naledi*«, fasst Berger zusammen. Das allerdings wäre eine beachtliche kognitive Leistung für einen frühen Menschen mit einem Gehirn, dessen Größe dem eines Gorillas entspricht. Ein derartiges Verhalten ist eigentlich nur für *Homo sapiens* typisch – und außerhalb des Funds in der Sima de los Huesos für keine andere Art wirklich belegt.

Zur Auswertung der 1550 Einzelfunde hatte Berger über soziale Medien ein 30-köpfiges Team junger Wissenschaftler zusammengestellt, das in einem einmonatigen Intensivworkshop mit der Analyse der Knochen begann. Weitere Ergebnisse sollen der Fachwelt bald in rund einem Dutzend Fachartikeln präsentiert werden. Gleichzeitig wollen die Anthropologen eine frei zugängliche Datenbank mit 3-D-Scans der Fossilien erstellen. Forscher aus aller Welt können dann selbst einen Blick darauf werfen – und sich einen eigenen Reim auf den wohl ungewöhnlichsten Fund der letzten Jahrzehnte machen.

Jan Dönges ist Redakteur bei »Spektrum.de«.

Neuer Rekordsupraleiter: Schwefelwasserstoff

Bei -70 Grad Celsius verliert das stinkende Gas unter hohem Druck jeglichen elektrischen Widerstand. Diese Entdeckung ist ein überraschender neuer Meilenstein auf dem Weg zur Supraleitung bei Zimmertemperatur.

VON IGOR I. MAZIN, EDWIN CARTLIDGE UND GERHARD TRAGESER

Könnte es eines Tages ein Material geben, durch das bei Zimmertemperatur elektrischer Strom ohne jeglichen Widerstand fließt? Die Suche danach hat jetzt erneut starken Auftrieb bekommen. Alexander P. Drozdov und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz entdeckten, dass Schwefelwasserstoff (H_2S) – der für den üblen Geruch von faulen Eiern verantwortlich ist – schon bei -70 Grad Celsius Strom verlustfrei leitet (*Nature*, Bd. 525, S. 73, 2015). Allerdings mussten die Forscher das Gas dazu dem extrem hohen Druck von 150 Gigapascal (1,5 Millionen Atmosphären) unterwerfen. Damit hat eine Geschichte, die vor über 100 Jahren begann und immer wieder mit sensationellen Überraschungen aufwartete, einen neuen vorläufigen Höhepunkt erreicht.

Im Jahr 1911 stellte der niederländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926) verblüfft fest, dass Quecksilber unterhalb einer Temperatur von 4,2 Kelvin (-269 Grad Celsius) zum »Supraleiter« wird, der elektrischen Strom völlig verlustfrei transportiert. Die Erfahrung lehrt allerdings, dass nichts auf dieser Welt vollkommen ist: Es gibt keinen Kristall ohne Fehlstelle, kein Rad rollt ohne Reibung, und kein Glas ist zu 100 Prozent durchsichtig. Wie kann es dann sein, dass im Quecksilber – und in diversen anderen Metallen, wie sich bald zeigte – bei der so genannten Sprungtemperatur T_c (nach englisch: critical temperature) der elektrische Widerstand komplett verschwindet?

Jahrzehntelang blieb dieses Rätsel ungelöst. Einen ersten Hinweis auf die Antwort gab 1938 die Entdeckung eines verwandten Phänomens: der Suprafluidität von Helium bei Temperaturen unter 2 Kelvin. In diesem Zustand verliert

die Flüssigkeit ihre Viskosität, so dass sie gänzlich ohne innere Reibung strömt. Das hat, wie sich herausstellte, quantenmechanische Gründe. Jedes Elementarteilchen ist durch einen so genannten Spin charakterisiert, der einen ganz- oder halbzahligen Wert aufweist. Im ersteren Fall können die Partikel bei genügend tiefen Temperaturen zu einem zusammenhängenden Objekt verschmelzen, in dem sie sich alle gleichartig verhalten. Dieser Effekt wird Bose-Einstein-Kondensation genannt.

Elektronen als Träger des elektrischen Stroms haben jedoch einen halbzahligen Spin. Wie können sie trotzdem in einen hochgradig koordinierten quantenmechanischen Zustand übergehen? Im Jahr 1957 postulierten die US-Physiker John Bardeen (1908–1991), Leon Neil Cooper und John Robert Schrieffer, dass die Wechselwirkung der Elektronen mit den Metallionen zu einer anziehenden Kraft zwischen ihnen führt, wodurch sie sich bei ausreichend tiefen Temperaturen, wenn kaum noch störende Wärmebewegung stattfindet, zu Paaren zusammenschließen. Solche »Cooper-Paare« haben dann einen ganzzahligen Spin und können folglich ein Bose-Einstein-Kondensat bilden.

Gibt es eine Obergrenze für die Sprungtemperatur?

Bis 1957 waren alle supraleitenden Elemente entdeckt. Sie müssen durchweg unter zehn Kelvin abgekühlt werden, um den elektrischen Widerstand zu verlieren. In den beiden folgenden Jahrzehnten kamen diverse intermetallische Verbindungen hinzu. Dadurch gelang es zwar, die Sprungtemperatur weiter nach oben zu drücken, aber nur bis 24 Kelvin. Dieser Wert schien die absolute Obergrenze zu markieren. Im

Jahr 1972 argumentierten Marvin L. Cohen von der University of California in Berkeley und der spätere Physiknobelpreisträger Philip W. Anderson, dass die Elektronen das Kristallgitter aufbrechen können, wenn ihre Wechselwirkung mit den Metallionen zu stark wird. Dies sollte gemäß den Abschätzungen der beiden Forscher die Sprungtemperatur auf höchstens 30 Kelvin begrenzen – jedenfalls bei solchen Supraleitern, die auf dem von Bardeen, Cooper und Schrieffer postulierten und nach ihnen benannten BCS-Mechanismus beruhen.

Obwohl das Argument überzeugend schien, blieben einige Physiker skeptisch. So machte sich in den frühen 1970er Jahren Vitaly Ginzburg (1916–2009), damals einer der führenden Theoretiker, mit seiner Arbeitsgruppe daran, Wege zur Hochtemperatursupraleitung zu erforschen. Insbesondere wies er nach, dass eine der zentralen Annahmen von Cohen und Anderson falsch war. Demnach konnte die Sprungtemperatur sehr wohl beliebig hoch sein.

Dennoch war es eine Sensation, als 1986 tatsächlich der erste »Hochtemperatursupraleiter« entdeckt wurde, der noch dazu kein Metall, sondern eine Keramik war. Die diversen in der Folge synthetisierten Verbindungen aus der Klasse der Cuprate erreichten Sprungtemperaturen bis 133 Kelvin (-140 Grad Celsius). Allerdings handelt es sich um »unkonventionelle« Supraleiter, die auf direkten Wechselwirkungen zwischen den Elektronen ohne Beteiligung der Metallionen beruhen, also nicht dem BCS-Mechanismus gehorchen.

Doch im Jahr 2001 stellte sich heraus, dass auch Magnesiumdiborid schon bei 40 Kelvin in den supraleitenden Zustand übergeht. Die Substanz ist

eine einfache intermetallische Verbindung und – noch frappierender – gehört dem konventionellen Typ an, für den der BCS-Mechanismus gilt. Ihre ziemlich hohe Sprungtemperatur verdankt sie der geringen Masse des Bors, das die Leitungselektronen beisteuert und ein starres Untergitter bildet. Trotz dieser etwas komplizierteren Verhältnisse gelang es den Theoretikern innerhalb eines Jahres, ihren T_c -Wert korrekt zu berechnen.

Hoffnungen auf einen konventionellen Supraleiter mit noch weit höherer Sprungtemperatur hatten in den späten 1960er Jahren bereits Ginzberg und Neil W. Ashcroft von der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York) geweckt. Gemäß ihren Kalkulationen sollte in Wasserstoff, falls er sich unter sehr hohem Druck in den metallischen Zustand überführen ließe, die Schwingungsenergie der Ionen so groß sein, dass selbst bei nur mäßig starker Kopplung mit den Elektronen

der T_c -Wert ziemlich hoch liegen würde. Leider hat sich die Metallisierung von Wasserstoff als äußerst schwierig erwiesen und ist bis heute nicht zweifelsfrei geglückt. Doch trifft, wie Ginzberg und Ashcroft anmerkten, das Argument der beiden auch auf wasserstoffreiche Verbindungen zu.

Theorie bestätigt

Tatsächlich scheint sich dies nun beim Schwefelwasserstoff zu bewahrheiten. Der neue Befund passt auch zum Ergebnis einer theoretischen Untersuchung, die Defang Duan von der Jilin-Universität in Changchun (China) vor einem Jahr veröffentlichte. Demnach sollte die Verbindung H_2S bei 200 Gigapascal zu einem Supraleiter mit einer Sprungtemperatur im Bereich zwischen 190 und 200 Kelvin werden. Zwar haben Drozdov und seine Kollegen mit H_2S gearbeitet, doch zersetzt sich dieses Gas unter hohem Druck offenbar in Schwefel und H_2S .

Als die Mainzer Forscher ihren vorläufigen Bericht im Dezember 2014 auf den Preprint-Server arXiv stellten, sorgte er sofort für große Aufregung. Der Physiker Fan Zhang von der University of Texas nennt die Entdeckung historisch und erwartet weit reichende Konsequenzen. Mit einem Supraleiter bei Zimmertemperatur ließe sich elektrischer Strom viel leichter und preiswerter erzeugen und transportieren. Auch wären Kernspintomografen und andere Maschinen, die mit supraleitenden Magneten arbeiten, wesentlich einfacher und kostengünstiger zu betreiben.

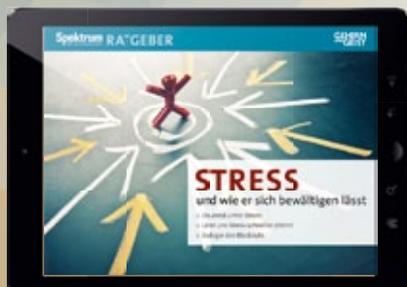
Sofern sich die neuen Ergebnisse bestätigen, könnten andere Wasserstoffverbindungen – etwa mit Platin, Kalium, Selen oder Tellur – ebenfalls aussichtsreiche Kandidaten für Hochtemperatursupraleiter sein. Zhang in Dallas und Yugui Yao von der Technischen Universität Peking (China) halten dagegen am Schwefelwasserstoff fest

WENN DER SCHUH EINMAL DRÜCKT:

Spektrum RATGEBER

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

ALS PDF
ZUM
DOWNLOAD



Ratgeber »Stress« (€ 4,99)



Ratgeber »Glück« (€ 4,99)



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

ISTOCK/IBGBLUE

Diese und weitere Ausgaben erhalten Sie unter:

www.spektrum.de/ratgeber

Hier QR-Code per
Smartphone scannen!



und wollen das Material durch Feinjustierungen optimieren. Ihren Berechnungen nach könnte es gelingen, die Sprungtemperatur auf 280 Kelvin – also über den Gefrierpunkt von Wasser – zu katapultieren, wenn man 7,5 Prozent des Schwefels durch Phosphor ersetzt und den Druck auf 250 Gigapascal er-

höht. Dann würde Kühlen mit Eis genügen, um Strom widerstandsfrei zu transportieren.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 525, S. 40–41, 3. September 2015

Nature 524, S. 277, 20. August 2015

Igor I. Mazin ist Forscher am Naval Research Laboratory in der US-Hauptstadt Washington und **Edwin Cartlidge** Wissenschaftsjournalist in Rom. Bei dem Artikel handelt es sich um eine Zusammenfassung zweier von ihnen verfasster »Nature«-Berichte durch **Gerhard Trageser**. Er ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

HOCHENERGIEPHYSIK

Im Sog der Plasmawelle

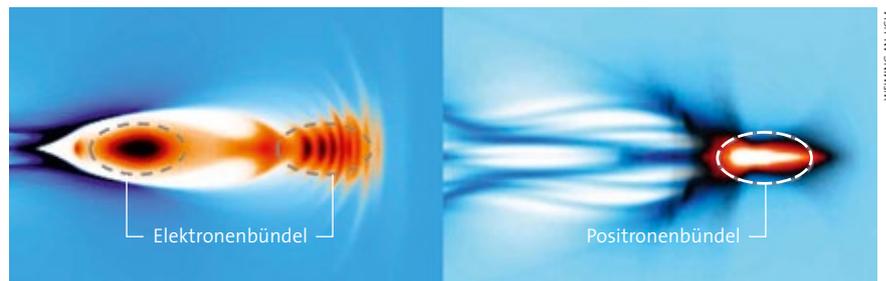
Eine neue Technik benötigt nur wenige Zentimeter, um Elektronen und Positronen auf Geschwindigkeiten zu bringen, die sie sonst nur in großen Teilchenbeschleunigern erreichen.

VON JANOSCH DEEG

In gigantischen Anlagen schießen Teilchenphysiker Atombauusteine aufeinander und fahnden in den Splittern nach den Bausteinen der Materie. Für die dafür nötigen Energien brauchen die Forscher allerdings immer längere Rennstrecken.

Dagegen passt ein so genannter Kielfeldbeschleuniger fast auf einen Labortisch. Ein US-Forscherteam vom Lawrence Berkeley National Laboratory um Wim Leemans berichtete im Dezember 2014 von Teilchenenergien im Bereich von mehr als vier Gigaelektronenvolt (*Physical Review Letters* 113, 245002, 2014) – gewonnen auf einer Strecke von nur neun Zentimetern. Die Energie bei diesem neuen Typ von Beschleunigern ist zwar noch 1000-mal geringer als jene, welche die größten herkömmlichen Apparate erreichen, etwa der Large Hadron Collider (LHC) bei Genf. Aber dieser braucht für vergleichbare Geschwindigkeiten fast 100 Meter. Die letztlich deutlich höheren Energien erreicht der LHC, weil die Teilchen einen 27 Kilometer langen Weg mehrmals im Kreis durchlaufen und Elektromagnete sie dabei immer wieder anstoßen.

Der Kielfeldbeschleuniger hingegen bringt die Teilchen mit einem extrem intensiven Laserblitz auf Tempo. Der Laserstrahl wird dazu in ein Plasma geschossen. Das kann man sich als ein extrem heißes Gemisch aus frei bewegli-



Diese Bilder aus Computersimulationen zeigen, wie zwei Bündel aus Elektronen (links) oder eines aus Positronen (rechts) mit dem umgebenden Plasma wechselwirken. Die Teilchenpakete (gestrichelte Bereiche) erzeugen Kielwellen (jeweils weiß). Im Fall der Elektronen werden darin nachlaufende Elektronen beschleunigt, im Fall der Positronen erhält der hintere Bereich des Projektils zusätzliche Energie.

chen Ionen und Elektronen vorstellen. Fegt nun das Laserlicht durch das Plasma, verdrängt sein elektromagnetisches Feld die leichten Elektronen entlang seines Wegs. Die deutlich schweren und damit trägeren Ionen verharren hingegen überwiegend an ihrem Ort. Das Licht hinterlässt also eine positiv geladene Spur. Diese zieht die beiseitegedrängten Elektronen augenblicklich wieder an und verdichtet sie. Direkt hinter dem Laserpuls folgt ein winziger Bereich, in dem enorm hohe Feldstärken zwischen den Teilchen des Plasmas herrschen. Elektronen in dieser winzigen Blase werden heftig mitgezogen: Sie surfen gewissermaßen auf der Kielwelle des Laserblitzes und beschleunigen dadurch enorm.

Bereits Ende der 1970er Jahre berichteten Physiker von diesem Prinzip. Doch erst allmählich gelingt es den Wissenschaftlern, die damit gewonnenen Teilchenströme ausreichend zu kontrollieren, um sie für anschließende Experimente bereitzustellen. Denn wie Surfanfänger fallen die meisten Elektronen von der Welle, werden von nachfolgenden Fronten überrollt und gehen im Meer aus Ionen sowie anderen Elektronen verloren. Sorgfältig muss deshalb im Plasma ein Kanal mit passender Dichte geformt und der Durchmesser des Laserpulses an diese Trasse angepasst werden. Zudem braucht die Methode ungemein leistungsfähige Laser – Leemans benutzte einen der weltweit stärksten –, und das Plasma muss sehr

genau kontrolliert werden. Beides stellt hohe experimentelle Anforderungen.

Andere Arbeitsgruppen jagen statt Lichtpulsen Bündel aus Elektronen durch das Plasma. Ähnlich wie das Laserlicht verdrängen diese lediglich die freien Elektronen, nicht aber die Ionen. Auch hier entsteht hinter dem Teilchengeschoss ein positiv geladener Raumbe- reich. Das starke Feld hinter den voraus- eilenden Elektronen kann nun ein zwei- tes Paket aus Elektronen beschleunigen. Mit Hilfe dieser Methode ist einer Forschergruppe um Mike Litos vom US-amerikanischen SLAC National Ac- celerator Laboratory etwa zur gleichen Zeit wie Leemans' Team ein beachtlicher Fortschritt gelungen (*Nature 515*, S. 92–95, 2014). Die Physiker feuerten zwei Elektronenbündel mit einem Abstand von der Dicke eines menschlichen Haars mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in eine Röhre mit Plasma. Die Elektronen des hinteren Pakets gewannen so fast zwei Gigaelektronvolt an zusätzlicher Energie. Dabei übertrug sich rund ein Fünftel der eingesetzten Energie auf die Elektronen. Zudem war ihre Geschwin- digkeit sehr gleichmäßig verteilt. Dies

ist eine wichtige Voraussetzung, um das Strahlenbündel tatsächlich für weitere Anwendungen benutzen zu können.

Auch Positronen können surfen

Eine weitere Forschergruppe am SLAC, zu der auch Litos gehörte, berichtete schließlich im August 2015, dass sie auf ähnliche Weise sogar die positiv gela- denen Antiteilchen der Elektronen – Po- sitronen – auf mehrere Gigaelektron- volt gebracht hat (*Nature 524*, S. 442–445, 2015). Positronen sind in diesen Ex- perimenten deutlich schwieriger zu handhaben, da sie wegen ihrer Ladung mit den Bestandteilen des Plasmas voll- kommen anders wechselwirken: Sie zie- hen die Elektronen an, statt sie abzusto- ßen. Doch die Physiker konnten diesen Effekt ausnutzen und die Plasmadichte so steuern, dass sich die Energie, welche die Vorderseite eines Bündels verliert, gerade auf die Positronen in dessen Rückseite überträgt und sie extrem be- schleunigt. Da beispielsweise in so ge- nannten Linearbeschleunigern Elektro- nen und Positronen kollidieren, könnten die neuen Experimente dabei helfen, bei bestehenden oder geplanten Anla-

gen für beide Teilchenarten schneller deutlich höhere Energien zu erreichen.

Direkt für Untersuchungen eignen sich die derart beschleunigten Elektro- nen und Positronen heute noch nicht, sondern eher als Quelle für weitere An- wendungen – etwa, um intensive Rönt- genstrahlung zu gewinnen. Diese ent- steht beim Abbremsen der Elektronen und ist in der Strukturforschung und bei Medizinern begehrt. Ausgereifte Kiefeldbeschleuniger könnten direkt in den Laboren zum Einsatz kommen, so dass Forscher in einigen Fällen nicht mehr auf die bisher verwendeten Elekt- ronlaser einzelner großer Anlagen an- gewiesen wären. Um die erreichbaren Teilchenenergien noch deutlich zu er- höhen, gibt es bereits Versuche, mehre- re Plasmabeschleuniger hintereinander- zuschalten. Mit ihrer einzigartigen Fä- higkeit, auf kurze Distanz enorme Ge- schwindigkeiten zu erzeugen, verändert die Technik radikal die Weise, wie Physi- ker über das Design zukünftiger Experi- mente nachdenken.

Janosch Deeg ist Physiker und freier Wissen- schaftsjournalist in Heidelberg.

KREBSIMMUNTHERAPIE

Die Bremsen der Körperabwehr lösen

Spezielle Immunmedikamente können bei Lungenkrebs zu Tumorrückbildungen führen – und zwar umso effektiver, je stärker mutiert die Zellen sind.

VON EMMANUELLE VANIET

Die Behandlung mit so genannten Checkpoint-Inhibitoren – Molekü- len, die das Immunsystem beeinflus- sen – hat sich als überaus wirksam er- wiesen, um Lungenkrebs bei Rauchern zu bekämpfen. Es handelt sich um eine Spielart der Krebsimmuntherapie, also des Ansatzes, die Immunabwehr auf Krebszellen im Körper zu lenken. Aller- dings schlägt das Verfahren nicht bei allen Patienten gleich gut an. Wissen- schaftler vom Memorial Sloan Ketter- ing Cancer Center (New York) sowie vom Netherlands Cancer Institute

(Amsterdam) haben jetzt herausgefunden, woran dies liegen könnte.

Schon vor einem Jahrhundert pos- tulierte Paul Ehrlich, unser Immunsys- tem könne entartete Zellen erkennen und vernichten. Diese mittlerweile im- mer wieder bestätigte Hypothese liegt Immuntherapien gegen Krebs zu Grun- de, die darauf abzielen, körpereigene Schutzmechanismen anzukurbeln oder zu verstärken. Doch wenn die Immun- abwehr Krebszellen bekämpfen kann – warum entstehen dann Tumoren und geraten allzu oft außer Kontrolle?

Der Grund liegt unter anderem in körpereigenen »Immunbremsen«. Wis- senschaftler gehen davon aus, dass vor allem zytotoxische T-Zellen – Akteure der Immunabwehr, die gegen viren- oder bakterieninfizierte Zellen vorge- hen – an der Immunüberwachung beteiligt sind. Anfang der 1990er Jahre erkannten Forscher allerdings, dass die potenten Wachen verschiedene Kon- trolleinrichtungen besitzen, Check- points genannt, die eine überschießen- de Immunreaktion verhindern. Dabei handelt es sich um Rezeptoren auf der

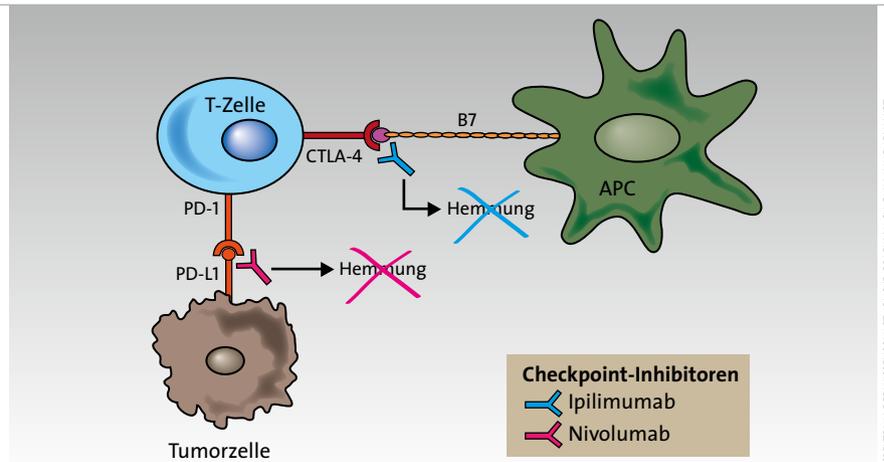
Oberfläche der T-Zellen. Wird ein solcher Checkpoint-Rezeptor von einem passenden Bindungspartner (»Ligand«) besetzt, drosselt die T-Zelle ihre Aktivität und hört auf, Zellen zu vernichten.

Sowohl die zum Immunsystem gehörenden dendritischen Zellen als auch Tumoren können solche Bindungspartner präsentieren – und die Immunantwort damit unterdrücken. Um dem entgegenzuwirken, haben Forscher spezielle Antikörper entwickelt. Diese sogenannten Checkpoint-Inhibitoren blockieren die Checkpoint-Rezeptoren und verhindern, dass diese von Liganden besetzt werden. Sie wirken so der Hemmung der Körperabwehr entgegen. Einer der ersten zugelassenen Arzneistoffe dieses Wirkprinzips war Ipilimumab.

2010 veröffentlichte das Pharmaunternehmen »Bristol-Myers Squibb« Studienergebnisse, laut denen Hautkrebspatienten im Endstadium, die Ipilimumab erhalten, signifikant länger leben als nicht damit behandelte Patienten (*The New England Journal of Medicine* 363, S. 711–723, 2010). Von den Studienteilnehmern, die am fortgeschrittenen malignen Melanom (schwarzen Hautkrebs) litten und eine Ipilimumab-Therapie bekamen, lebten dreieinhalb Jahre nach Beginn der Behandlung noch 20 Prozent, und zwar häufig ohne Anzeichen der Krankheit. Ohne das Medikament waren es nur 5 Prozent. Diese viel versprechenden Ergebnisse führten 2011 zur Zulassung von Ipilimumab als Arzneistoff – in den USA wie in Europa. Heute zählt der Antikörper zu den Standardmitteln zur Behandlung des fortgeschrittenen Melanoms.

Die neue Therapie ist nicht ohne Nebenwirkungen: Durch die Entfesselung des Immunsystems können schwere entzündliche Reaktionen auftreten, meist Darm, Haut oder Leber betreffend. Diese haben die Ärzte aber mittlerweile gut im Griff. Die Kosten allerdings können beträchtliche Höhen erreichen, da die Behandlung über sehr teure Infusionen erfolgt, die alle paar Wochen verabreicht werden müssen – wahrscheinlich über mehrere Jahre hinweg.

Das waren jedoch nicht die Hauptgründe dafür, warum viele Onkologen



T-Zellen werden gehemmt, wenn ihr Rezeptor CTLA-4 an das B7-Molekül einer antigen-präsentierenden Zelle (APC) bindet oder ihr Rezeptor PD-1 an den Liganden PDL-1 auf Tumorzellen. Die Antikörper Ipilimumab und Nivolumab unterbinden diese Hemmung.

den neuen Wirkstoff zunächst skeptisch beurteilten. Schwarzer Hautkrebs ist zwar eine der tödlichsten Krebsarten, aber auch bekannt dafür, sehr gut auf Immuntherapien aller Art anzusprechen: Er gilt als besonders »immunogen«. Bis 2012 herrschten deswegen Zweifel darüber, ob sich die erfreulichen Ergebnisse aus der Hautkrebstherapie auf andere Krebsarten übertragen lassen würden.

Erfolg gegen Lungenkrebs

Großes Aufsehen erregte eine Studie, laut der fast jeder fünfte Lungenkrebspatient auf die Behandlung mit dem Checkpoint-Inhibitor »Nivolumab« anspricht, der an den Checkpoint-Rezeptor PD-1 auf der Oberfläche von T-Zellen bindet. Die klinischen Erfolge, die sich mit Nivolumab erzielen ließen, hielten auch ein Jahr nach Beginn der Behandlung noch an. Das war deshalb so bemerkenswert, weil Lungenkrebs – die tödlichste Krebsart weltweit – als besonders therapieresistent gilt. Weniger als drei Prozent der Patienten im fortgeschrittenen Stadium sprechen auf konventionelle Therapien an, und dies auch meist nur für kurze Zeit. Die verheißungsvollen Erfolge mit Nivolumab bestätigten sich später in größer angelegten Untersuchungen. So belegte eine klinische Phase-III-Studie eindeutig bessere und vor allem anhaltende Behandlungseffekte, verglichen mit der Verabreichung des üblichen

Chemotherapeutikums Docetaxel. Deshalb ließ die amerikanische Arzneimittelbehörde FDA den Antikörper im März dieses Jahres vorzeitig für die Behandlung des fortgeschrittenen nichtkleinzelligen Bronchialkarzinoms zu.

Allerdings rätseln Forscher und Mediziner darüber, warum die Therapie nur knapp 20 Prozent der Patienten hilft. Die bloße Tatsache, dass der Ligand des Checkpoint-Rezeptors PD-1 auf den Tumorzellen vorkommt, erwies sich als nicht ausschlaggebend für den Erfolg der Nivolumab-Behandlung. Manche Patienten, deren Tumoren den Liganden im Übermaß produzieren, sprechen auf die Therapie nicht an; bei anderen wiederum, deren Krebszellen den Liganden nicht herstellen, wirkt die Behandlung. Jedoch fiel den Forschern schon 2013 auf, dass die Therapie öfter bei Rauchern anschlägt als bei Patienten, die nie eine Zigarette angefasst haben (»never smokers«, die 10 bis 15 Prozent aller Lungenkrebsfälle ausmachen). Das warf die Frage auf: Besteht ein Zusammenhang zwischen der Wirkung von Checkpoint-Inhibitoren und der Menge an Mutationen, die Krebs erregende Substanzen des Tabakrauchs im Erbgut hinterlassen?

Im April dieses Jahres veröffentlichten Forscher um Timothy Chan von Memorial Sloan Kettering Cancer Center (New York) und Ton Schumacher vom Netherlands Cancer Institute (Amsterdam) neue Erkenntnisse hierü-

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSSE-CARSTEN, ANCH-EMMANUELE VAN NET

ber, die sie bei Genomsequenzierungen gewonnen hatten. Indem sie das Erbgut der Krebszellen von 34 NSCLC-Patienten entzifferten, stellten sie fest: Nur 10 bis 20 Prozent der Patienten, deren Tumorzellen eine niedrige Anzahl an Mutationen aufwiesen, sprachen auf eine Behandlung mit Checkpoint-Inhibitoren an. Patienten hingegen, deren Tumorzellen auffällig stark mutiert waren, erfreuten sich infolge der Therapie viel häufiger – in 70 bis 80 Prozent der Fälle – einer Rückbildung des Tumors (*Science* 348, S. 124–128, 2015). Dabei berücksichtigten die Forscher nur solche Mutationen, die zur Herstellung defekter Proteine in der Zelle führen. Lungenkrebszellen zeichnen sich durch besonders viele solcher Defekte aus, ebenso wie Haut- und Darmkrebszellen. Denn sie entstehen in Geweben, die besonders intensiv erbgutverändernden Faktoren wie Zigarettenrauch, UV-Strahlung oder mutagenen Nahrungsbestandteilen ausgesetzt sind.

Zellen des nichtkleinzelligen Bronchialkarzinoms tragen im Durchschnitt 200 Mutationen, die schadhafte Proteine in der Zelle zur Folge haben. Solche aus Tumoren, die in der Studie von Chan und Schumacher nur sehr schlecht auf Checkpoint-Inhibitoren ansprachen, trugen durchschnittlich weniger als 150. Geschwulste hingegen, die sich mit diesen Arzneistoffen zurückdrängen ließen, zeichneten sich durch eine doppelt so hohe Mutationslast aus.

Warum erweisen sich Checkpoint-Inhibitoren ausgerechnet dann als besonders wirksam, wenn die Tumorzellen hoch mutiert sind? Schuld daran sind die T-Zellen, die, um anzugreifen, bestimmte Strukturen auf den Tumorzellen als Ziele erkennen müssen – so genannte Antigene. Die Erkennung funktioniert umso besser, je körperfremder die Antigene sind. Zellen können alle möglichen Proteine als Antigene präsentieren – auch intakte und normal hergestellte. Um nicht gesundes Gewebe zu attackieren, »lernen« T-Zellen deshalb, dass sie ausschließlich gegen körperfremde Antigene vorgehen sollen – etwa jene aus Viren oder Bakterien. Antigene aus körpereigenen Proteinen dagegen schonen sie.

Stark mutiert und angreifbar

Wenn Krebszellen viele Mutationen tragen, stellen sie abnorme Proteine her, die sie als »Neoantigene« präsentieren: Molekülstrukturen, die T-Zellen fremd vorkommen und die infolgedessen attackiert werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine entartete Zelle solche potenten Angriffsziele bietet, erhöht sich mit der Zahl ihrer Mutationen.

Es ist nicht das erste Indiz dafür, dass jene Zellschäden, die Krebs besonders stark begünstigen, zugleich auch eine intensivere Abwehrreaktion des Körpers auf sich ziehen können. Ende 2014 berichteten Chan und seine Mitarbeiter: Tumorzellen von Patienten, die

sehr gut auf Ipilimumab angesprochen hatten, präsentierten nicht nur diverse Neoantigene. Einige dieser Molekülstrukturen ähnelten zudem bekannten Virusantigenen, die das Immunsystem effizient angreifen kann (*N. Engl. J. Med.* 371, S. 2189–2199, 2014).

Die Behandlung mit Checkpoint-Inhibitoren nimmt den Tumor nicht direkt ins Visier – sie überlässt den Angriff der Immunabwehr des Patienten. Das hat Vorteile: Beispielsweise kann das Immunsystem seine Angriffsziele schneller und besser justieren als jeder Krebsmediziner. Dies sollte dem Problem entgegenwirken, dass Tumoren gegen Arzneistoffe resistent werden, woran Therapien immer wieder scheitern. Zudem erhoffen sich Onkologen von immuntherapeutischen Ansätzen die Ausbildung eines Immungedächtnisses im Körper des Patienten, wie es bei Schutzimpfungen entsteht. Dieses kann uns mitunter lebenslang vor gefährlichen Erregern schützen. Es gibt bereits Studien, laut denen die klinische Wirkung von Checkpoint-Inhibitoren noch zehn Jahre nach der Behandlung anhält. Diese Daten machen Hoffnung, dass ein entfesseltes Immunsystem tatsächlich für längere Zeit die Fähigkeit erlernen kann, gestreute Krebszellen aufzuspüren, noch bevor sie zu Metastasen auswachsen.

Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

MATERIALFORSCHUNG

Biomolekül als Elektronikbaustein

Obwohl die Porphyrine aus der Nanoelektronik der Natur nicht wegzudenken sind, hat diese Klasse komplexer Ringmoleküle bisher keine kommerzielle Anwendung gefunden. Das könnte sich nun ändern: Zwei neue Studien belegen, dass sich molekulare Transistoren und Solarzellen daraus fertigen lassen.

VON MICHAEL GROSS

Wir Menschen brauchen sie zum Atmen und zur Entgiftung des Körpers, Pflanzen zum Einfangen von Licht bei der Fotosynthese und Bakterien sowohl für die Verwertung als auch

die Erzeugung von Wasserstoff. Kurzum, Zellen der unterschiedlichsten Lebensformen nutzen Porphyrine für unzählige Funktionen. Die ringförmigen Moleküle bilden mit Eisen die Sauer-

stoff bindende Hämgruppe im roten Blutfarbstoff und mit Magnesium das für Pflanzen unentbehrliche Chlorophyll. Als Bestandteil der Enzyme aus der riesigen Familie der P450-Cytochro-

Das Märchen von der Selbstregulation des Marktes

Auf dem Energiesektor führt das freie Spiel der Kräfte zum Kollaps.

Die Wirtschaft ist – wie das Wetter – ein komplexes Phänomen, das sich nicht durch einfache Modelle beschreiben lässt. Doch während niemand auf die Idee käme, ein Klimamodell aufzustellen, in dem der lokale Ausgleich der Temperaturunterschiede global zu dauerhaft mildem Wetter führt, behauptet das Standardmodell der Marktwirtschaft genau dies: Angebot und Nachfrage pendeln sich in freiem Wechselspiel stets zu Preisen ein, welche die optimale Verteilung aller Güter garantieren.

Spätestens die völlig überraschende Bankenkrise von 2008 hat den Ruf der gängigen einfachen Markttheorien angekratzt. Dafür stieg das Prestige so genannter Ökonophysiker, die seit rund 20 Jahren komplexe Modelle aus Strömungsforschung, statistischer Mechanik und Festkörperphysik auf Wirtschaftsprozesse anwenden und zeigen, wie instabil diese sich verhalten. An der Universität Bremen hat nun eine Gruppe theoretischer Physiker um Stefan Bornholdt die »Ökonophysik anpassungsfähiger Energiemärkte« untersucht und in Simulationen demonstriert, dass solche Märkte zu katastrophalem Kollaps neigen (*Physical Review E* 92, 012815, 2015).

Ihr Modell beschreibt Individuen, die flexibel auf kurzfristig schwankende Energiepreise reagieren können, indem sie beispielsweise mit dem Anschalten der Waschmaschine warten, bis der Strom ein wenig billiger wird. Ein Marktwirtschaftler wird darin das ideale Mittel sehen, den Strombedarf einem Energieangebot anzupassen, das bei hohem Anteil von Wind- und Sonnenenergie rasch schwankt: Wenn Strom aktuell knapp und somit teurer wird, drosseln die Verbraucher ihre Nachfrage und warten in der Hoffnung, dass der Preis mit steigendem Angebot bald wieder fällt.

Doch wie die Simulation ergibt, pendelt sich auf diesem Markt gar kein Gleichgewicht ein, weil sich die Stromkunden wie beim Sommerschlussverkauf massenhaft auf die billigen Angebote stürzen und dadurch akuten Energiemangel erzeugen. Schon geringe Strompreisänderungen führen so zu derart drastischen Nachfragesprüngen, dass sich Systemkatastrophen kaum abwenden lassen.

In der Bremer Modellrechnung sieht der Computerwissenschaftler Alex Pentland vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge keinen Ausnahmefall, sondern die Demonstration eines typischen Schwachpunkts einfacher Marktmodelle, die seit Adam Smith (1723–1790) auf ein Gleichgewicht bauen, das sich durch unabhängig voneinander handelnde Akteure ganz von selbst einstellen soll. In Wirklichkeit, so Pentland, sind Instabilitäten wie Börsenblasen und Blitz-Crashes in einer modernen Gesellschaft vorprogrammiert – erst recht bei vielen mobil vernetzten Konsumenten, die sofort nachmachen, was anderen im Augenblick Vorteil verspricht (*Nature* 525, S. 190–191, 2015).

Dass einfache Marktmodelle insbesondere auf dem Energiesektor nur wenig mit der Wirklichkeit zu tun haben, galt allerdings schon, bevor Internet und Smartphones aufkamen. Energiemärkte hängen seit jeher von politischen Rahmenbedingungen ab. Der Politologe Mohssen Massarrat wies vor Jahren bereits in dieser Zeitschrift darauf hin, dass der Ölpreis niemals dem freien Spiel von Angebot und Nachfrage gehorcht hat, weil dieser Markt immer von politischen Interessen gelenkt wurde (*Spektrum der Wissenschaft* 11/2006, S. 54–61).

Ein aktuelles Beispiel liefert Otmar Edenhofer vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (*Science* 349, S. 1286–1287, 2015). Er rechnet vor, wie sehr die Nutzung fossiler Energieträger, insbesondere der Kohle, von enormen direkten und indirekten staatlichen Subventionen gefördert wird – Energiewende hin oder her.



Michael Springer

me sind sie außerdem an einer schier unüberschaubaren Vielzahl von chemischen Reaktionen beteiligt, unter anderem auch am Abbau von Schadstoffen in der Leber.

Dabei ist ihre Struktur recht kompliziert: Vier fünfgliedrige Ringe verbinden sich über jeweils ein Brückenkohlenstoffatom zu einem größeren Kranz, der als gigantischer Kreisverkehr für Elektronen dient. Während im Benzol sechs Elektronen rotieren, bringt es der Porphyrinring auf 18 und zählt damit ebenfalls zu den aromatischen Verbindungen, die sich durch besondere Stabilität auszeichnen. Jeder der vier Fünfringe enthält ein Stickstoffatom, das dem Innenraum des Kranzes zugewandt ist und dort als Andockstelle für Metallionen dienen kann, wie etwa Eisen im Häm oder Magnesium im Chlorophyll.

Eignung als Transistor und Solarzelle

Trotz ihrer komplizierten Struktur sind diese Moleküle überraschend leicht herzustellen, und die Evolution fand sie offenbar außerordentlich nützlich. Doch anders als ihre noch komplizierteren künstlichen Verwandten, die Phthalocyaninfarbstoffe, haben sie bisher keine kommerzielle Anwendung gefunden. Zwei voneinander unabhängige Studien könnten jetzt dazu beitragen, dass sich das ändert.

Die Arbeitsgruppen des Materialwissenschaftlers Jan Mol und des Chemikers Harry Anderson, beide in Oxford, haben gemeinsam mit dem Team des Quantenphysikers Andrew Briggs an der University of Lancaster modifizierte Porphyrine als Klammer zwischen je zwei Blätter aus Graphen eingefügt – jener zweidimensionalen, an sechseckigen Maschendraht erinnernden Kohlenstoffmodifikation, die erst vor elf Jahren isoliert werden konnte. Zu diesem Zweck brachten sie an zwei gegenüberliegenden Brückenkohlenstoffatomen des Porphyrins »Klebstreifen« an: große, schmetterlingsförmige Aromaten, die sich flach auf die Graphenschichten legen (Bild rechts oben). Da Porphyrin ebenfalls aromatisch und planar ist, könnte es jedoch selbst das

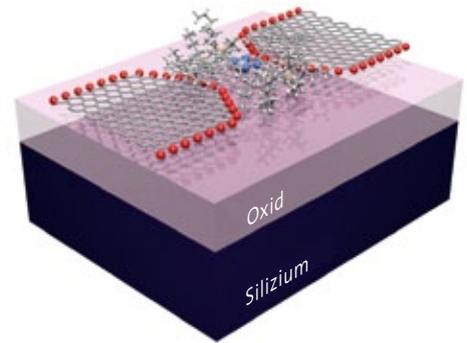
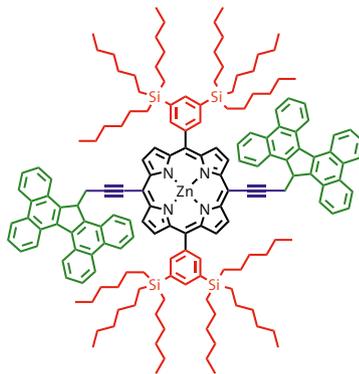
Gleiche tun. Um das zu verhindern, bestückten die Forscher die beiden übrigen Brückenköpfe mit sperrigen Molekülgruppen. Dadurch konnte sich das Porphyrin nicht seinerseits seitlich an eines der Graphenblätter schmiegen, sondern fand ausschließlich in der Lücke zwischen zweien davon Platz.

Dieses raffinierte molekulare Konstrukt zeigt faszinierende elektronische Eigenschaften. So konnten die Wissenschaftler – zunächst nur bei extremer Kälte, aber später auch bei Raumtemperatur –, an ihm die elementaren Funktionen eines Schaltelements nachweisen. Noch ist dieser Einzelmolekültransistor nicht serienreif, da der Versuch lediglich bei einem Teil der vom Porphyrin überbrückten Graphenschichten gelang. Doch mit einigen Detailverbesserungen hat er vielleicht eine Chance, wenn die Miniaturisierung der Elektronikbausteine demnächst den Punkt erreicht, wo jeder einzelne Transistor nur noch die Größe eines Moleküls haben darf.

Damit sind die Fähigkeiten der Porphyrine aber noch keineswegs erschöpft. Vielmehr eignen sie sich offenbar auch für Solarzellen. Das haben Christof Wöll und seine Mitarbeiter am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) demonstriert. Die Forscher integrierten die Ringmoleküle in eine schichtweise aufgebaute metallorganische Gerüstverbindung (Bild rechts). Ebenso wie im Chlorophyll kommt es dabei zur Stapelung von Porphyrinen, und wie in der Pflanzenzelle weisen diese einen lichtelektrischen Effekt auf, können also mit Hilfe von Lichtenergie elektrische Ladungen trennen.

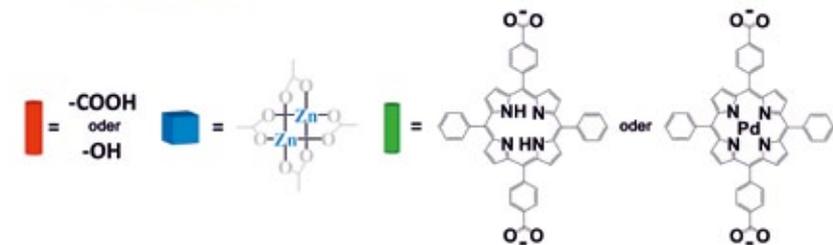
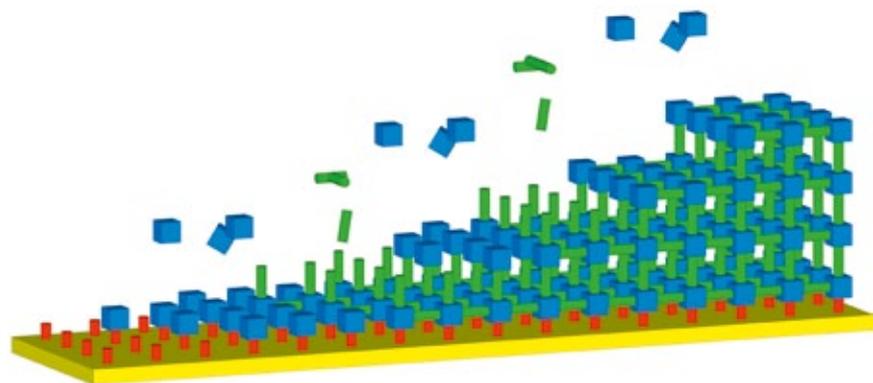
Bereits ohne ein Metallatom im Zentrum der Ringstruktur fungierte das neue Material als Solarzelle, und mit eingebautem Palladiumatom betrug der Wirkungsgrad immerhin 0,45 Prozent. Das klingt nach nicht viel, ist aber für ein einfaches Laborsystem aus nur einem Material durchaus beachtlich. Ein Grund dafür dürfte die hohe Beweglichkeit der gebildeten Ladungsträger sein.

Nach theoretischen Berechnungen, welche die Arbeitsgruppe von Thomas Heine an der Jacobs University Bremen im Rahmen des gemeinschaftlichen



MOLL, J. A. ET AL.: GRAPHENE-PORPHYRIN SINGLE-MOLECULE TRANSISTORS. IN: *NANOSCALE*, 7, 5, 1918-1922, 2015. FIG. 3A-B, F, G, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WU, WV, WW, WX, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ.

Wissenschaftler aus England schufen einen molekularen Transistor, indem sie einen Porphyrinring (schwarz) zwischen zwei Ebenen, bienenwabenartigen Graphenmolekülen einfügten. Schmetterlingsförmige »Klebstreifen« (grün) sorgen für die Haftung, und Abstandhalter (rot) verhindern, dass sich das Porphyrin flach auf nur eines der beiden Graphen-Blätter legt.



MITFELDR. VON CHRISTOF WÖLL, KIT (ULI, J. WÖLL, C. ET AL.: PHOTONINDUZIERTE ERZEUGUNG VON LADUNGSTRÄGERN IN ERTRÄGTEN MOF-DÜNNESCHICHTEN. IN: *ANGEWANDTE CHEMIE*, 127, 5, 7549-7553, 2015. FIG. 2A)

Mittels Zinkatomen und geeignet abgewandelten Porphyrinmolekülen bauten Forscher am Karlsruher Institut für Technologie eine metallorganische Gerüstverbindung, die als Solarzelle dienen kann.

Projekts mit dem KIT durchführte, scheinen die überraschend guten Ergebnisse aber vor allem damit zusammenzuhängen, dass das Material ebenso wie der gängige Halbleiter Silizium eine so genannte indirekte Bandlücke hat. Das bedeutet, dass sich die einmal getrennten Ladungen nicht ohne Weiteres sofort wieder vereinigen können, weil sich ihr Impuls unterscheidet. Dadurch verlängert sich die Zeit, in der sie umherwandern und dabei zu den Elektroden gelangen können. Indirekte Bandlücken waren nach Aussage der

Forscher bei organischen Halbleitern bisher nicht bekannt.

Das KIT-Team ist überzeugt, durch Feinabstimmungen in der Gerüststruktur die Eigenschaften seiner molekularen Solarzelle weiter verbessern zu können. Zu deren Vorteilen zählt in erster Linie ihre Flexibilität. Anders als herkömmliche Solarzellen auf Siliziumbasis ließe sie sich auch auf Textilien aufbringen.

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



EVOLUTION

Der späte Siegeszug der Tyrannosaurier

Mindestens 80 Millionen Jahre lang führten sie ein Schattendasein. Erst kurz vor dem Ende des Erdmittelalters entwickelten sich gigantische Formen wie der berühmte *Tyrannosaurus rex*, und ihre Artenzahl explodierte geradezu.

Von Stephen Brusatte



Die Szene könnte sich vor 125 Millionen Jahren im Gebiet des heutigen China abgespielt haben: Etwa hundegroße Tyrannosaurier der Gattung *Dilong* verteidigen ihre Beute gegen einen elefantengroßen, neun Meter langen *Yutyrannus*.

Ganzhou, eine Stadt in Südostchina in der Provinz Jiangxi, 2010: In einer Baugrube stößt eine Baggerschaufel plötzlich auf sehr harten Untergrund. Der Baggerführer fürchtet Schlimmes – massiven Fels oder eine alte Wasserleitung, in jedem Fall ein Hindernis, das die Errichtung des hier vorgesehenen Industrieparks verzögert. Doch als sich der Staub verzieht, sieht er nur eine Unmenge Knochen von teils riesigen Ausmaßen.

Tatsächlich hatte der Mann ein enormes Dinosaurierskelett gefunden. Wie sich später herausstellte, handelte es sich um eine neue Art der Tyrannosaurier, also einen Verwandten von *Tyrannosaurus rex*. Wenige Jahre nach der Entdeckung luden mich meine chinesischen Kollegen ein, sie bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Fossilien zu unterstützen. Mit unseren Ergebnissen gingen wir im Mai 2014 an die Öffentlichkeit. Wir nannten die Kreatur *Qianzhousaurus sinensis*. Scherzhaft sagen wir statt des Zungenbrechers auch *Pinocchio rex* – das Reptil trug eine auffallend lange, schmale Schnauze.

Dieses Fossil reiht sich in eine Fülle anderer bahnbrechender Tyrannosaurierfunde im letzten Jahrzehnt ein, die unserem Bild von dieser Gruppe der Dinosaurier endlich klare Konturen geben. Denn die Evolution des 13 Meter langen und fünf Tonnen schweren *Tyrannosaurus rex*, der seit seiner Entdeckung vor über 100 Jahren mehr als andere Riesensaurier die Fantasie der Menschen beschäftigt, blieb während des ganzen 20. Jahrhunderts ein Rätsel. Weil das Monster in Körperbau und Größe so wenig zu anderen Raubsauriergruppen passte, ließ es sich schwer in die Dinosauriersystematik einordnen. Klar war nur, dass praktisch alle dieser Saurier zum Kreis der Theropoden gehören, die zweibeinig liefen und meist räuberisch lebten. Zwar stießen Paläontologen schon zu Anfang auf mehrere weitere mit *T. rex* nahe verwandte kolossale Arten. Das bewies immerhin, dass jene gigantischen Raubdinosaurier innerhalb der Theropoden einen eigenen Ast gebildet hatten und *T. rex* somit durchaus keine kuriose Ausnahmereignung gewesen war. Doch wann waren die ersten Tyrannosaurier aufgetreten? Wie hatten ihre Vorfahren ausgesehen? Wieso wurden sie dermaßen riesig? Und wie entwickelten sie sich zu den obersten Raubtieren ihrer Zeit?

Keine imposante Ahnengalerie

Fast 20 neue Tyrannosaurierspezies sind in den letzten 15 Jahren in den verschiedensten Winkeln der Erde aufgetaucht, in den Wüsten der Mongolei wie im Dauerfrostboden der Arktis. Damit gelang es nun, einen plausiblen Stammbaum der Gruppe aufzustellen (siehe Kasten »Die neue Verwandtschaft von *Tyrannosaurus rex*«). Vieles daran erstaunt selbst die Fachleute. Denn offensichtlich waren die Tyrannosaurier während der längsten Zeit ihrer Existenz vorwiegend eher mittelgroße – manchmal nicht einmal einen Meter hohe – Fleischfresser gewesen, die in der Hierarchie der räuberischen Arten nicht besonders weit oben standen. Erst gegen Ende des Erdmittelalters brachten sie eine nennenswerte An-

AUF EINEN BLICK

AUFSTIEG DURCH GLÜCKLICHE UMSTÄNDE

1 Obwohl Paläontologen die **Tyrannosaurier** seit über 100 Jahren kennen, blieb deren **Herkunft** im Dunkeln. Neue Fossilien werfen Licht auf ihre Anfänge sowie auf die unerwartet **weite Verbreitung** kurz vor dem Ende ihrer Ära vor 66 Millionen Jahren.

2 Die **ersten Tyrannosaurier** lebten mindestens schon im mittleren Jura vor **170 Millionen Jahren**. Diese Arten waren **höchstens menschengroß**. Die nächsten 80 Millionen Jahre blieb die Gruppe im Schatten riesenhafter anderer Raubsaurier.

3 Der evolutionäre **Siegeszug** der Tyrannosaurier begann nach einer **ökologischen Umwälzung** vor rund 100 Millionen Jahren. Danach brachten sie eine größere Anzahl gigantischer sowie bizarrer Arten hervor, von denen etliche bis zum Untergang der Dinosaurier am Ende der Kreidezeit lebten.

zahl von gigantischen Arten hervor: genauer gesagt in den letzten 20 Millionen Jahren des Dinosaurierzeitalters, das vor 250 Millionen Jahren begann, die Trias, das Jura und die Kreidezeit umfasste und mit dem Untergang der Dinosaurier vor 66 Millionen Jahren endete. Auch der *Tyrannosaurus rex* erschien erst in der Endphase. Der König der Dinosaurier besaß somit keine lange Ahnenreihe imposanter Vorfahren.

Schon die Entdeckung von *T. rex* ist denkwürdig. Ermöglicht hatte sie der einflussreiche, seinerzeit berühmte amerikanische Geologe, Paläontologe und Anthropologe Henry Fairfield Osborn (1857–1935). Dieser Forscher wird heute kritisch gesehen, insbesondere weil er eine exzentrische Vorstellung von der Menschenevolution mitsamt Rassentheorie und Eugenik verfocht, wobei er seine Überzeugungen Kraft seiner hohen wissenschaftlichen Stellungen zu verbreiten verstand. Osborn war allerdings durchaus ein fähiger Paläontologe und ein noch besserer Wissenschaftsmanager. Zu seinen besten Schachzügen zählte, dass er den Paläontologen und Fossiljäger Barnum Brown (1873–1963) in den amerikanischen Westen auf Dinosauriersuche schickte.

Auch dieser Mann war ein Exzentriker. Auf Fossilien suche im Hochsommer ließ er sich im langen Pelzmantel fotografieren. Er arbeitete später nebenher als Spion für amerikanische Geheimdienste und für Ölgesellschaften. Bei der Knochensuche bewies er einen hervorragenden Instinkt und gewann mit der Entdeckung einer Reihe großer Dinosaurierarten Ansehen. Am meisten Furore machte aber die Fleisch fressende Bestie, deren Überreste er 1902 in der Hell-Creek-Formation in Montana fand. Anhand dieser Knochen verlieh Osborn dem *Tyrannosaurus rex* ein paar Jahre später seinen wissenschaftlichen Namen, der übersetzt »Tyrannenechsenkönig« lautet.

Die geheimnisumwitterte Echse wurde schlagartig als das größte und gefährlichste Landraubtier aller Zeiten berühmt und bald zur Ikone von Ausstellungen und Filmen. In der Folgezeit brachte die Entdeckung und Beschreibung einiger enger Verwandter des *T. rex* aus Nordamerika und Asien keinen

Aufschluss über seine Herkunft: Denn *Albertosaurus*, *Gorgosaurus* und *Tarbosaurus* ähnelten ihm ziemlich, waren ebenfalls imposante Raubtiere an der Spitze von Nahrungsketten und mehr oder weniger seine Zeitgenossen. Die Wurzeln der Tyrannosaurier konnten sie aber nicht offenbaren.

Die Wissenslücken schließen sich nun nach und nach mit Fossilien von oft unerwarteten Orten. Gern stellt man sich vor, dass Dinosaurierausgräber in abgelegenen heißen, öden, felsigen Gegenden unterwegs sind, etwa in Trockengebieten im Westen der USA oder Argentiniens, in der Wüste Gobi oder der Sahara. Doch Paläontologen entdeckten Tyrannosaurier jetzt in völlig anderen Umwelten, zum Beispiel hoch im Norden Russlands oder in Nordalaska.

2010 gab das Team von Alexander Averianov vom Zoologischen Institut der Russischen Akademie der Wissenschaften, Sankt Petersburg, einen sensationellen Fund in Zentralsibirien bekannt. Die Forscher hatten in der Region Krasnojarsk Überreste eines kleinen Fleisch fressenden Dinosauriers gefunden, der aufgerichtet Menschen nicht überragt hätte. Dieses Tier lebte vor etwa 170 Millionen Jahren, im mittleren Jura und somit lange vor *T. rex*. Nach dem Wort für Echse in einer lokalen Sprache erhielt es den wissenschaftlichen Gattungsnamen *Kileskus*.

Zunächst mag das Fossil wenig spektakulär wirken, und an *T. rex* erinnert die Art noch ganz und gar nicht. Wären sich die beiden Raubtiere begegnet, hätte der Saurierkönig einen *Kileskus* selbst mit seinen kurzen Armen wohl einfach weggefegt. Allerdings fallen bei *Kileskus* einige anatomische Gemeinsamkeiten mit dem etwa 10 Millionen Jahre jüngeren kleinen Raubsaurier *Guanlong* aus China auf, den Paläontolo-

gen 2006 beschrieben hatten. So trugen beide Arten auf dem Kopf einen imposanten knöchernen Irokesenkamm. Von *Guanlong* gibt es mehr und wesentlich vollständigere Fossil Exemplare. Sie zeigen bereits bestimmte Alleinstellungsmerkmale der Tyrannosaurier, zum Beispiel miteinander verwachsene Nasenknochen in der Schnauze, was einen kräftigen Biss ermöglicht. Die Forscher sind sich sicher: Beide Gattungen gehörten zu jener Sauriergruppe, aus der unter anderem die Ahnenreihe des *T. rex* hervorging.

Somit begann die Geschichte der Tyrannosaurier – für die Experten unerwartet – mit verhältnismäßig kleinen räuberischen Reptilien, die noch völlig im Schatten von damals viel größeren Raubdinosauriern wie den Allosauriern und Ceratosauriern standen und in der Nahrungspyramide höchstens die zweit- oder drittoberste Stelle einnahmen. Es verblüffte die Forscher auch, wie alt ihre Wurzeln waren: Frühe Tyrannosaurier gab es bereits, als der Superkontinent Pangäa noch nicht vollständig auseinandergebrochen war. Daraus erklärt sich wohl, wieso man Fossilien aus ihrer Frühzeit in Russland und China findet sowie nur wenig jüngere in Großbritannien, Nordamerika und möglicherweise sogar in Australien.

Es dauerte erstaunlich lange – mindestens 100 Millionen Jahre –, bis schließlich die riesigen dominierenden Arten auftraten. Dabei verlief die Evolution der Gruppe keineswegs träge oder stand zwischenzeitlich gar still. Denn offensichtlich spalteten sich die kleineren Tyrannosaurier immer wieder in verschiedene Linien auf.

Das zeigen beispielsweise Fossilien aus der Provinz Liaoning im Nordosten Chinas eindrucksvoll. Durch Anmut be-

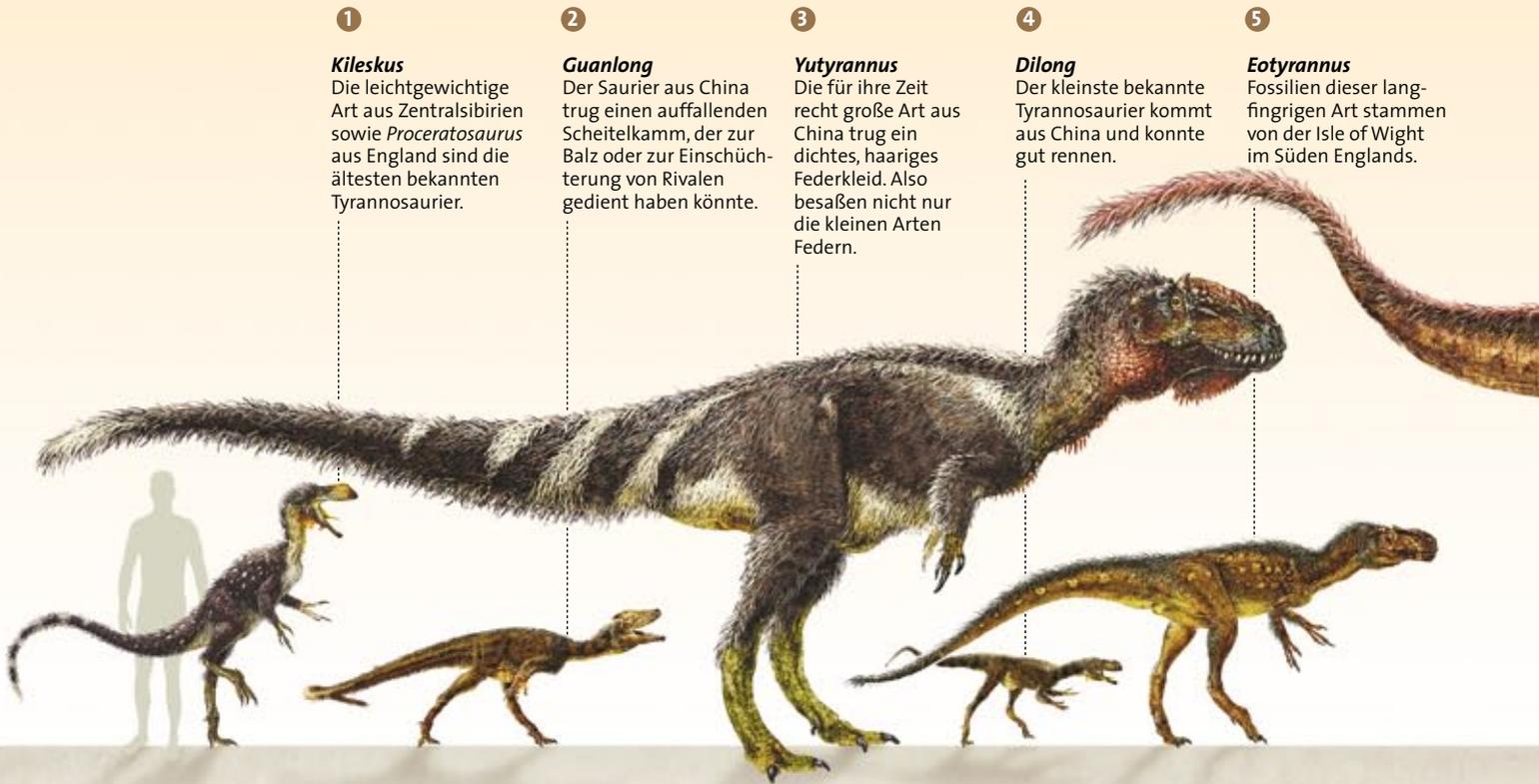
Das unerwartet hohe Alter ihrer Anfänge erklärt ihre Verbreitung über mehrere Kontinente



Die neue Verwandtschaft von *Tyrannosaurus rex*

Endlich geben Fossilfunde Aufschluss über die lange Evolution der Tyrannosaurier, einen Ast der zweibeinigen, meist Fleisch fressenden Theropoden. Die Gruppe war erstaunlich vielfältig. Aber erst in

der letzten Phase entstanden die dominierenden Herrscher über die Tierwelt wie *Tyrannosaurus rex*. Hier ist von den Arten meist nur der (erste) Gattungsname angeführt.



1

Kileskus
Die leichtgewichtige Art aus Zentralsibirien sowie *Proceratosaurus* aus England sind die ältesten bekannten Tyrannosaurier.

2

Guanlong
Der Saurier aus China trug einen auffallenden Scheitelkamm, der zur Balz oder zur Einschüchterung von Rivalen gedient haben könnte.

3

Yutyranus
Die für ihre Zeit recht große Art aus China trug ein dichtes, haariges Federkleid. Also besaßen nicht nur die kleinen Arten Federn.

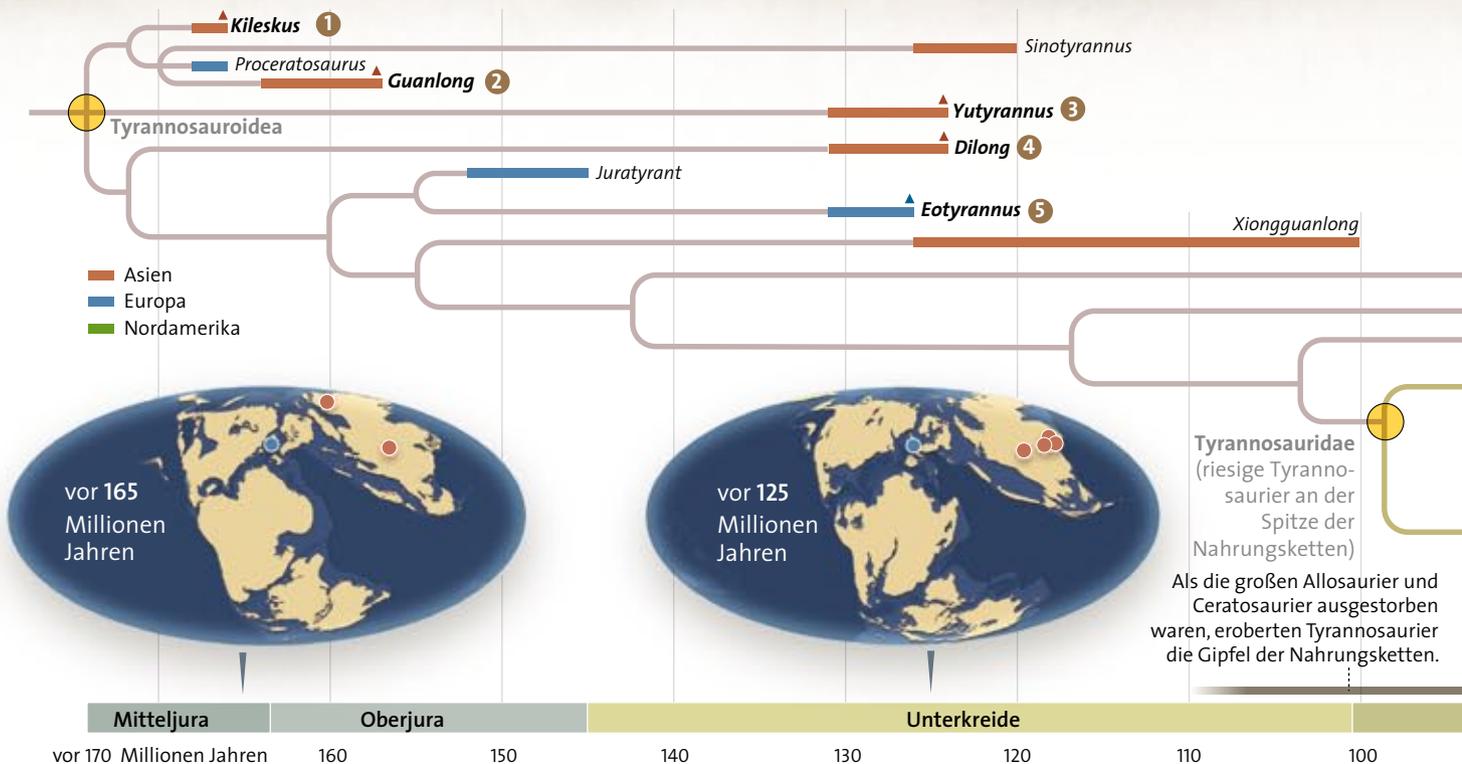
4

Dilong
Der kleinste bekannte Tyrannosaurier kommt aus China und konnte gut rennen.

5

Eotyrannus
Fossilien dieser lang-fingrigen Art stammen von der Isle of Wight im Süden Englands.

Von den bescheidenen Anfängen ...



6

Qianzhousaurus

Wegen der ungewöhnlich langen Schnauze des graziilen Tiers aus China sprechen Forscher scherzhaft von *Pinocchio rex*. Es beweist, dass die Tyrannosaurier nicht nur Muskelkolosse hervorbrachten.

7

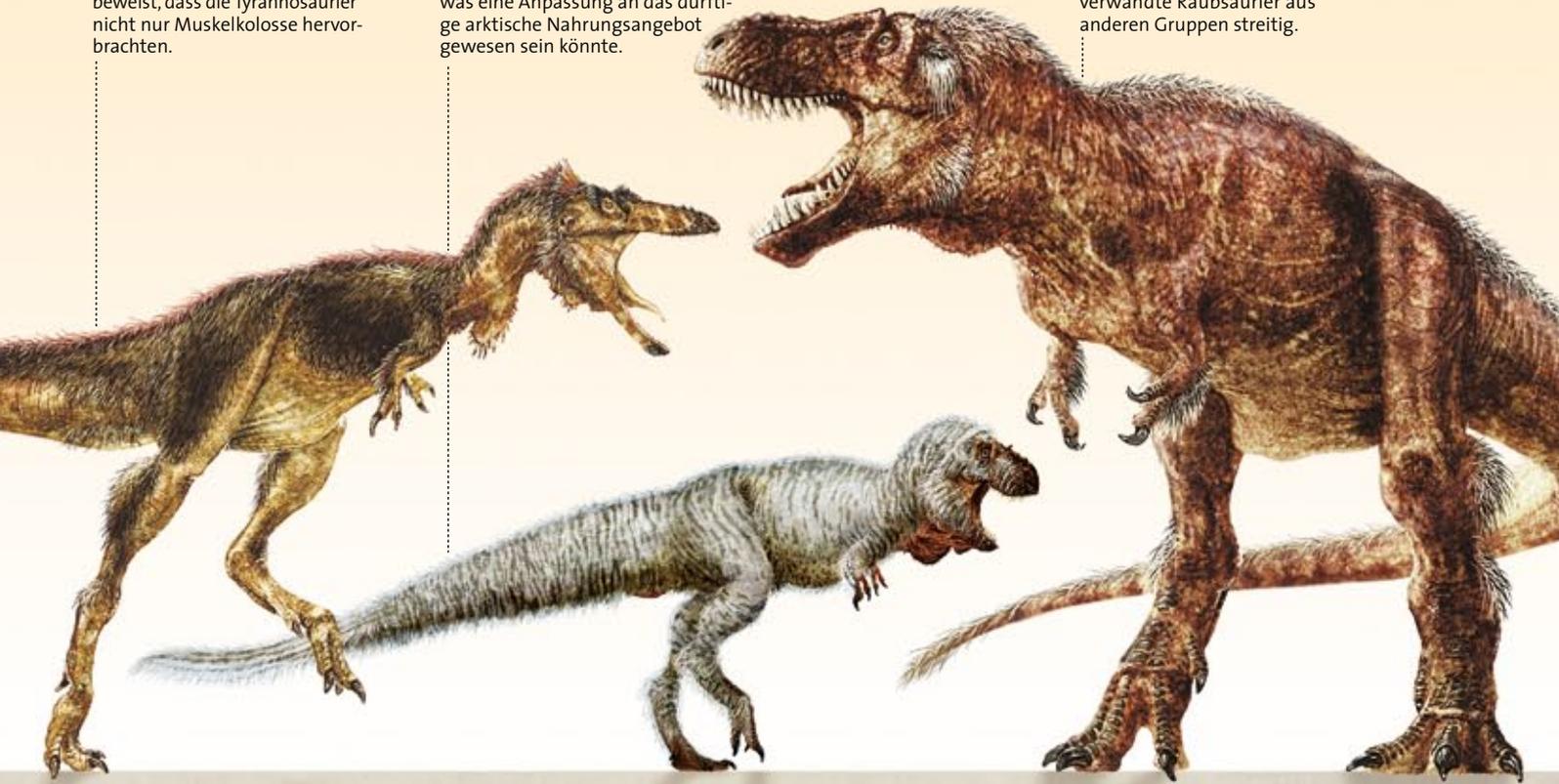
Nanuqsaurus

Das Tier aus Nordalaska zeigt die bisher nördlichste Verbreitung von Tyrannosauriern. Es wirkt fast wie eine Miniaturausgabe von *T. rex*, was eine Anpassung an das dürftige arktische Nahrungsangebot gewesen sein könnte.

8

Tyrannosaurus rex

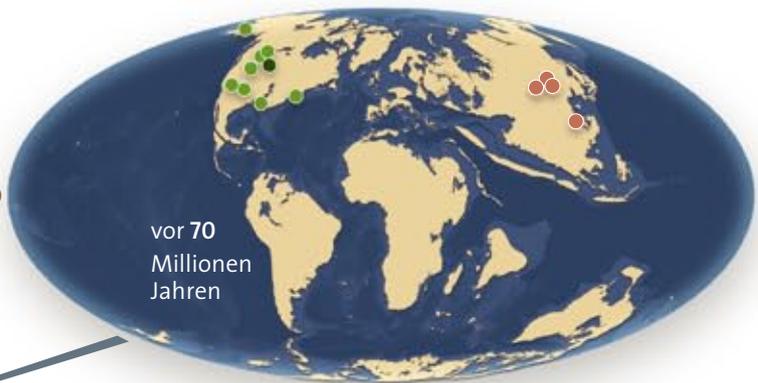
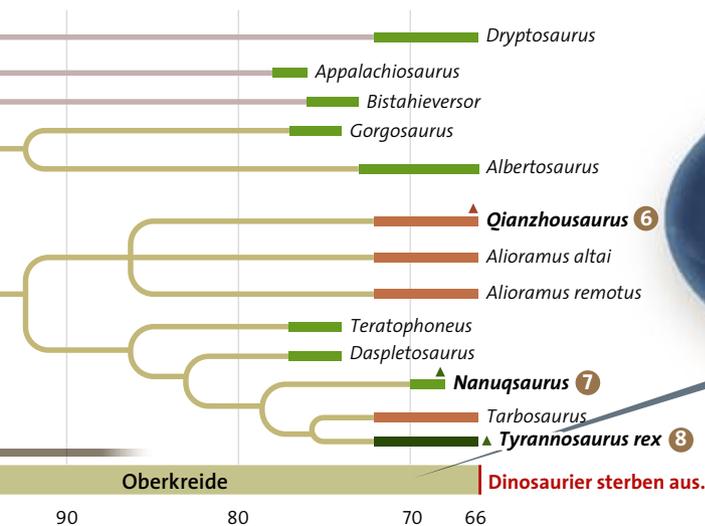
Er zählt zu den größten Landraubtieren aller Zeiten. Diesen Rang machen ihm höchstens einige entfernt verwandte Raubsaurier aus anderen Gruppen streitig.



... bis zu Spitzenräubern

Verbreitungsgeschichte

Noch ist nicht klar, wo die Tyrannosaurier einst entstanden. Sie haben sich dann, wohl wegen der noch enger zusammenhängenden Landmassen, auf der Nordhalbkugel viel weiter verbreitet als früher angenommen.



vor 70 Millionen Jahren

sticht die dortige Landschaft nicht gerade. Ich bin zwar durch den Mittleren Westen der USA, wo ich aufwuchs, einiges gewöhnt. Doch diese Gegend erscheint mir auf der Zugfahrt von Peking noch monotoner: Während der dreieinhalb Stunden ziehen immer gleiche, von Dunst umhüllte Hügel vorbei, die mit landwirtschaftlichen Betrieben und qualmenden Fabrikschlotten übersät sind.

Für Fossiliensucher aber ist dies ein Eldorado. Tausende Dinosaurierskelette fanden Bauern hier in den letzten 20 Jahren. Bei Vulkanausbrüchen, die in der Phase vor rund 130 bis vor 120 Millionen Jahren öfter erfolgten, wurden die Reptilien rasch begraben und blieben dadurch fossil hervorragend erhalten. Unter ihnen sind zwei aufschlussreiche Tyrannosaurierarten mit den Gattungsnamen *Dilong* und *Yutyrannus*, die vor rund 125 Millionen Jahren lebten.

Gewandt, schlau und mit Federkleid

Die Entdeckung von *Dilong* gab mein Kollege Xu Xing vom Institut für Wirbeltierpaläontologie und Paläanthropologie in Peking 2004 bekannt. Jene Tiere waren lediglich etwas über einen halben Meter hoch und besaßen einen geschmeidigen Körper mit langen Beinen für schnelles Rennen sowie ziemlich langen Armen zum Greifen von Beute. Im völligen Kontrast dazu steht *Yutyrannus*, den Xu 2012 beschrieb. Mit acht bis neun Metern Länge und rund einer Tonne Gewicht war dieser Koloss seinerzeit vielleicht ein Topraubtier dicht unter oder sogar an der Spitze der Nahrungskette. Trotz aller Verschiedenheit zählen beide Tiere anatomisch zu den Tyrannosauriern. Überdies wurden ihre Knochen in der gleichen Felsformation gefunden. Sie waren somit Zeitgenossen und lebten womöglich nebeneinander (siehe Bild S. 20–21). Folglich hatte sich die Gruppe schon in der frühen Kreidezeit in ganz unterschiedliche Linien aufgespalten, deren Arten diverse ökologische Positionen innehatten. Und es gab bereits Evolutionsexperimente mit großem Wuchs.

Noch in anderer Hinsicht revolutionieren *Dilong* und *Yutyrannus* unser Bild von *T. rex* und Co. Früher hielten Paläontologen die Dinosaurier allesamt für überdimensionierte, schwerfällige Reptilien mit einem Schuppenpanzer. Doch

langsam erkennen sie, dass nicht wenige von ihnen ein Federkleid trugen und ziemlich rege, gewandt und schlau gewesen sein dürften (siehe auch *SdW* 10/2003, S. 32–41 und 4/2015, S. 28–33). In manchem ähnelten sie mehr Vögeln als Reptilien. Die Fossilien von *Dilong* und *Yutyrannus* untermauern diese Auffassung für die Tyrannosaurier, denn beide waren eindeutig gefiedert. Überreste bei den Knochen lassen eine dichte, flaumige Decke vermuten. Zwar besaßen sie beide noch keine so genannten Konturfedern mit flacher Fahne wie Vögel, sondern einfachere, lange und dünne, an Haare erinnernde Gebilde. Fliegen konnten sie mit Sicherheit nicht. Aber ihr Gefieder könnte sie warm gehalten haben, und wahrscheinlich nutzten sie es zum Imponieren oder Ähnlichem. Auch *T. rex* stellen sich die Forscher heute mit Federkleid vor – was ihn sicherlich noch furchteinflößender erscheinen ließ.

Wie aus den neuen Fossilfunden von China, Russland und andernorts zu schließen, scheinen die Tyrannosaurier seit dem mittleren Jura bis in die frühe Kreidezeit (Unterkreide) hinein gut zurechtgekommen zu sein, auch wenn die meisten von ihnen in den Nahrungsketten keine Spitzenpositionen einnahmen. Als beständige, nicht sehr spektakuläre Gruppe flinker Räuber, die ihre Beute überraschten, hatten sie ihre Nischen gefunden. Dann allerdings – irgendwann im Zeitraum zwi-

schen vor 110 und 85 Millionen Jahren, also mitten in der Kreidezeit – wandelten sich die Ökosysteme der Dinosaurier grundlegend. Die Allosaurier und Ceratosaurier, welche die Nahrungsketten lange dominiert hatten, verschwanden nun größtenteils. Auf den nördlichen Kontinenten gewannen dann Tyrannosaurier die Vorrangstellung. Leider sind Dinosaurierfossilien gerade aus dieser Zeit extrem selten, so dass wir den Grund für den ökologischen Umbruch noch nicht wirklich verstehen. Möglicherweise ging er mit einem großen Aussterben vor etwa 94 Millionen Jahren einher, für das Forscher bei Meeresorganismen Anhaltspunkte fanden und das demnach auch die Lebensbedingungen auf dem Land stark beeinträchtigte.

Die Blütezeit der Tyrannosaurier setzte mit ihrer ökologischen Topposition ein. Nun entstanden diverse neue Arten, darunter *T. rex*. 20 Millionen Jahre lang, bis zum Untergang der Dinosaurier, herrschten jene mehrere Tonnen schweren Monster mit den überdimensionierten Schädeln und kräftigen Stummelarmen in Asien und Nordamerika. Ihr Biss zerkrachte mühelos die Knochen ihrer Beute. Die Jugendlichen wuchsen so schnell heran, dass sie täglich mehrere Kilogramm an Gewicht zulegten. Dabei war ihr Leben offensichtlich sehr hart, denn noch fanden die Paläontologen kein Exemplar, das über 30 Jahre alt geworden war.

Die Blütezeit der Tyrannosaurier setzte mit ihrer ökologischen Topposition ein. Nun entstanden diverse neue Arten, darunter *T. rex*. 20 Millionen Jahre lang, bis zum Untergang der Dinosaurier, herrschten jene mehrere Tonnen schweren Monster mit den überdimensionierten Schädeln und kräftigen Stummelarmen in Asien und Nordamerika. Ihr Biss zerkrachte mühelos die Knochen ihrer Beute. Die Jugendlichen wuchsen so schnell heran, dass sie täglich mehrere Kilogramm an Gewicht zulegten. Dabei war ihr Leben offensichtlich sehr hart, denn noch fanden die Paläontologen kein Exemplar, das über 30 Jahre alt geworden war.

Weder in Europa noch auf den südlichen Kontinenten scheinen jene kolossalen Tyrannosaurier der Spätzeit jemals gelebt zu haben. Dort gediehen damals andere Gruppen gro-

Erste Evolutionsexperimente mit Riesenwuchs gab es schon in der frühen Kreidezeit

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/saurier





ILLUSTRATION: JAMES GURNEY

Beim Ausbaggern einer Baugrube in China tauchten im Jahr 2010 Fossilien eines langnasigen, bislang unbekanntes Tyrannosauriers auf (künstlerische Rekonstruktion links). Der 90 Zentimeter lange Schädel von *Qianzhousaurus* war leicht gebaut und trug viele knöcherne Auswüchse. Vermutlich behauptete sich die Art neben wesentlich größeren und stämmigeren Verwandten mittels schneller, heimlicher Jagd auf kleinere Beutetiere.

ßer Raubsaurier. Die ungleiche Verteilung erklärt sich durch das Klima und Aussehen der Kontinente in der Oberkreide (siehe Kasten »Die neue Verwandtschaft von *Tyrannosaurus rex*«, unten). Seit den Anfängen der Tyrannosaurier im Jura hatte sich beides völlig verändert. Die Erdteile waren viel weiter auseinandergedriftet – ihre Position und Umrisse erinnerten teilweise bereits grob an die jetzige Situation. Der Meeresspiegel lag allerdings wesentlich höher als heute. Nordamerika wurde dadurch eine Zeit lang zweigeteilt, und Europa bestand aus Inseln. Landverbindungen zu den südlichen Kontinenten gab es nicht. Somit konnten die Kolosse des Nordens andere Erdteile schlicht nicht erreichen.

Interessanterweise haben *T. rex* und Co kleinere Arten ihrer Verwandtschaft nicht aus ihrem Lebensraum verdrängt. Ganz im Gegenteil: Paläontologen finden immer wieder neue Fossilien, die sie vermuten lassen, dass in der Oberkreide mehr Tyrannosaurierarten existierten als jemals zuvor. Das gilt sogar für die letzten Jahrmillionen vor ihrem Untergang. Und diese Arten nahmen entlang der Nahrungsketten die verschiedensten Positionen ein.

Der mittelgroße *Qianzhousaurus* mit seiner eigenartig langen Schnauze von der chinesischen Baustelle ist dafür ein treffliches Beispiel. Als mir mein Kollege Junchang Lü vom

Geologischen Institut der Chinesischen Akademie für Geowissenschaften 2013 auf einer Konferenz Fotografien der Fossilien zeigte, war ich völlig verblüfft. Dieses Tier war nur acht oder neun Meter lang gewesen und hatte vielleicht eine Tonne gewogen – für seine Opfer gefährlich genug, aber ein Fliegengewicht gegenüber *T. rex*. Das Merkwürdigste an ihm war jedoch sein schmaler, langer, leichter Schädel (Bilder oben), der so ganz anders wirkte als die breiten, stabilen, muskelbepackten Gegenstücke seiner kolossalen Verwandtschaft.

Rätselhafte Fossilien aus der Mongolei

Lü lud mich ein, ihm bei der Beschreibung dieses rätselhaften Sauriers zu helfen. Früher hatte ich bereits zwei andere langschnauzige Tyrannosaurier untersucht, die schon vor Jahrzehnten entdeckt worden waren und in kein Schema zu passen schienen. Von einem der beiden hatten russische Forscher in den 1970er Jahren in der Mongolei ein teilweise erhaltenes Skelett gefunden. Sie vermuteten bereits einen ungewöhnlichen langschädeligen Tyrannosaurier und nannten das Tier *Alioramus remotus*. Wegen des Kalten Krieges konnten allerdings zunächst nur wenige Paläontologen dieses Fossil in Augenschein nehmen. Deshalb blieb es unsicher, ob es sich einfach nur um ein junges Exemplar der schon be-

kannten Gattung *Tarbosaurus* handelte, einen sehr großen, engen asiatischen Verwandten von *T. rex*.

Kurz nach der Jahrtausendwende entdeckte dann ein mongolisch-amerikanisches Team unter Leitung meines späteren Doktorvaters Mark Norell vom American Museum of Natural History in New York ebenfalls in der Mongolei ein zweites, viel vollständigeres und besser erhaltenes Skelett von *Alioramus*. Dieses Skelett zeigte mir Norrell im Präparationslabor des Museums gleich an meinem ersten Tag als Doktorand und forderte mich auf, mich damit zu befassen. 2009 verkündeten wir, dass dies eine eigene neue Art sei, die wir *Alioramus altai* nannten. Unserer Meinung nach handelte es sich eindeutig nicht um einen *Tarbosaurus*. Allerdings war dieses Tier, wie wir am inneren Aufbau der Knochen erkannten, noch nicht geschlechtsreif gewesen, und der Schädel hatte daher möglicherweise noch nicht seine endgültige Form.

»Pinocchio« aus China brachte des Rätsels Lösung

Solche Unsicherheiten sind wir in der Paläontologie gewöhnt. Oft bringt erst ein neues Fossil Klarheit, doch das kann Jahrzehnte auf sich warten lassen. In diesem Fall ging es schneller – dank *Qianzhousaurus*. Vieles an dem neuen Skelett erinnert stark an *Alioramus*: die lange Schnauze, der feingliedrige Körperbau und die relativ geringe Größe. Doch dieses Tier war bei seinem Tod deutlich älter gewesen und körperlich viel reifer. So wussten wir nun, dass die Tyrannosaurier tatsächlich langschnäuzige Arten hervorgebracht hatten, die bis zum Ende der Kreidezeit in weit voneinander entfernten Gegenden Asiens vorkamen. Vermutlich standen auch sie weit oben in der Nahrungskette, aber unterhalb des riesigen *Tarbosaurus*.

Nur zwei Monate vor Erscheinen unserer Publikation zu *Qianzhousaurus* erfuhr die Fachwelt von einer noch verblüffenderen Kreatur. Anthony Fiorillo und Ronald Tykoski vom Perot Museum of Nature and Science in Dallas (Texas) beschrieben einen Tyrannosaurier von Nordalaska aus der späten Kreide anhand weniger Knochen von Schädel und Kiefer. Nach einem Eskimowort für »Eisbär« nannten sie ihn *Nanuqsaurus*. Jene Fossilien ähneln auffallend entsprechenden von *T. rex*. Sie sind allerdings nur halb so groß! Man könnte ein Jungtier von *T. rex* vermuten – wären da nicht die verdickten Schädelnähte, also Verwachsungen zwischen Knochen, die nur erwachsene Tiere aufweisen. Ich halte Fiorillos und Tykoskis Deutung für plausibel: Sie glauben, dass Tyrannosaurier so weit im Norden mindestens im Winter nicht viel Nahrung vorfanden und sich daran anpassten, indem sie kleiner wurden – so wie sich auf Inseln unter einem begrenzten Nahrungsangebot Zwergformen ausbilden. Während also *T. rex* südlichere Gefilde unsicher machte, tat sein kleiner Bruder das im hohen Norden.

Dank der vielen neuen Fossilien vor allem aus den letzten Jahren gewinnt die Evolutionsgeschichte der Tyrannosaurier nun Konturen. Zahlreiche Fragen bleiben dennoch vorerst offen. Wo erschienen die ersten Theropoden? Und wann

zweigte sich dieser Ast ab? Geschah das vielleicht sogar schon im unteren Jura? Die meisten ihrer Fossilien stammen von der Nordhalbkugel, mit Ausnahme eines strittigen Knochens aus Australien. Doch da viele andere Gruppen der Dinosaurier zwischen dem Mitteljura und der mittleren Kreidezeit weltweit vorkamen, warum sollte das nicht auch auf Tyrannosaurier zutreffen? Ihr Aussehen und ihre Lebensweise geben ebenfalls noch jede Menge Rätsel auf. Was für Federn hatte *T. rex* – und wozu waren sie gut? Oder zu welchem Zweck besaßen *Qianzhousaurus* und *Alioramus* solche absonderlich langen Schnauzen?

Der Verlauf der Evolution ist nicht vorhersehbar. Das zeigt auch die Geschichte der Tyrannosaurier. Ihre ersten Vertreter, die vor über 170 Millionen Jahren entstanden, machten keineswegs den Eindruck, als würden ihre Nachfahren einmal die Tierwelt ganzer Kontinente dominieren. 80 Millionen Jahre lang führten sie als verhältnismäßig kleine Pirschjäger eher ein Schattendasein neben anderen, viel größeren Raubsauriern. Erst spät boten gravierende Umweltveränderungen ihnen Gelegenheit, sich zur Spitze aufzuschwingen. Dennoch konnten ihre Kraft und Größe die Topräuber nicht retten, als ein Asteroid die Erde verwüstete und damit letztlich dem Aufstieg der Säugetiere den Weg ebnete. ~

DER AUTOR



Stephen Brusatte ist Paläontologe an der University of Edinburgh (Schottland). Der Amerikaner beschäftigte sich schon im Studium und bei seiner Promotion 2013 an der Columbia University in New York mit der Anatomie und Evolution von Dinosauriern. Brusatte ist Autor von über 70 wissenschaftlichen Artikeln und fünf Büchern über Dinosaurier. Beim BBC arbeitet er bei der Fernsehserie »Walking With Dinosaurs« (deutsch: »Dinosaurier – im Reich der Giganten«) mit.

QUELLEN

Brusatte, S. L. et al.: Tyrannosaur Paleobiology: New Research on Ancient Exemplar Organisms. In: *Science* 329, S. 1481–1485, 2010
Fiorillo, A. R., Tykoski, R. S.: A Diminutive New Tyrannosaur from the Top of the World. In: *PLOS One* 9, e91287, 2014
Lü, J. et al.: A New Clade of Asian Late Cretaceous Long-Snouted Tyrannosaurids. In: *Nature Communications* 5, 37898, 2014

LITERATURTIPPS

Erickson, G. M.: Die Wahrheit über *Tyrannosaurus rex*. In: *Spektrum der Wissenschaft*, 11/1999, S. 42–49
Revidiertes Bild des Riesenraubsauriers und seiner Verwandten
Spektrum der Wissenschaft: Tiere der Urzeit. Im Reich der Dinosaurier und anderer Kreaturen. Dossier 1/2005
Artikel zur Evolution und Lebensweise verschwundener Tiere

WEBLINKS

ScientificAmerican.com/may2015/tyrannosaurus
Video eines englischen Vortrags des Autors

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368104

Versteckter Hörverlust

Verstehen Sie gesprochene Sprache schlecht – obwohl Sie Töne und Geräusche noch gut wahrnehmen? Dann könnten Sie von einem Phänomen betroffen sein, das Hirnforschern bisher verborgen geblieben war.

Von M. Charles Liberman

Die Footballfans der Seattle Seahawks und der Kansas City Chiefs bemühen sich bei Heimspielen regelmäßig, den Guinness-Weltrekord für die größte gemessene Lautstärke im Stadion zu brechen. Am 29. September 2014 erzielten die Chiefs die derzeitige Bestmarke von 142,2 Dezibel (dB). Dieser schmerzhaft hohe Schallpegel entspricht dem eines Düsentriebwerks in einer Entfernung von etwa 30 Metern. Laut Expertenmeinung ist das mehr als genug, um das Gehör dauerhaft zu schädigen. Nach dem Spiel waren die Fans in Ekstase. Begeistert berichteten sie von klingenden Ohren und dem Gefühl, dass der Lärm ihre Trommelfelle fast zerrissen hätte. Doch was sich tatsächlich in ihren Gehörorganen abgespielt hat, ist alles andere als Grund zur Begeisterung.

Ein Hörtest nach dem Spiel hätte wohl bei vielen Fans einen markanten Verlust an Hörfähigkeit an den Tag gebracht. Das leiseste Geräusch, das ein Zuschauer vor Spielbeginn noch wahrnehmen konnte, hätte er zur Halbzeit schon nicht mehr registriert. Die Hörschwelle könnte nach dem Schlusspfiff um 20 bis 30 dB erhöht gewesen sein. Glücklicherweise sind solche Effekte meist nicht von Dauer. In vielen Fällen dürften die Ohrgeräusche innerhalb der nächsten Tage abgeklungen und die Fähigkeit, leise Töne wahrzunehmen, wiederkehrt sein; ein Hörtest hätte oft wieder die vorherigen Normalwerte im Audiogramm ergeben.

Lange gingen Wissenschaftler und Ärzte davon aus, dass sich mit der normalisierten Hörschwelle auch das Ohr selbst wieder vollständig erholt hätte. Wie meine Kollegen und ich jedoch vor Kurzem nachwies, trifft diese Vermutung nicht zu. Auch wenn eine Lärmexposition die Hörschwelle nur vorübergehend erhöht, schädigt sie sofort und unwiederbringlich die Fasern des Hörnervs, die akustische Informationen ans Gehirn weiterleiten.

Eine solche Beeinträchtigung muss nicht zwangsläufig das Hören einzelner Töne betreffen, wie es ein Audiogramm erfasst, kann jedoch das Verarbeiten komplexerer Schallmuster erschweren. Diese Form des Gehörschadens wurde erst jetzt erkannt, da das normal erscheinende Audiogramm die Nervendefekte und die damit einhergehende Hörminderung nicht aufzeigt.

Setzt ein Mensch seine Ohren immer wieder starkem Lärm aus, summieren sich allmählich die Schädigungen des Hörnervs. Diese könnten dazu beitragen, dass es Menschen im mittleren und höheren Alter zunehmend schwer fällt, sprachliche Nuancen zu erkennen. Ein solcher »versteckter« Hörverlust kommt jedoch nicht nur bei älteren Erwachsenen vor. Neueste Forschungsergebnisse legen nahe, dass in den Industrieländern immer mehr jüngere Menschen wegen der allgemein steigenden – und oft vermeidbaren – Lärmexposition betroffen sind.

Die Verletzlichkeit des menschlichen Gehörs beruht auf seiner außerordentlichen Empfindlichkeit. Sie ermöglicht uns, Schall extrem unterschiedlicher Intensität wahrzunehmen. Der leisesten, gerade noch wahrnehmbaren Lautstärke eines Tons mit einer Frequenz von 1000 Schwingungen pro Sekunde – also der Hörschwelle bei 1000 Hertz (Hz) – entspricht ein Schallpegelwert von 0 Dezibel (dB).

Auf der logarithmischen Dezibelskala bedeutet eine um 20 dB erhöhte Lautstärke eine etwa zehnmal größere Schallwellenamplitude. Bei 0 dB bewegen sich die Gehörknöchelchen im Mittelohr um weniger als den Durchmesser eines Wasserstoffatoms hin und her. Am anderen Ende des Wahrnehmungsbereichs, den schmerzhaften 140 dB beim Rekordspiel der Chiefs, muss das Ohr mit Schallamplituden umgehen, die zehn Millionen mal größer sind.

AUF EINEN BLICK

EMPFINDLICHE HÖRNERVENFASERN

1 Hohe Schallpegel können **Ohrenklingen** oder **schlechteres Hören** verursachen. Ging das vorüber, nahm man bisher an, dass sich das Ohr davon erholt hat.

2 Laut neueren Forschungen schädigt akuter Lärm aber nicht nur die **Haarzellen im Innenohr**, sondern auch deren Kontakte zu den Fasern des **Hörnervs**. Das führt zum **Absterben dieser Nervenzellen**, die Hörinformationen zum Gehirn leiten.

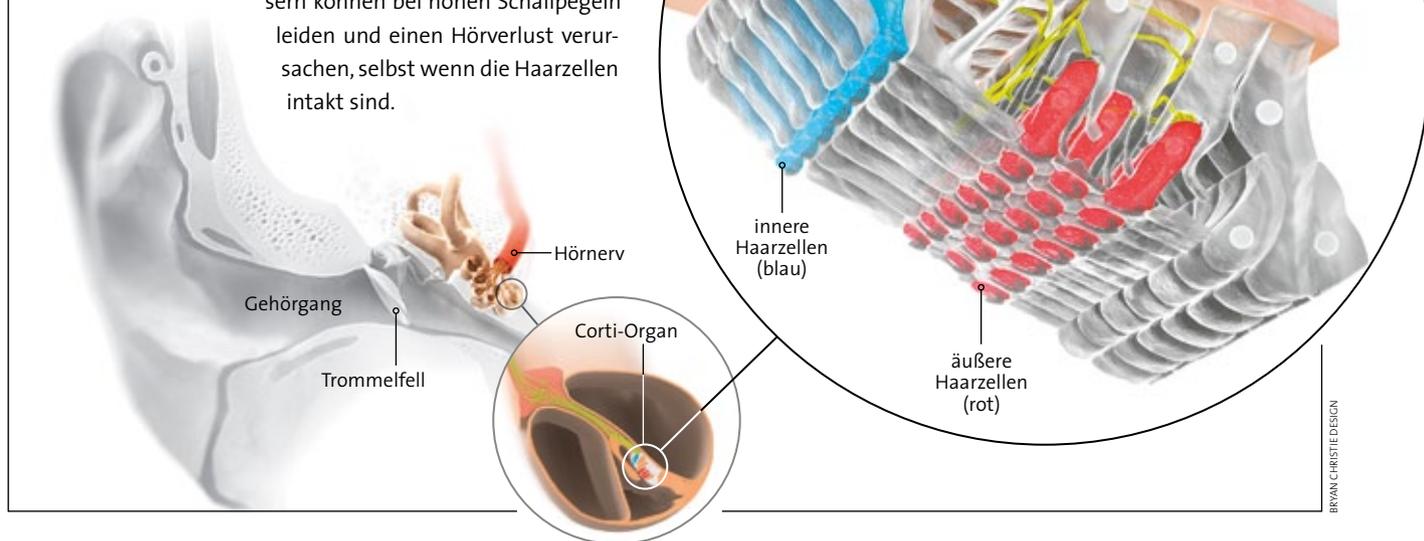
3 Betroffene können zwar noch Töne und Geräusche gut wahrnehmen, verstehen aber Gesprochenes schlechter. Dieser »versteckte Hörverlust« könnte wegen der **allgemein zunehmenden Lärmexposition** große Teile der Bevölkerung betreffen.



Konzerte erreichen oft Lautstärken von mehr als 110 Dezibel. Setzt man sich solchen Pegeln längere Zeit aus, kann das Gehör dauerhaft leiden.

Folgenreicher Lärm

Schallwellen gelangen über den Gehörgang zum Trommelfell. Die ausgelösten Schwingungen werden über die Gehörknöchelchen ins Innenohr weitergeleitet. Dort stimulieren sie im Corti-Organ die äußeren Haarzellen (siehe Ausschnittsvergrößerung), die das Signal verstärken. Daraufhin übersetzen die inneren Haarzellen die Vibrationen in chemische Signale und übertragen diese an Fasern des Hörnervs. Schäden der Haarzellen verringern die Hörfähigkeit; aber auch die Nervenfasern können bei hohen Schallpegeln leiden und einen Hörverlust verursachen, selbst wenn die Haarzellen intakt sind.



Der Hörprozess beginnt, indem das äußere Ohr Schallwellen in den Gehörgang Richtung Trommelfell leitet. Dieses schwingt mit und versetzt die Gehörknöchelchen des Mittelohrs in Bewegung. Deren Vibrationen übertragen sich auf das flüssigkeitsgefüllte Röhrensystem des Innenohrs, die Cochlea. Dort sitzen auf dem spiralförmigen Corti-Organ Tausende von Haarzellen. Sie tragen diesen Namen wegen ihrer haarförmigen Ausstülpungen, den Stereozilien oder Stereovilli, die bündelförmig in die Flüssigkeit hineinragen. An der Spitze der schneckenförmigen Cochlea liegen Haarzellen, die vornehmlich tiefe Frequenzen wahrnehmen; die für hohe Töne zuständigen finden sich am anderen Ende. Lenken Schallwellen die Härchen aus, schütten deren Zellen am gegenüberliegenden Ende den Neurotransmitter Glutamat aus – dort, wo sie Kontaktstellen zu den Fasern des Hörnervs bilden.

Vom Neurotransmitter zum Klang

In diesen Synapsen überquert das freigesetzte Glutamat einen schmalen Spalt und bindet auf der gegenüberliegenden Seite an Antennenproteine (Rezeptoren) auf den Enden der Hörnervfasern. Dies löst einen elektrischen Impuls in Richtung Hirnstamm aus. Von dort wandern die Signale über mehrere parallel laufende neuronale Verschaltungen durch unterschiedliche Hirnregionen: vom Hirnstamm zum Mittelhirn und Thalamus bis zu ihrem Ziel im auditorischen

Kortex, dem Hörzentrum in der Hirnrinde. Gemeinsam analysieren diese komplexen Schaltkreise unsere akustische Umwelt und organisieren sie in wiedererkennbare Klänge, sei es nun eine Melodie oder das Heulen einer Sirene.

Genauer gesagt gibt es zwei Typen von Haarzellen, die inneren und die äußeren. Letztere verstärken die durch Schallwellen ausgelösten Schwingungen im Innenohr, während die inneren diese Bewegungen wie beschrieben in chemische Signale übersetzen, die wiederum den Hörnerv erregen. Im Wesentlichen sind die inneren Haarzellen für das Hören verantwortlich, da 95 Prozent der Hörnervfasern ausschließlich mit ihnen Synapsen bilden. Es ist nicht geklärt, weshalb einige Hörnervfasern Synapsen mit äußeren Haarzellen aufweisen. Möglicherweise sind diese Fasern für die Schmerzen verantwortlich, die wir bei zu hohen Lautstärken empfinden.

Früher wurde die Hörfähigkeit vorwiegend mit Hilfe von Tonaudiogrammen erfasst, die unser Hörvermögen in Frequenzintervallen von jeweils einer Oktave messen, beispielsweise bei 250, 500, 1000, 2000, 4000 und 8000 Hz. HNO-Ärzte hatten schon vor Langem beobachtet, dass Arbeiter, die Metallplatten durch Hämmern zu Heizkesseln formten, häufig unter einem dauerhaften Hörverlust im Bereich um etwa 4000 Hz litten. Zum Vergleich: Dies entspricht ungefähr dem höchsten Ton eines Klaviers, dem fünfgestrichenen C. Tatsächlich nehmen Menschen mit dem Frühstadium ei-



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



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

ISTOCK / BART SADOWSKI

ner lärmbedingten Hörschwäche laut Audiogramm Töne in diesem Frequenzbereich des menschlichen Hörpektrums schlechter wahr.

Während der 1950er und 1960er Jahre zeigten epidemiologische Studien bei Arbeitern in lärmigen Fabriken eine klare Korrelation zwischen der Beschäftigungsdauer und der Verschlechterung des Hörvermögens. Das anfängliche Defizit um 4000 Hz greift allmählich auf andere Frequenzbereiche über. Viele ältere Arbeiter waren im Bereich oberhalb von 1000 oder 2000 Hz praktisch taub. Solch ein Hochtonverlust bedeutet eine schwere Hörbehinderung, da ein Großteil des Informationsgehalts der menschlichen Sprache in diesem dann nicht mehr wahrnehmbaren Frequenzbereich vermittelt wird, beispielsweise Konsonanten wie »t«.

Solche Untersuchungen veranlassten die US-amerikanische Regierung in den 1970er Jahren, Richtlinien zur Begrenzung der Lärmexposition am Arbeitsplatz zu erlassen. Auch in Deutschland wurden seitdem verschiedene Regelungen dazu eingeführt. Aktuell gilt hier zu Lande die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung von 2007 in der Revision von 2010, die unter anderem die Richtwerte zur Lärmexposition sowie den erlaubten Spitzenschalldruck festlegt. Die verschiedenen Behörden empfehlen allerdings unterschiedliche Grenzwerte. Darin spiegelt sich die Problematik bei der Einschätzung lärmbedingter Risiken. Zum einen gibt es große individuelle Unterschiede in der Lärmempfindlichkeit: Manche Ohren scheinen einiges auszuhalten, andere Menschen haben ein sensibleres Gehör. Die Behörden müssen also entscheiden, welchen Anteil der Bevölkerung sie vor Hörschäden schützen wollen und welches Ausmaß an Hörminderung noch akzeptabel erscheint. Des Weiteren hängt der Umfang lärmbedingter Hörschäden von einer komplexen Wechselwirkung der Dauer, Intensität und Frequenz der Beschallung ab.

Aktuell schreibt die deutsche Verordnung spätestens ab einem Tages-Lärmexpositionspegels von 85 dB einen Gehörschutz vor, wobei der Arbeitgeber angehalten ist, Maßnahmen zur Verbesserung der Situation zu ergreifen. Gleiches gilt bei einem nur gelegentlich kurzzeitig auftretenden Spitzenschalldruckpegel von 137 dB. Zum Vergleich: Der erwähnte Footballspielrekord von 142,2 dB lag noch deutlich darüber, zudem dauerten die hohen Pegel dabei auch längere Zeit an.

In den letzten 60 Jahren nahmen die Gehörspezialisten an, dass das routinemäßig erstellte Tonaudiogramm alle

wesentlichen Informationen über lärmbedingte Hörschäden liefert. Tatsächlich erfasst es zuverlässig Defizite bei den inneren Haarzellen, und laut Untersuchungen aus den 1940er und 1950er Jahren reagieren Haarzellen von allen Zellen im Innenohr am empfindlichsten auf akustische Überlastung.

Tierexperimente – unter anderem in unserem Labor – zeichneten seitdem ein noch differenzierteres Bild. Demnach sind die äußeren Haarzellen verletzlicher als die inneren; und jene, die akustische Reize im Hochtonbereich wahrnehmen, anfälliger als solche, die niedrige Frequenzen registrieren. Nicht zuletzt wissen wir dank diesen Versuchen, dass sich verloren gegangene Haarzellen nicht regenerieren. Zudem schädigen laute Geräusche irreversibel die Bündel der Stereozilien auf den Zellen, noch bevor diese absterben. Ein Verlust an Haarzellen erhöht die Hörschwelle: Wir müssen dann das Radio aufdrehen oder den Kollegen am anderen Ende des Tisches bitten, lauter zu sprechen.

Detaillierte Untersuchungen von Schäden an der Cochlea lassen sich bei Menschen kaum durchführen, da man in diesem Bereich keine Gewebeproben entnehmen darf und mit keiner verfügbaren Technik die Haarzellen am lebenden Individuum studieren kann. Daher stammen alle direkten Informationen über die organischen Veränderungen bei lärmbedingtem Hörverlust von Verstorbenen.

In der Ruhe liegt die Kraft

Unter anderem wegen dieser Beschränkungen bleibt schwer zu klären, in welchem Maß der Hörverlust eine unvermeidbare Konsequenz des Alterns ist und wie stark die Lärmbelastigungen des modernen Alltags dazu beitragen. Einige erste Hinweise lieferte allerdings bereits eine Studie aus den 1960er Jahren. Sie untersuchte Menschen, die in besonders ruhiger Umgebung lebten, unter anderem 70 bis 79 Jahre alte Männer des wüstenbewohnenden Stammes der Mabaan im Sudan. Diese hörten signifikant besser als US-Amerikaner der gleichen Altersgruppe. Jedoch blieben andere Einflussfaktoren wie genetische Disposition und Ernährung unberücksichtigt.

Aktuelle Studien meiner Arbeitsgruppe zu den Auswirkungen von Lärm auf das Hörvermögen ergaben beunruhigende Erkenntnisse. Wissenschaftler und Ärzte gehen seit Langem davon aus, dass lärmbedingter Hörverlust teilweise reversibel ist: Manchmal senkt sich die Hörschwelle laut Audiogramm innerhalb von Stunden bis Tagen nach der Belastung wieder auf normale Werte ab, in anderen Fällen bleibt sie erhöht. Bislang glaubten Gehörforscher, das Ohr hätte sich vollständig erholt, wenn die Hörschwelle in den Normalbereich zurückgekehrt ist. Heute wissen wir, dass dies nicht zutrifft.

Das Getöse in Footballstadien und bei Rockkonzerten wie auch etwa die Explosionen von Silvesterknallkörpern schädigen nämlich nicht nur die Haarzellen, sondern auch die Fasern der Hörnerven. Zusammen mit anderen Arbeitsgruppen wiesen wir in den 1980er Jahren nach, dass Lärm die feinen Nervenenden dort in Mitleidenschaft zieht, wo sie Synapsen mit den Haarzellen bilden. Die Enden schwellen

dabei an und können schließlich sogar platzen – wahrscheinlich deshalb, weil die übermäßig stimulierten Haarzellen große Mengen des Signalmoleküls Glutamat in den Synapsenspalt freisetzen. Generell wirken Überdosen an Glutamat überall im Nervensystem toxisch.

Nach herkömmlicher Auffassung können sich die geschädigten Nervenfasern allerdings von intensiver Lärmbelastung wie die Haarzellen wieder erholen, da die Hörschwelle oft auch dann in den Normalbereich zurückkehrt, wenn die Nervenenden unmittelbar nach der Exposition massiv geschwollen waren. Unser Team bezweifelte jedoch, dass sich so schwer beeinträchtigte Synapsen im Ohr von Erwachsenen tatsächlich regenerieren. Lärmbedingte Nervenschäden sind nämlich im üblichen Tonaudiogramm nicht zuverlässig zu

erkennen, wie wir bereits wussten. Studien an Tieren aus den 1950er Jahren hatten gezeigt, dass sich ein Verlust an auditischen Nervenfasern ohne gleichzeitige Beeinträchtigung der Haarzellen erst dann im Audiogramm zeigt, wenn er mit über 80 Prozent bereits ein verheerendes Ausmaß erreicht hat. Offenbar bedarf es nicht allzu vieler Nervenfasern, um in der stillen Umgebung der Testkabine leise Töne zu hören.

Um eine Analogie aus dem visuellen Bereich heranzuziehen: Betrachtet man die digitale Fotografie einer Menschengruppe in unterschiedlichen Auflösungen, so werden Details mit abnehmender Pixeldichte immer unschärfer wiedergegeben. Irgendwann sieht man nur noch, dass Leute im Bild sind, jedoch nicht mehr, um wen es sich handelt. Entsprechend vermuteten wir, dass der schleichende Untergang von

Schützen Sie Ihr Gehör!

Bei Experimenten mit Tieren verschiedener Arten konnten wir Schäden am Hörnerv bereits nach zwei Stunden kontinuierlicher Einwirkung von Schallpegeln im Bereich von 100 bis 104 dB beobachten. Das menschliche Ohr ist sicher nicht weniger verletzlich. Daher sollte man seine Ohren nicht ungeschützt Schallpegeln über 100 dB aussetzen.

Tatsächlich erreichen viele alltägliche Schallbelastungen diese Gefahrenzone. Rockkonzerte und Musikclubs sowie Diskotheken erzielen häufig Maximalpegel von 115 dB und eine mittlere Lautstärke von mehr als 105 dB. Benzinbetriebene Laubbläser und Rasenmäher sorgen im Ohr des Benutzers für Schallpegel von 95 bis 105 dB, ebenso Kreissägen. Auch die Frequenz des einwirkenden Schalls spielt eine Rolle: Das schrille Heulen eines Bandschleifers ist gefährlicher als das tiefe Dröhnen eines Motorrads mit defektem Auspuff. Pressluft-hämmer produzieren Schallpegel von 120 dB am Ohr von Passanten, zudem mit einem bedrohlich großen Anteil hoher Frequenzen.

Wie kann man die Ohren wirksam schützen? Apps für Smartphones ermöglichen eine erstaunlich genaue Schallpegelmessung und sind preisgünstig oder sogar kostenlos. Die Werte sind für Musik wie Maschinenlärm gleichermaßen präzise, mit Abweichungen von weniger als 1 bis 2 dB gegenüber teuren professionellen Messgeräten.

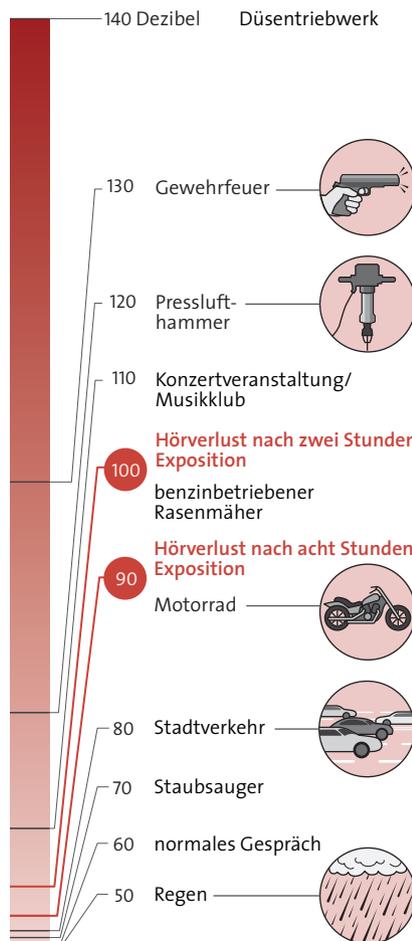
Es ist also relativ einfach, sich ein Bild von potenziell gefährlichen Lärmquel-

len in der eigenen Alltagsumgebung zu verschaffen. Auch ein wirksamer Gehörschutz steht zur Verfügung: Schallschutzstöpsel aus Schaumstoff sind effektiv, preisgünstig und einfach zu verwenden. Richtig eingesetzt reduzieren sie den Schallpegel in den gefährlichsten Frequenzbereichen um 30 dB. Man quetscht

einen solchen Stöpsel durch Rollen mit den Fingern zu einem dünnen Zylinder zusammen und steckt ihn dann so tief wie möglich in den Gehörgang. Das ist kaum schwieriger, als einen Ohrhörer zum Musikhören einzusetzen. Der Schaumstoff dehnt sich innerhalb einer Minute wieder aus, passt sich dabei der Form des Gehörgangs an und bietet dann wirksamen Lärmschutz.

Bei Konzerten funktioniert dieser jedoch etwas zu gut. Will man die Aufführung bei sicherer Lautstärke genießen, bieten sich spezielle Ohrstöpsel für Musiker an, die den Schallpegel um 10 bis 20 dB reduzieren. Dabei dämpfen sie hohe und niedrige Frequenzen gleichermaßen, so dass die Klangfarben erhalten bleiben.

Nicht zuletzt sollte man darauf achten, was die eigenen Ohren einem mitteilen. Wenn Sie nach einer Lärmbelastung das Gefühl haben, gedämpft zu hören, als hätten Sie Watte in den Ohren, kann dies auf die Zerstörung einiger Hörnervensynapsen hindeuten. Kein Grund zum Verzweifeln – aber achten Sie in Zukunft darauf, Ihre Ohren solchen Belastungen nicht mehr ungeschützt auszusetzen.





Nervenfasern zwar nicht die Wahrnehmung von Einzeltönen stört, aber dennoch beispielsweise das Sprachverstehen in lauter Umgebung beeinträchtigt.

Als wir in den 1980er Jahren begannen, den lärmbedingten Hörverlust zu erforschen, konnten wir die Anzahl der Synapsen zwischen auditorischen Nervenfasern und inneren Haarzellen nur ermitteln, indem wir sie in Serien aufeinander folgender Gewebeschnitte unter dem Elektronenmikroskop zählten. Dieses Verfahren ist so aufwändig, dass es etwa ein Jahr dauert, die Synapsen in einigen wenigen Haarzellen einer Cochlea zu erfassen.

25 Jahre später untersuchte ich mit meiner Kollegin Sharon G. Kujawa von der Massachusetts Eye and Ear Infirmary an der Harvard Medical School in Boston, ob eine einzelne akustische Überlastung des Gehörs bei jungen Mäusen den altersbedingten Hörverlust beschleunigt. Der Lärm, dem wir die Tiere aussetzten, sollte die Hörschwelle nur vorübergehend erhöhen und die Haarzellen nicht dauerhaft schädigen. Wie erwartet, sah das Cochleagewebe der Mäuse einige Tage nach der Lärmexposition normal aus. Nach sechs Monaten bis zwei Jahren beobachteten wir jedoch einen zunehmenden Verlust an auditorischen Nervenfasern, obwohl die Haarzellen noch intakt wirkten.

Gegenüber den 1980er Jahren gibt es heute wesentlich raffiniertere Methoden, mit denen wir die molekulare Struktur der beteiligten Synapsen untersuchen. So markieren an Fluoreszenzfarbstoffe gekoppelte Antikörper Proteine auf beiden Seiten des synaptischen Spalts zwischen Haarzelle und Nervenfasern. Dies ermöglicht es uns, die Synapsen ganz einfach unter dem Lichtmikroskop zu zählen. Laut unseren Daten war schon wenige Tage nach einer Lärmbelastung, als die Hörschwelle bereits wieder auf Normalniveau zurückgekehrt war, die Hälfte aller Synapsen zwischen Haarzellen und Nervenfasern verschwunden; und diese regenerierten sich

auch nicht mehr. Nach einigen Monaten fehlten zudem die übrigen Anteile der geschädigten Hörneurone, nämlich ihre Zellkörper und die langen Fortsätze (Axone), die in den Hirnstamm ziehen. Zwei Jahre danach war nur noch rund die Hälfte der auditorischen Neurone übrig. Mit dem Wegfall der synaptischen Verbindungen zu den Haarzellen hatten auch die betroffenen Neurone ihre Aufgabe verloren; sie sprachen auf Töne gleich welcher Intensität nicht mehr an und wurden damit überflüssig.

Rollt eine Epidemie an Hörschäden auf uns zu?

In den letzten Jahren konnten wir den lärmbedingten Synapsenverlust nicht nur bei Mäusen, Meerschweinchen und Chinchillas nachweisen, sondern auch in den Geweben verstorbener Menschen. Die Kontaktstellen beginnen in allen Fällen bereits zu schwinden, bevor der Verlust von Haarzellen die Hörschwelle erhöht. Dass solche Hörnervenschäden also zunächst verborgene Hörminderungen verursachen, die zur generell mit dem Alter abnehmenden Hörfähigkeit wesentlich beitragen, ist eine inzwischen breit akzeptierte Hypothese. Gehörforscher und Mediziner entwickeln neue Testverfahren, um das Ausmaß des Problems zu untersuchen und zu klären, ob unser lärmbelasteter Lebensstil womöglich eine Epidemie von Gehörschäden bei Menschen aller Altersgruppen nach sich zieht.

Bislang war das Tonaudiogramm der Goldstandard von Hörtests. Es misst im Wesentlichen die Hörschwelle bei verschiedenen Frequenzen und zeigt höchst empfindlich Schäden an den Haarzellen der Cochlea an. Beeinträchtigungen der auditorischen Nervenfasern lassen sich mit dieser Methode jedoch kaum nachweisen. Laut unseren Forschungsergebnissen erschweren die Nervenschäden beim versteckten Hörverlust nicht grundsätzlich die Wahrnehmung von

Lauten, sondern eher das Verstehen von Sprache und das Deuten anderer komplexer Geräuschmuster. Sie könnten sogar die Hauptursache dafür sein, dass viele ältere Menschen es zwar hören, wenn andere in ihrer Nähe sprechen, aber oft nicht verstehen, was diese sagen.

Personen mit ähnlichen Tonaudiogrammwerten schneiden sehr unterschiedlich ab, wenn es darum geht, Sprache vor dem Hintergrund von Störgeräuschen zu erkennen – das wissen Audiologen schon lange. Solche Tests bestimmen die Anzahl der verstandenen Wörter bei zunehmendem Geräuschpegel. Die abweichenden Ergebnisse haben die Experten früher mit individuell verschiedener Signalverarbeitung im Gehirn erklärt. Unsere Forschungen legen jedoch nahe, dass sie hauptsächlich davon abhängen, wie viele der auditorischen Nervenfasern noch leben.

Ein versteckter Hörverlust könnte auch andere häufige Hörstörungen wie Tinnitus und Hyperakusis (übersteigerte Geräuschempfindlichkeit) erklären. Die Betroffenen haben oft ein normales Tonaudiogramm. Deshalb nahmen Forscher und Ärzte über Jahrzehnte an, dass für diese Störungen die Ursachen ebenfalls im Gehirn lägen, während wir wieder glauben, der Hörnerv könnte beeinträchtigt sein.

Damit stellen sich neue Fragen zu den Risiken von häufigen hohen Schallpegeln bei Konzerten, in Musikclubs und beim Musikhören mit Kopfhörern. Lärmbedingte Hörschäden sind ein bekanntes Problem bei professionellen Musikern, auch in der klassischen Musik. Hingegen ergaben epidemiologische Studien bei Personen, die nur gelegentlich Konzerte besuchen, bisher keinen relevanten Effekt auf das Audiogramm. Die Richtlinien zum Minimieren lärmbedingter Schäden am Arbeitsplatz basieren auf der Annahme, dass das Gehör sich vollständig erholt, wenn die Hörschwelle nach einer Lärmexposition auf Normalniveau zurückkehrt. Doch trifft das laut der neuen Erkenntnisse nicht zu. Die gegenwärtigen Schallschutzvorschriften reichen also womöglich für viele Arbeitsplätze nicht aus, um Schäden am Hörnerv und eine dadurch bedingte Schwerhörigkeit sicher zu verhindern.

Es bedarf daher verbesserter Untersuchungsmethoden, die solche neuronalen Beeinträchtigungen frühzeitig aufdecken. Wie bisher die Synapsen im Innenohr Verstorbener zu zählen, genügt da natürlich nicht. Ein viel versprechender Ansatz beruht auf der Messung der elektrischen Aktivität in Hörneuronen, der so genannten auditorischen Hirnstammreaktion (Abkürzung ABR, für englisch: auditory brainstem response). Bei dieser Hirnstamm-Audiometrie registrieren auf der Kopfhaut befestigte Elektroden die neuronale Antwort auf Schallimpulse verschiedener Frequenzen und Lautstärken, was auch bei schlafenden Personen funktioniert. Bislang interpretierte man das Resultat nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip: Trat eine Reaktion auf, galt das Gehör als normal, andernfalls als geschädigt.

Bei Tierexperimenten beobachteten wir jedoch, dass die Amplitude der ABR bei hohem Schallpegel weitere Informationen liefert. Sie wächst nämlich proportional zur Anzahl der auditorischen Nervenfasern, die über eine funktionie-

rende Verbindung zu den inneren Haarzellen verfügen. Eine aktuelle epidemiologische Studie wandte bei einer Gruppe britischer Studenten mit normalem Audiogramm eine Variante des ABR-Tests an. Ergebnis: Diejenigen, die sich bereits öfter den hohen Schallpegeln von Musikclubs und Konzertveranstaltungen ausgesetzt hatten, wiesen geringere ABR-Amplituden auf.

Lassen sich die neuen Erkenntnisse in Therapien für versteckten Hörverlust umsetzen? Derzeit versuchen wir in Laborexperimenten, die lärmbedingte Degeneration der Hörnervenfaser rückgängig zu machen. Dazu behandeln wir die überlebenden Neurone mit Substanzen, die neue Nervenfasern sprießen lassen. Diese könnten dann die verloren gegangenen Verbindungen zu den inneren Haarzellen wiederherstellen. Denn: Während eine Lärmbelastung die Synapsen sofort zerstört, sterben die übrigen Teile der Neurone – Zellkörper und Axone – langsamer ab. Dies stimmt uns optimistisch, dass sich die normale Funktion bei vielen Betroffenen wiederherstellen lässt. Erste Tierexperimente, bei denen wir nervenwachstumsfördernde Stoffe namens Neurotrophine direkt in das Innenohr einbrachten, zeigten ermutigende Resultate.

Vielleicht lässt sich der versteckte Hörverlust also schon bald auf diese Weise behandeln. Ein durchs Trommelfell injiziertes Gel würde allmählich Wachstumsfaktoren freisetzen, die im Verlauf von Monaten bis Jahren die Bildung neuer Hörnervensynapsen auslösen. Eine solche Behandlung sollte beispielsweise unmittelbar nach einem Knalltrauma angewendet werden, wie bei der Bombenexplosion an der Zielinie des Marathonlaufs in Boston 2013, wo mehr als 100 Zuschauer schwere Gehörschäden erlitten. Eines Tages könnte ein Ohrenarzt derartige Medikamente sogar minimalinvasiv direkt in die Cochlea einbringen. Damit ließen sich lärmbedingte Hörschäden ähnlich unkompliziert behandeln, wie Augenärzte etwa schon heute Kurzsichtigkeit mittels Laseroperation an der Hornhaut korrigieren. ~

DER AUTOR



M. Charles Liberman ist Professor für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde an der Harvard Medical School und Direktor der Eaton-Peabody-Labors an der Massachusetts Eye and Ear Infirmary. Er hat sich auf die Erforschung der Signalübertragung aus dem Innenohr ins Gehirn spezialisiert.

QUELLEN

Kujawa, S. G., Liberman, M. C.: Adding Insult to Injury: Cochlear Nerve Degeneration after »Temporary« Noise-Induced Hearing Loss. In: Journal of Neuroscience 29, S. 14077–14085, 2009

Kujawa, S. G., Liberman, M. C.: Synaptopathy in the Noise-Exposed and Aging Cochlea: Primary Neural Degeneration in Acquired Sensorineural Hearing Loss. In: Hearing Research 10.1016/j.heares.2015.02.009, 2015

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368106

Depression an der Wurzel packen

Um schwere psychische Störungen zu lindern, stimulieren Mediziner Nervenfaserbündel tief im Gehirn mit elektrischen Pulsen.

Von **Andres M. Lozano** und **Helen S. Mayberg**

»Ich empfinde plötzlich Frieden«, sagte die Patientin im Behandlungsraum – nur wenige Sekunden, nachdem einer von uns (Lozano) damit begonnen hatte, eine tief in ihrem Gehirn liegende Region elektrisch zu stimulieren. Die Frau mittleren Alters hatte bis dahin an schwerer Depression gelitten. Als wir ihr im Jahr 2003 im Toronto Western Hospital (Kanada) Elektroden ins Gehirn implantierten, hatten wir sie nur lokal betäubt, so dass sie bei Bewusstsein blieb und mit uns sprechen konnte.

Während wir nun langsam den Stromfluss über die Elektroden erhöhten, fragten wir unsere Patientin, ob sie eine Veränderung spüre. Zu unserer Überraschung sagte sie, der Raum, der ihr bis dahin schwarz-weiß erschienen sei, werde plötzlich bunt – als sei ein Lichtschalter umgelegt worden, der ihre Stimmung augenblicklich aufhellte.

Dieser bemerkenswerte Test war der erste von vielen, die in ein neues Behandlungsverfahren gegen depressive Erkrankungen mündeten: die tiefe Hirnstimulation, die bereits bei anderen Störungen wie der Parkinsonkrankheit eingesetzt wird (siehe auch »Mensch Maschine Visionen«, Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2015). An neuen Therapiemethoden gegen Depression besteht großer Bedarf. Etwa 17 Prozent

der US-Bevölkerung erleiden irgendwann in ihrem Leben einen oder mehrere Schübe einer unipolaren Depression (einer Depression ohne manische Episoden). Nach aktuellen Erhebungen sind in den USA derzeit etwa acht Prozent der Frauen und fünf Prozent der Männer davon betroffen. Aus Deutschland meldet das Robert Koch-Institut ähnliche Zahlen: zehn Prozent bei den Frauen, sechs Prozent bei den Männern.

Die unipolare Depression ist nicht einfach eine Episode trauriger Stimmung. Ihre Schübe sind gekennzeichnet durch anhaltende Niedergeschlagenheit, Schuldgefühle, vermindertes Selbstwertgefühl und mangelndes Interesse am Alltagsleben. Dieser Zustand kann sich negativ auf Denkfähigkeiten, Schlaf, Appetit und Libido auswirken und als körperlicher Schmerz erlebt werden. Der britische Staatsmann Winston Churchill (1874–1965), der immer wieder dagegen ankämpfte, nannte ihn seinen »schwarzen Hund«.

Die Krankheit verläuft vielfach tödlich. Schätzungsweise 15 Prozent der Patienten mit einer unipolaren Depression begehen Selbstmord. Zudem kann die Störung medizinische Probleme wie Herzleiden und Diabetes verstärken und damit die Lebenserwartung der Betroffenen herabsetzen. Die zur Verfügung stehenden Behandlungen – von der Psychotherapie über die Verordnung von Medikamenten bis zur Elektrokrampftherapie – sind im Allgemeinen recht effektiv, bringen allerdings 10 bis 20 Prozent der Patienten wenig bis keine Linderung. Diese Untergruppe könnte für eine tiefe Hirnstimulation in Frage kommen, sobald das Verfahren ausreichend entwickelt und getestet wurde.

Zurzeit ist die tiefe Hirnstimulation noch nicht reif für die klinische Routineanwendung bei Depression. Mediziner haben das Verfahren weltweit erst an wenigen hundert Menschen erprobt. Es erfordert, den Schädelknochen zu durchbohren und Elektroden dauerhaft ins Gehirn einzubringen. Folglich wird es niemals das Mittel der ersten Wahl sein. Wenn weitere Versuche jedoch gute Resultate liefern, könnte es zahlreichen Menschen helfen, die sonst in nicht enden wollender Verzweiflung versinken würden.

Im Jahr 2003 pflanzten wir depressiven Patienten erstmals Elektroden ein, um Hirngewebe elektrisch zu stimulieren.

AUF EINEN BLICK

ELEKTROIMPULSE FÜR DAS WOHLBEFINDEN

1 In westlichen Ländern erkrankt etwa jeder sechste Mensch irgendwann in seinem Leben an einer **unipolaren Depression**. Die verfügbaren Behandlungsmöglichkeiten reichen von psychologischer Beratung bis zur Elektrokrampftherapie, bringen jedoch bis zu jedem fünften Betroffenen kaum Linderung.

2 Mediziner versuchen depressiven Patienten mit einer **elektrischen Reizung bestimmter Hirnareale** zu helfen, verabreicht über Elektroden im Kopf. Zur Behandlung der Parkinsonkrankheit ist das bereits eine bewährte Methode.

3 Forscher kennen **spezielle Regelkreise** im Gehirn, die mit Depression in Zusammenhang stehen. Je mehr sie darüber in Erfahrung bringen, desto gezielter lassen sich die **Elektroden** platzieren und umso wirksamer und verträglicher wird die Therapie.



Schlagartig aus dem Dunkel:
Das Verabreichen pulsierenden
Stroms ins Gehirn hellt die
Stimmung von Depressiven
manchmal wie auf Knopf-
druck auf.

Wir wollten damit herausfinden, welche Regionen beim Zustandekommen einer Depression involviert sind. Neurowissenschaftler begannen damals zu erkennen, dass diese Störung, ebenso wie verschiedene andere Hirnerkrankungen, auf funktionelle Defizite in bestimmten Nervenzellnetzen zurückgeht. Das Zittern (Tremor) oder die Muskelsteifheit (Rigor) bei der Parkinsonkrankheit beispielsweise entstehen durch Fehler in Signalmustern, die Bewegungen steuern. Bei der Alzheimerkrankheit wiederum sind Strukturen gestört, die an der Gedächtnisbildung und dem Erinnerungsvermögen mitwirken. Analog dazu wiesen viele Befunde in den frühen 2000er Jahren darauf hin: Fehlfunktionen in Neuronennetzen, die den Gemütszustand regulieren, spielen offenbar eine wesentliche Rolle bei Depression.

Verdraltet und verflochten

Das Gehirn besteht aus knapp 100 Milliarden Nervenzellen, und jede davon ist mit tausenden anderen verknüpft. Einige Verbindungen gehen direkt zu benachbarten Zellen, andere erstrecken sich über große Distanzen quer durch das Zentralnervensystem. Die Beschaffenheit dieses Geflechts hängt von verschiedenen Einflüssen ab, etwa den Erbanlagen, den Lebenserfahrungen und Stresseinwirkungen. Störungen, die Depressionserkrankungen zu Grunde liegen, wirken sich vermutlich auf viele Hirnregionen aus. Dennoch versuchen Hirnforscher nach wie vor, diese Netzwerke so genau wie möglich zu verorten.

Mitte der 1990er Jahre begann eine von uns (Mayberg) eine Reihe von Experimenten zu konzipieren, um herauszufinden, welche Hirnareale darin involviert sind, Stimmungen zu regulieren – und zwar sowohl bei gesunden Menschen als auch bei Depressiven. In einem der ersten Tests mussten gesunde Freiwillige eine traurige Erfahrung, die sie früher gemacht hatten, erneut durchleben.

Mit Hilfe der Positronenemissionstomografie (PET) kann man dabei Hirnareale sichtbar machen, die ihre Aktivität bei Niedergeschlagenheit ändern. Auch der Blutfluss durch Hirngefäße lässt sich so erfassen. Wir erkannten, dass depressive Patienten in einem bestimmten Areal des Hirnzentrums eine deutlich höhere Durchblutung aufweisen als Gesunde. Im Gegensatz dazu ist ihre Hirnaktivität in Regionen vermindert, die für Motivation, Antrieb und Handlung bedeutsam sind.

Am aktivsten zeigte sich in den PET-Scans eine kleine Region mitten im Gehirn, in einem Teil der Area subcallosa des Gyrus cinguli. Die Region ist auch als Brodmann-Areal 25 bekannt, benannt nach dem deutschen Neuroanatomen Korbinian Brodmann (1868–1918). Er schuf 1909 einen Hirnatlas mit durchnummerierten Feldern, die sich jeweils durch eine besondere Anordnung ihrer Zellen auszeichnen. Mayberg stellte zudem fest, dass auch die Aktivität im Stirnlappen verändert war: Sie erwies sich bei Depressiven als umso geringer, je intensiver diese ihre Niedergeschlagenheit erlebten.

In einer zweiten Versuchsserie arbeitete Mayberg mit depressiven Patienten, die einige Wochen lang mit Antidepressiva behandelt worden waren. Wie die PET-Scans belegten,

ließ eine derart aufgehellte Stimmung die Aktivität im Brodmann-Areal 25 sinken und jene im Stirnlappen zunehmen. Obwohl auch in anderen Hirnregionen Veränderungen auftraten, wiesen die besonders auffälligen Reaktionen im Brodmann-Areal 25 darauf hin, dass dieses Gebiet eine entscheidende Rolle bei negativen Stimmungen spielt.

Das Areal steht mit vielen anderen wichtigen Hirnregionen in Verbindung, einschließlich des Stirnlappens, des Hypothalamus, des Nucleus accumbens, der Amygdala (des Mandelkerns) und des Hippocampus, außerdem des periaquäduktalen Graus und der dorsalen Raphe-Kerne. Diese Gebiete regulieren grundlegende Aspekte des menschlichen Verhaltens – etwa den Schlaf-wach-Rhythmus, die Motivationslage, Reaktionen auf wahrgenommene Bedrohungen und neue Reize, Belohnungsgefühle, das Kurzzeitgedächtnis und die Fähigkeit, aus früheren Erfahrungen auf künftige Ereignisse zu schließen. All diese Prozesse sind bei schwerer Depression beeinträchtigt. Mayberg fragte sich deshalb: Kann eine elektrische Beeinflussung des Brodmann-Areals 25, die dessen Aktivität quasi überschreibt, depressiven Patienten helfen?

2002 war die tiefe Hirnstimulation anderer Hirnregionen zum Behandeln der Parkinsonkrankheit und des essenziellen Tremors, einer weiteren recht häufigen Bewegungsstörung, zugelassen worden. Bis heute haben sich mehr als 100 000 Parkinsonpatienten diesem Therapieverfahren unterzogen. Wir wussten also, die Methode ist beim Menschen einsetzbar, denn das chirurgische Vorgehen dabei unterscheidet sich bei Parkinson- und Depressionskranken nicht. Die Patienten müssen allerdings bestimmte Kriterien erfüllen: Sie leiden seit mindestens einem Jahr an der Störung und haben wenigstens vier verschiedene medikamentöse Therapien erhalten, ohne dass dies zu einer Besserung führte. Außerdem hat sich die Elektrokrampftherapie bei ihnen als unwirksam erwiesen oder wurde von ihnen abgelehnt.

Die tiefe Hirnstimulation ist nicht zu verwechseln mit der Elektrokrampftherapie. Letztere löst einen kontrollierten epileptischen Anfall aus, während der Patient narkotisiert ist und unter dem Einfluss von Mitteln steht, die die Muskelfunktion ausschalten (»Muskelrelaxanzien«). Die Behandlung wird über mehrere Wochen hinweg in kurzen Sitzungen wiederholt. Bei der tiefen Hirnstimulation hingegen verabreicht ein Gerät unablässig schwache elektrische Pulse in ausgewählte Hirnregionen hinein, die mit anderen, depressionsrelevanten Hirnarealen vernetzt sind. Der Patient muss sich vorher einem umfangreichen chirurgischen Eingriff unterziehen, damit Mediziner die hierfür nötigen Elektroden in seinen Kopf implantieren können. Manche befürchten, dass das zu einem Gedächtnisverlust führen könnte. Dies wurde bisher aber noch nie beobachtet – im Gegensatz zur Elektrokrampftherapie, bei der solche Ausfälle durchaus vorkommen.

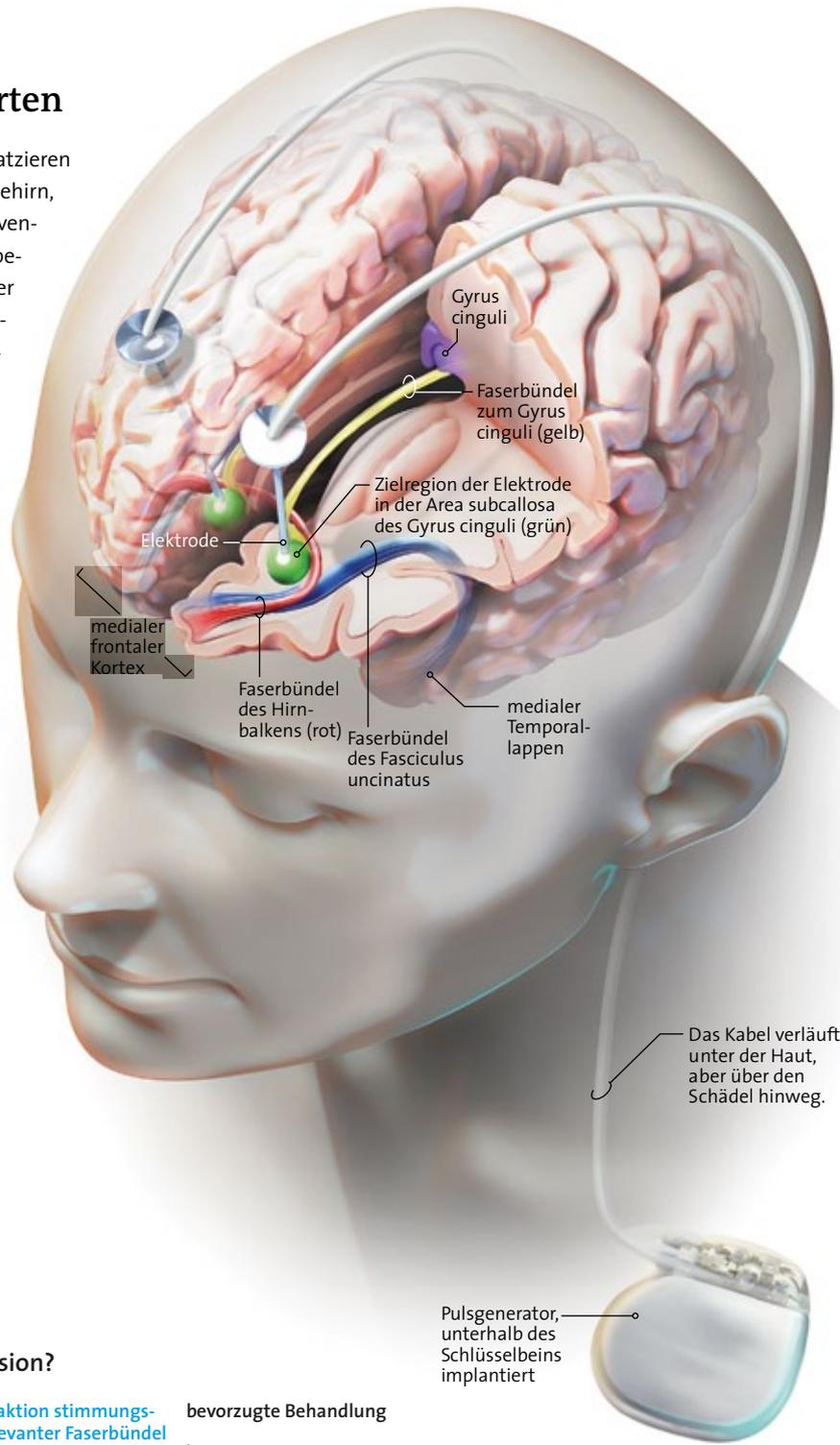
Als wir den Eingriff 2003 erstmals an einer depressiven Patientin vornahmen, fixierten die Chirurgen den Kopf der Frau in einer Halterung. Mit Hilfe von MRT-Bildgebung spürten wir die exakte Stelle im Brodmann-Areal 25 auf, an der

Das Gehirn neu starten

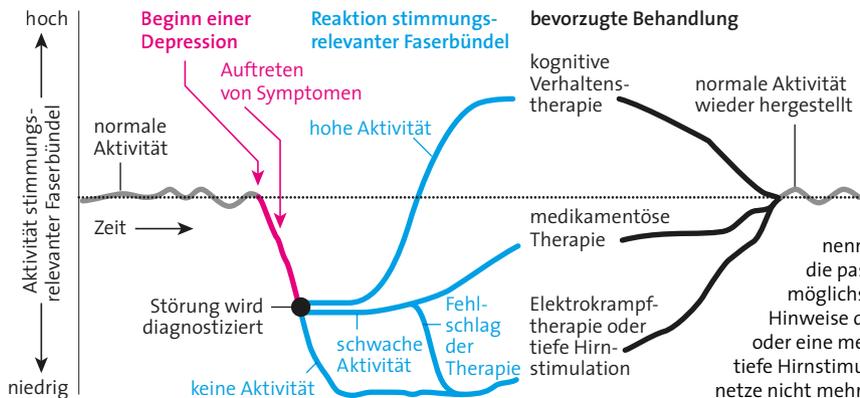
Bei der tiefen Hirnstimulation platzieren Mediziner feine Elektroden im Gehirn, um elektrische Ströme durch Nervenfaserbündel zu schicken, die bestimmte Hirnregionen miteinander verknüpfen. Einige dieser Verbindungen funktionieren bei Menschen, die an unipolarer Depression leiden, nicht mehr richtig. Die elektrische Stimulation kann den Beeinträchtigungen entgegenwirken und so in kürzester Zeit das Gefühl von Hoffnungs- und Freudlosigkeit auflösen. Allerdings ist die Technik noch nicht reif für den routinemäßigen klinischen Einsatz.

Die Zielregion

Die Elektroden sollen mehrere miteinander verbundene Hirnregionen beeinflussen. Der Chirurg positioniert sie deshalb in beiden Hirnhälften nahe dem Brodmann-Areal 25 in der Area subcallosa des Gyrus cinguli (grün). Von dort ziehen Nervenfaserbündel, die an Entscheidungsprozessen, am Gefühlsleben und an der Gedächtnisbildung beteiligt sind, in andere Teile des Gehirns. Einige dieser Fasern (rot und blau) treten mit dem medialen frontalen Kortex in Verbindung, andere (gelb) mit dem Gyrus cinguli. Sie alle funktionieren während einer depressiven Episode nicht mehr normal.



Wie therapiert man Depression?



Depressive Störungen bringen die Funktion bestimmter Nervenfaserbündel durcheinander. Diese können darauf reagieren und die Normalfunktion wiederherstellen – beim einen Patienten mehr, beim anderen weniger. Je nachdem, wie gut die Neuro-netze dazu in der Lage sind, sollten Mediziner die passende Therapie wählen, um die Regeneration möglichst wirksam zu unterstützen. Hirnscans können Hinweise darauf liefern, ob etwa eine Verhaltenstherapie oder eine medikamentöse Behandlung angemessen ist. Die tiefe Hirnstimulation bietet sich an, wenn die Nervenzell-netze nicht mehr zur Selbstkorrektur in der Lage sind.

ILLUSTRATION: DAVID KULIPACK; NACH: DEFINING CRITICAL WHITE MATTER PATHWAYS MEDIATING SUCCESSFUL SUBCALLOSAL CINGULATE DEEP BRAIN STIMULATION FOR TREATMENT-RESISTANT DEPRESSION IN BIOLOGICAL PSYCHIATRY 76, S. 963-969, 2014. DIAGRAMM: JEN CHRISTIANSEN; NACH: MAYERBERG, H.S. TARGETED ELECTRODE-BASED MODULATION OF NEURAL CIRCUITS FOR DEPRESSION. IN: JOURNAL OF CLINICAL INVESTIGATION 119, S. 717-723, 2009, FIG. 2

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



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



FOTO: J. / HALILIBRAHIM KURUCAN

wir die Elektrodenenden platzieren wollten. Unter örtlicher Betäubung bohrten die Ärzte zwei Löcher in den Schädel, um die Elektroden ins Gehirn einzuführen.

Mit Hilfe der Neurophysiologen William D. Hutchison und Jonathan O. Dostrovsky erfassten wir über solche Elektroden die Nervenzellaktivität in besagtem Areal, um etwas über die Funktion der dortigen Neurone zu erfahren. Auf Grund der Ergebnisse früherer PET-Studien vermuteten wir, dass diese Hirnregion daran beteiligt sei, Gefühle zu verarbeiten, die mit Trauer in Zusammenhang stehen. Mit einer Mikroelektrode, deren Spitze feiner als ein menschliches Haar war, konnten wir die zelluläre Aktivität von Neuronen in diesem Gebiet direkt ableiten.

Während der Messungen präsentierten wir der Patientin verschiedene emotional positiv oder negativ besetzte Bilder. Wir stellten fest, dass die Nervenzellen im Brodmann-Areal 25 am stärksten feuerten, wenn wir die Patientin mit traurigen und verstörenden Fotos konfrontierten. Auf glückliche, erheiternde oder emotional neutrale Szenen sprachen die Neurone hingegen kaum an.

Als Nächstes führten wir Stimulationselektroden in das Areal ein. Binnen Sekunden nach dem Einschalten des pulsierenden Stroms berichtete die Patientin von einer deutlichen Linderung ihres seelischen Schmerzes und ihrer Schwermut. Es war, als ob eine drückende Last von ihr genommen wäre – eine Beobachtung, die wir später noch an vielen weiteren Patienten machten. Die Wirkung erschien bei der ersten Stimulation besonders deutlich. Verabreichten wir die elektrischen Pulse wiederholt, blieb der Effekt bestehen, schwächte sich allerdings ab. Heute wissen wir, dass die Behandlung über Tage oder Wochen hinweg anhalten muss, damit eine bleibende Linderung eintritt. Bei diesem und bei späteren chirurgischen Eingriffen lernten wir zudem, die Elektroden sehr genau zu platzieren und so eine konstant intensive Stimulation zu erreichen.

Maybergs Mitarbeiter Patricio Riva Posse und Ki Sueng Choi haben zu diesem Zweck ein neues bildgebendes Verfahren entwickelt. Damit können sie Nervenfaserbündel in der weißen Substanz des Gehirns exakter als bisher möglich lokalisieren. Das betrifft auch jene Bündel, die sich im Brodmann-Areal 25 kreuzen und die, wenn sie auf geeignete Weise stimuliert werden, Depressionssymptome sowohl augenblicklich als auch lang anhaltend lindern.

Sobald die Elektroden im Gehirn platziert und am Schädel befestigt sind, setzt der Chirurg in der Schlüsselbeinregion einen Impulsgenerator unter die Haut ein, der einem Herzschrittmacher ähnelt. Dieses batteriebetriebene Gerät erzeugt kontinuierlich 130 elektrische Impulse pro Sekunde, die über die Elektroden in die Zielregion gelangen. Pulsbreite, -amplitude und -form sind variabel und werden individuell angepasst, um die klinische Wirkung zu optimieren. Typischerweise beträgt die Pulsbreite einige zehn Mikrosekunden und die Amplitude wenige Volt; zum Einsatz kommen uni- oder bipolare Pulse. Beim Festlegen dieser Parameter orientieren wir uns an den Erfahrungen, die Ärzte im Zuge der tiefen Hirnstimulation von Parkinsonpatienten gewonnen haben, und bislang scheint es, als liefere diese relativ hochfrequente Stimulation die besten klinischen Ergebnisse.

Wenn Elektroden und Pulsgenerator implantiert, verbunden und in Betrieb genommen sind, ist der chirurgische Teil der Behandlung beendet. Mit Hilfe einer mobilen, drahtlosen Fernsteuerung können die Ärzte jetzt die Stimulationsparameter anpassen und optimieren, ohne hierfür den Körper des Patienten erneut öffnen zu müssen. Dies erlaubt es, verschiedene Pulsmuster zu testen – etwa um Patienten zu helfen, die auf die Standardbehandlung nicht hinreichend ansprechen, oder um die antidepressive Wirkung zu beschleunigen. Ungefähr alle drei Jahre muss man die Batterien des Generators austauschen.

Heilungschancen unterscheiden sich stark

Einige Patienten zeigen infolge der tiefen Hirnstimulation keinerlei Symptome einer Depression mehr. Der Effekt der Behandlung variiert jedoch individuell, so dass sie leider nicht allen hinreichend hilft. Man spricht von einer klinischen Reaktion, wenn die Beschwerden um mindestens 50 Prozent zurückgehen – gemessen auf Skalen zur Beurteilung der Depressionsschwere. Der Anteil der Patienten, die eine solche Reaktion zeigen, unterscheidet sich von Klinik zu Klinik und liegt in einem sechsmonatigen Beobachtungszeitraum zwischen 40 und 70 Prozent. Noch erweist es sich als schwierig, anhand von Symptomen und Hirnscans herauszufinden, bei welchen Patienten eine tiefe Hirnstimulation besonders erfolgversprechend erscheint und bei welchen nicht.

Recht große Beachtung fand eine Studie des US-Unternehmens St. Jude Medical, das seinen Sitz in St. Paul (Minnesota) hat. Sie lieferte niederschmetternde Ergebnisse. 2013 beschlossen die Studienleiter, keine neuen Patienten mehr in ihre Untersuchung aufzunehmen, obgleich sie die Behandlung der bereits beteiligten Patienten fortsetzten. Die amerikanische Arzneimittelzulassungsbehörde FDA hatte zur Halbzeit der Studie eine Analyse angefordert. Laut dieser waren die Depressionssymptome bei Patienten mit implantierten Hirnschrittmachern und aktiver Stimulation nicht wesentlich stärker zurückgegangen als bei Patienten mit implantierten, aber ausgeschalteten Geräten.

Es ist unklar, wie es zu solch krassen Abweichungen bei den Resultaten kommt. Möglicherweise spielen studienspe-

zifische Kriterien für die Auswahl der Patienten eine Rolle. So litten einige Teilnehmer vielleicht nicht nur an einer Depression, sondern noch an weiteren psychischen Störungen. Unterschiede könnte es zudem bei der Platzierung der Elektroden oder dem genauen Ablauf der Stimulation gegeben haben. Sicher greifen auch Placeboeffekte: Die Interaktionen zwischen Medizinern und Behandelten sind manchmal sehr intensiv, wovon Letztere psychologisch profitieren – zumal der recht aufwändige Eingriff viele Betroffene in ihrem Vertrauen bestärkt, jetzt gehe es ihnen sicher bald besser.

Manche dieser Störgrößen bekommt man mit langen Beobachtungszeiten in den Griff, wie jüngere Untersuchungen belegen. So verschlechtert sich der Zustand von aktiv behandelten Patienten, wenn die Batterie zur Neige geht oder der Generator aussetzt. Setzt die Stimulation erneut ein, verbessert er sich wieder, was einen Placeboeffekt weitgehend ausschließt: Die Patienten spüren die Pulse ja nicht direkt.

Da sich das Brodmann-Areal 25 nicht bei allen Patienten als idealer Zielort erwiesen hat, suchen manche Forscher nach anderen geeigneten Regionen. Volker Coenen, derzeit am Uniklinikum Freiburg, und Thomas Schläpfer vom Universitätsklinikum Bonn haben einer kleinen Anzahl von Patienten rasche Linderung verschafft, indem sie das mediale Vorderhirnbündel reizten. Als Zielregionen bieten sich auch andere tief im Gehirn liegende Gebiete an, wie das ventrale Striatum, der vordere Bereich der Capsula interna und die Habenula.

Die testweise Stimulation verschiedener Hirnareale, die bei Depression eine Rolle spielen könnten, liefert vielleicht wichtige Hinweise, um die Störung künftig besser abgestimmt auf die jeweiligen Symptome zu behandeln – wie es bei der Parkinsonkrankheit bereits der Fall ist. Depressive Patienten zeigen variierende Krankheitsmerkmale, die sich in unterschiedlichen Aktivitätsmustern ihrer Hirnscans spiegeln. Diese Muster zu analysieren, kann schon heute wichtige Anhaltspunkte dazu erbringen, ob eine medikamentöse Behandlung oder eine Verhaltenstherapie mehr Erfolg verspricht – und das könnte künftig auch für die tiefe Hirnstimulation gelten.

Um genauer zu verstehen, wie das Verfahren die Hirnfunktionen beeinflusst, ist noch mehr Grundlagenforschung nötig. Ein Beispiel: Nach einer längeren Phase elektrischer Stimulation können die antidepressiven Wirkungen tage- bis wochenlang anhalten, selbst wenn der Pulsgenerator ausgeschaltet wird. Offenbar führt die Reizung zu lang anhaltenden Veränderungen im Gehirn – ein als Neuroplastizität bekanntes Phänomen. Tatsächlich gibt es bei Nagetieren Hinweise darauf, dass tiefe Hirnstimulation die Aktivität ausgehnter Neuronennetze verändert und die Bildung neuer Nervenzellen im Hippocampus anregt. Von Bedeutung ist das sowohl für die Gedächtnisbildung als auch für die Depressionlinderung. Nach längerer Therapiepause kehren die Symptome jedoch zurück; die Behandlung führt also nicht zu dauerhafter Heilung.

Neuronennetze im Gehirn mittels elektrischer Reizung zu beeinflussen, könnte sich auch bei anderen psychischen Er-

krankungen als wirksame Behandlung erweisen. Fachleute denken hier etwa an die bipolare Störung, das Tourette-Syndrom sowie Alkohol- und Drogensucht. Die tiefe Hirnstimulation bietet sich generell als Therapie für Patienten an, deren Störung auf fehlerhaft arbeitenden Nervenzellnetzen beruht und bei denen herkömmliche Behandlungsmethoden versagen.

Kürzlich gelang es uns, durch Stimulieren des Brodmann-Areals 25 sogar Menschen mit schwerer chronischer Anorexia nervosa zu helfen, der psychisch bedingten Essstörung Magersucht. Einigen Patienten, die seit zehn oder mehr Jahren darunter gelitten hatten, ging es nach der Behandlung deutlich besser: Verstimmung, Angst und Zwanghaftigkeit ließen bei ihnen nach. Die Betroffenen empfanden Nahrungsaufnahme und Gewichtszunahme als weniger negativ und waren Therapien gegenüber aufgeschlossener als vorher. Bei etwa der Hälfte der 18 Teilnehmer hellte sich die Stimmung so stark auf, verbunden mit entsprechend verändertem Verhalten, dass sie binnen eines Jahres wieder ihr Normalgewicht erlangten.

All diese Befunde zeigen uns neue therapeutische Möglichkeiten auf. Je mehr wir über die Funktionen neuronaler Regelkreise wissen, umso leichter fällt es uns, Störungen der Hirnaktivität zu erklären. Und desto gezielter lassen sich Elektroden im Gehirn platzieren, um schwer behandelbaren Depressiven, Magersüchtigen und vielleicht auch Demenzkranken deutliche Linderung zu verschaffen. ~

DIE AUTOREN



Andres M. Lozano ist Professor an der chirurgischen Abteilung der University of Toronto (Kanada). Er hat sich auf die Behandlung von Bewegungsstörungen und auf die Messung von Hirnströmen spezialisiert. **Helen S. Mayberg** ist Professorin für

Psychologie, Neurologie und Radiologie an der Emory University (Atlanta, USA). Ihre Forschungen drehen sich darum, neuronale Regelkreise im Gehirn zu finden, die für die Entstehung der Depression eine Rolle spielen könnten.

QUELLEN

Lipsman, N., Lozano, A. M.: Targeting Emotion Circuits with Deep Brain Stimulation in Refractory Anorexia Nervosa. In: *Neuropsychopharmacology* 39, S. 250–251, 2014

Lozano, A. M., Lipman, N.: Probing and Regulating Dysfunctional Circuits using Deep Brain Stimulation. In: *Neuron* 77, S. 406–426, 2013

Russo, S. J., Nestler, E. J.: The Brain Reward Circuitry in Mood Disorders. In: *Nature Review Neuroscience* 14, S. 609–625, 2013

WEBLINKS

www.tiefehirnstimulation.de

Die Arbeitsgemeinschaft »Tiefe Hirnstimulation«, ein gemeinnütziger Verein, stellt sich vor.

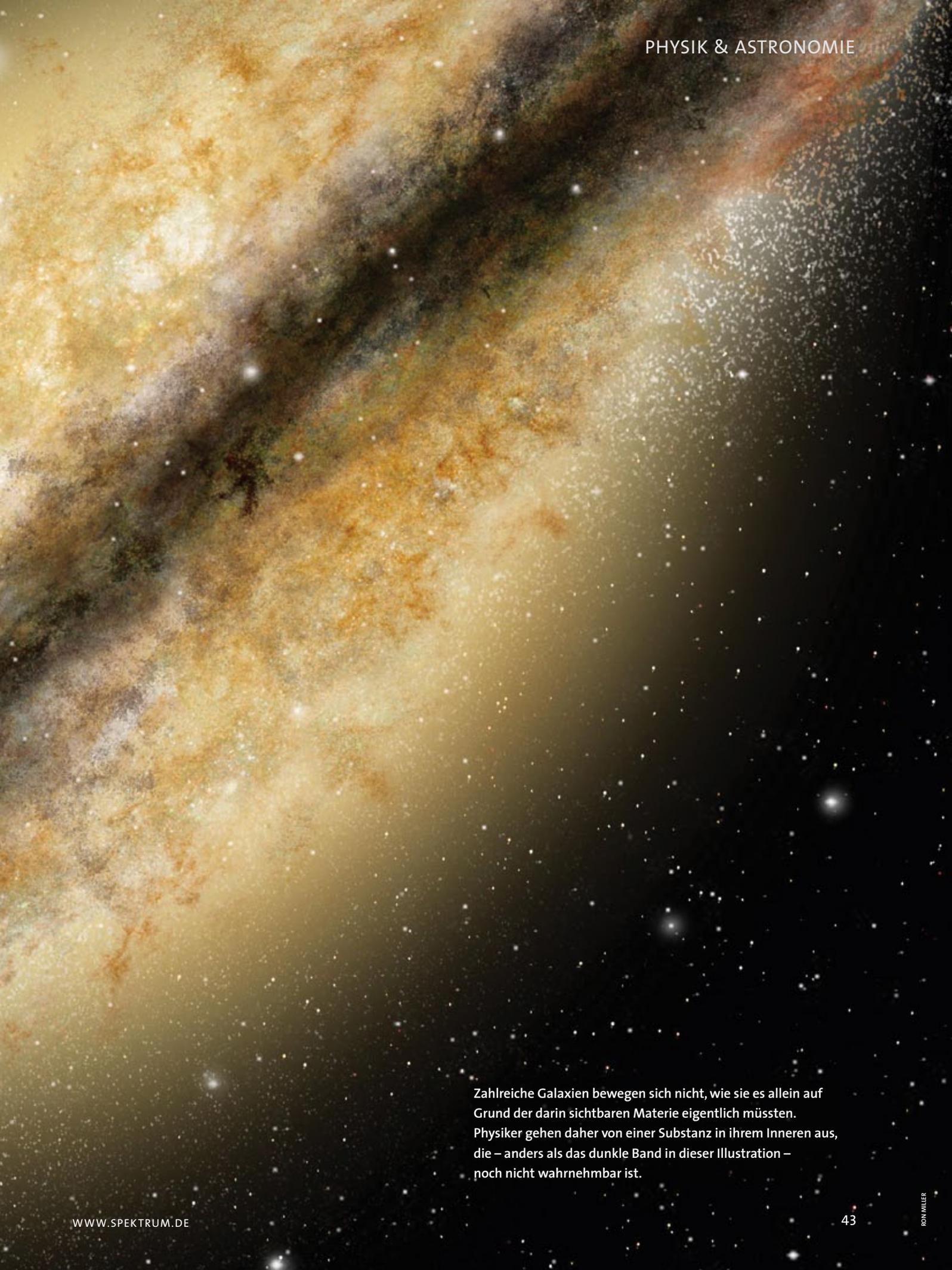
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368105

TITELTHEMA: DUNKLE MATERIE

Der verborgene Kosmos

Viele Beobachtungen im Universum legen nahe, dass es neben der sichtbaren Materie noch eine andere, »dunkle« Komponente geben müsste. Lange waren die Forscher von nur einer Sorte an Teilchenkandidaten dafür ausgegangen: den WIMPs. Doch möglicherweise ist die unsichtbare Seite des Alls weitaus vielfältiger.

Von Bogdan A. Dobrescu und Don Lincoln



Zahlreiche Galaxien bewegen sich nicht, wie sie es allein auf Grund der darin sichtbaren Materie eigentlich müssten. Physiker gehen daher von einer Substanz in ihrem Inneren aus, die – anders als das dunkle Band in dieser Illustration – noch nicht wahrnehmbar ist.

Viele Spiralgalaxien wie die Andromedagalaxie stellen uns vor ein Rätsel: Ihre Rotationsgeschwindigkeit lässt sich nicht mit den bekannten Gesetzen der Physik erklären. Denn auf Grund der Schwerkraft der sichtbaren Materie sollten die Sterne in den Außenregionen langsamer rotieren, als sie es tatsächlich tun.

Deshalb glauben Kosmologen, dass eine Form nicht sichtbarer Materie – die so genannte Dunkle Materie – solche Galaxien umgibt und durchdringt. Sie sollte eine zusätzliche Komponente der Gravitation beisteuern, welche die beobachtete Rotationsgeschwindigkeit erklärt. Diese Dunkle Materie, die vermutlich 25 Prozent der Gesamtmasse des Universums ausmacht, könnte auch die Ursache für bestimmte, bisher rätselhafte Effekte im Kosmos sein. So etwa für die extrem hohen Eigengeschwindigkeiten von Galaxien innerhalb von Galaxienclustern, für die Materieverteilung, die sich ergibt, wenn zwei solche Cluster miteinander kollidieren, oder für gewisse Beobachtungen des Gravitationslinseneffekts – die Ablenkung von Licht im Gravitationsfeld ferner Galaxien.

Die einfachsten Modelle postulieren für die Dunkle Materie nur eine einzige Teilchensorte. Doch trotz jahrelanger Suche ist es den Forschern noch nicht gelungen, deren Existenz nachzuweisen. Außerdem weichen einige astronomische Beobachtungen von manchen Vorhersagen dieser einfachen Theorie ab. Aus diesem Grund haben einige Wissenschaftler die traditionellen Vorstellungen in Frage gestellt und ein komplizierteres Bild der Dunklen Materie entworfen. Demnach sollte diese aus verschiedenen Teilchensorten bestehen und könnte ähnlich komplex aufgebaut sein wie gewöhnliche Materie.

Möglicherweise wirken sehr starke, bisher ungeahnte Kräfte zwischen diesen Teilchen, welche die gewöhnliche Materie kaum oder gar nicht spürt. Jüngste Beobachtungen von kollidierenden Galaxien könnten diese Hypothese stützen. Außerdem würden solche Kräfte die Abweichung zwischen den einfachen Modellen für Dunkle Materie und einigen anderen Beobachtungen erklären.

Existenz im Verborgenen

Zwar wissen wir nicht, wie die Dunkle Materie aufgebaut ist. Aber aus bestimmten Beobachtungen können wir – neben ihrer gravitativen Wirkung auf die gewöhnliche Materie – noch auf einige andere Eigenschaften von ihr schließen. So müssen wir davon ausgehen, dass sie sich sehr viel langsamer als mit Lichtgeschwindigkeit bewegt, aber zugleich eine verhältnismäßig große Ruhemasse besitzt. Sonst hätten aus den Dichtefluktuationen im frühen Universum nicht die heutigen Galaxienstrukturen entstehen können. Und da sie weder elektromagnetische Strahlung absorbiert noch aussendet, muss die Dunkle Materie elektrisch neutral sein. Zudem scheint sie nicht auf die starke Kraft anzusprechen, welche die Atomkerne der gewöhnlichen Materie zusammenhält. Denn wäre dies der Fall, hätten wir bereits Hinweise auf die Wechselwirkung von Dunkler Materie mit hochenergetischen, geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung beob-

achten müssen. Allerdings glaubten Wissenschaftler bis vor Kurzem, die Dunkle Materie würde vielleicht über die schwache Kraft wechselwirken, die für den Betazerfall verantwortlich ist. Jedoch widersprechen neueste Beobachtungen auch dieser Vermutung.

Außerdem muss Dunkle Materie über kosmische Zeitskalen hinweg stabil bleiben. Denn es gibt keinen zuverlässigen Mechanismus, der kontinuierlich neue erzeugen könnte. Deshalb sollte sie ebenso wie die gewöhnliche Materie bereits beim Urknall entstanden sein. Ein Teilchen als stabil zu bezeichnen, heißt aber auch: Es besitzt eine Eigenschaft, die unter allen Umständen erhalten bleibt, eine so genannte Erhaltungsgröße. Das bedeutet, dass ein Teilchen nicht zerfallen kann, falls diese spezifische Eigenschaft dabei verloren ginge. Tatsächlich tendieren Teilchen dazu, in leichtere zu zerfallen – es sei denn, irgendetwas hindert sie daran. Das Elektron zum Beispiel ist geladen. Die einzigen stabilen Teilchen aber, die leichter als dieses sind, tragen keine elektrische Ladung: die Neutrinos und das Photon. Vom Standpunkt der Energieerhaltung könnte das Elektron zwar in diese Teilchen zerfallen, doch die Ladungserhaltung verbietet solche Übergänge.

Die meisten theoretischen Modelle der Dunklen Materie schreiben diesen Teilchen eine Erhaltungsgröße zu, die aus historischen Gründen Parität heißt. Davon besitzen die Dunkle-Materie-Teilchen den Wert -1 , alle Teilchen der gewöhnlichen Materie den Wert $+1$. Die Parität verbietet es einem Dunkle-Materie-Teilchen, in gewöhnliche Materie zu zerfallen und umgekehrt.

Die einfachste Theorie, die all diese Forderungen in sich vereinigt, geht von einem einzigen Dunkle-Materie-Teilchen namens WIMP (Abkürzung für weakly interacting massive particle) aus. Es gibt viele theoretische Gründe, die für WIMPs sprechen. Sie nachzuweisen, gestaltet sich aber viel schwieriger, als die Physiker ursprünglich erwartet haben. Seit den 1990er Jahren führen sie Experimente durch, mit denen sie versuchen wollen, WIMPs auf Grund der postulierten sehr seltenen Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie nachzuweisen.

Um bei ihren Experimenten die notwendige Messempfindlichkeit zu erreichen, kühlen die Forscher die Detektoren

AUF EINEN BLICK

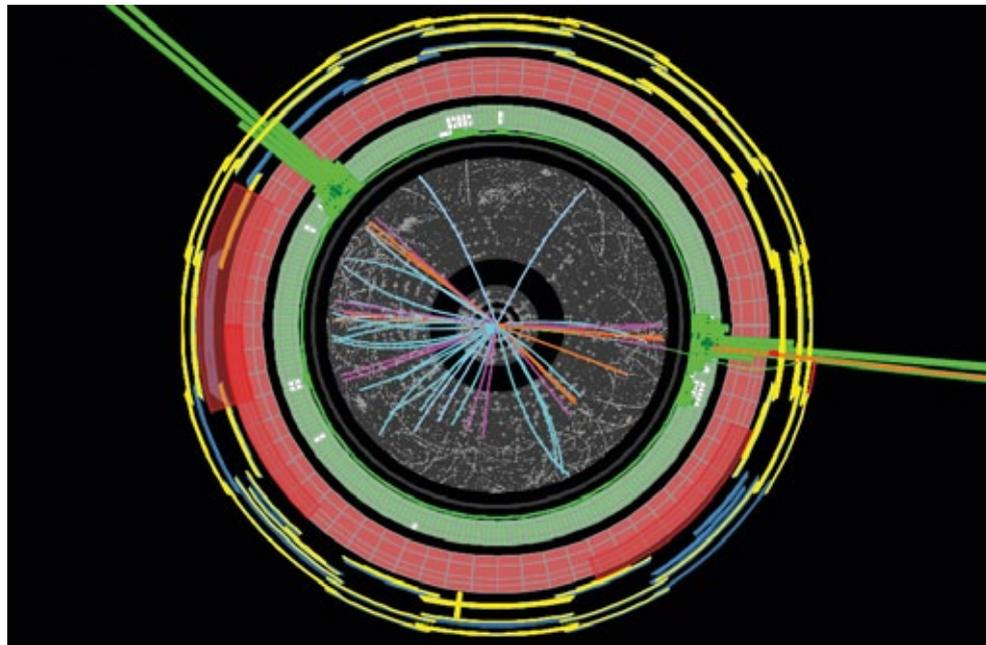
SORTENREICHE DUNKLE SEITE

1 Wissenschaftler wissen durch astronomische Beobachtungen, dass es im Universum **mehr Materie** geben muss, als sie in heutigen Experimenten beobachten können.

2 Bislang haben sich viele Physiker vergeblich darauf konzentriert, ein **einzelnes Teilchen** zu finden, das dafür verantwortlich sein könnte. Doch inzwischen erscheinen exotische Theorien immer plausibler, die von einem **Zusammenspiel vieler verschiedener Kandidaten** ausgehen.

3 Derart komplexe Dunkle Materie könnte nicht nur **Atome und Moleküle bilden**, sondern sogar ganze **unsichtbare Galaxien** inmitten der Spiralarme der bekannten Sternensinseln.

Bei Kollisionen mit zwei Protonen wie hier am ATLAS-Detektor des CERN finden sich Signaturen, die mit einigen Modellen für Dunkle Materie vereinbar sind (grüne Linien).



auf extrem niedrige Temperaturen herunter. Außerdem platzieren sie sie tief unter der Erde, um sie von kosmischer Strahlung abzuschirmen. Diese könnte nämlich ähnliche Signaturen hervorrufen wie die Dunkle Materie. Doch obwohl solche Experimente kontinuierlich verbessert wurden, existieren bisher noch keine schlüssigen Anzeichen für WIMPs. Und selbst wenn das Modell viele Beobachtungen im All erklären kann, lässt es sich nicht mit allen vereinbaren.

Zum Beispiel sagt die WIMP-Theorie eine viel größere Anzahl von Zwerggalaxien voraus, welche die Milchstraße umkreisen sollten, als wir beobachten. Außerdem sollte sich die Dunkle Materie in den Zentren von Galaxien noch mehr konzentrieren, als die gemessenen Rotationsraten es vermuten lassen. Allerdings wurden kürzlich im Rahmen des Dark Matter Survey weitere Zwerggalaxien in der Nachbarschaft der Milchstraße entdeckt. Dies könnte das Problem zumindest Bezug auf unsere Heimatgalaxie lösen. Nichtsdestoweniger haben die Ungereimtheiten die Tür für unkonventionellere Theorien geöffnet.

Komplexe Parallelwelt

Anstatt eines einzigen Dunkle-Materie-Teilchens wäre es auch denkbar, dass verschiedene Teilchenklassen existieren und ebenso eine Vielzahl an Kräften, die nur auf die Dunkle Materie wirken. Diese Teilchen könnten zum Beispiel eine neuartige dunkle Ladung tragen, auf Grund deren sie sich anziehen oder abstoßen, aber dennoch im herkömmlichen Sinn elektrisch neutral sein. So wie gewöhnliche Teilchen mit elektrischer Ladung Photonen – die Träger der elektromagnetischen Kraft – emittieren, könnte die neue Stoffgattung dunkle Photonen aussenden.

Die Parallelen zu der Welt aus gewöhnlicher Materie müssen aber irgendwo ihre Grenzen haben. Denn wir wissen: Normale Materie kann dank der Emission von Photonen

Energie austauschen und abstrahlen. Das ist letztlich der Grund dafür, warum Galaxien schließlich Scheiben bilden: Die Gaswolken in ihnen emittieren elektromagnetische Energie, wodurch sie auskühlen und verklumpen. Wegen der Drehimpulserhaltung fällt die Materie aber nicht zentriert in sich zusammen, sondern bildet eine Scheibe. Wenn dieselben Regeln für die Dunkle Materie gelten sollten, müsste auch sie eine solche Scheibe bilden. Doch es ist bekannt, dass die meiste Dunkle Materie, die sich in uns bekannten Galaxien befindet, eher sphärisch verteilt ist. Daher können wir eine solche exakte Spiegelwelt ausschließen.

Eines der einfachsten Szenarien, das von zwei unterschiedlichen dunklen Teilchensorten ausgeht, gibt einen Einblick in die physikalischen Gesetze, wie sie in komplexerer Dunkler Materie gelten könnten. Existierten zwei Arten von dunkler Ladung – eine positive und eine negative –, gäbe es auch eine Form von dunklem Elektromagnetismus und damit dunkle Photonen. Und so wie sich Teilchen gewöhnlicher Materie gegenseitig annihilieren, wenn sie auf ihre Antiteilchen treffen, sollten dunkle Materieteilchen das ebenfalls können und dabei dunkle Photonen aussenden.

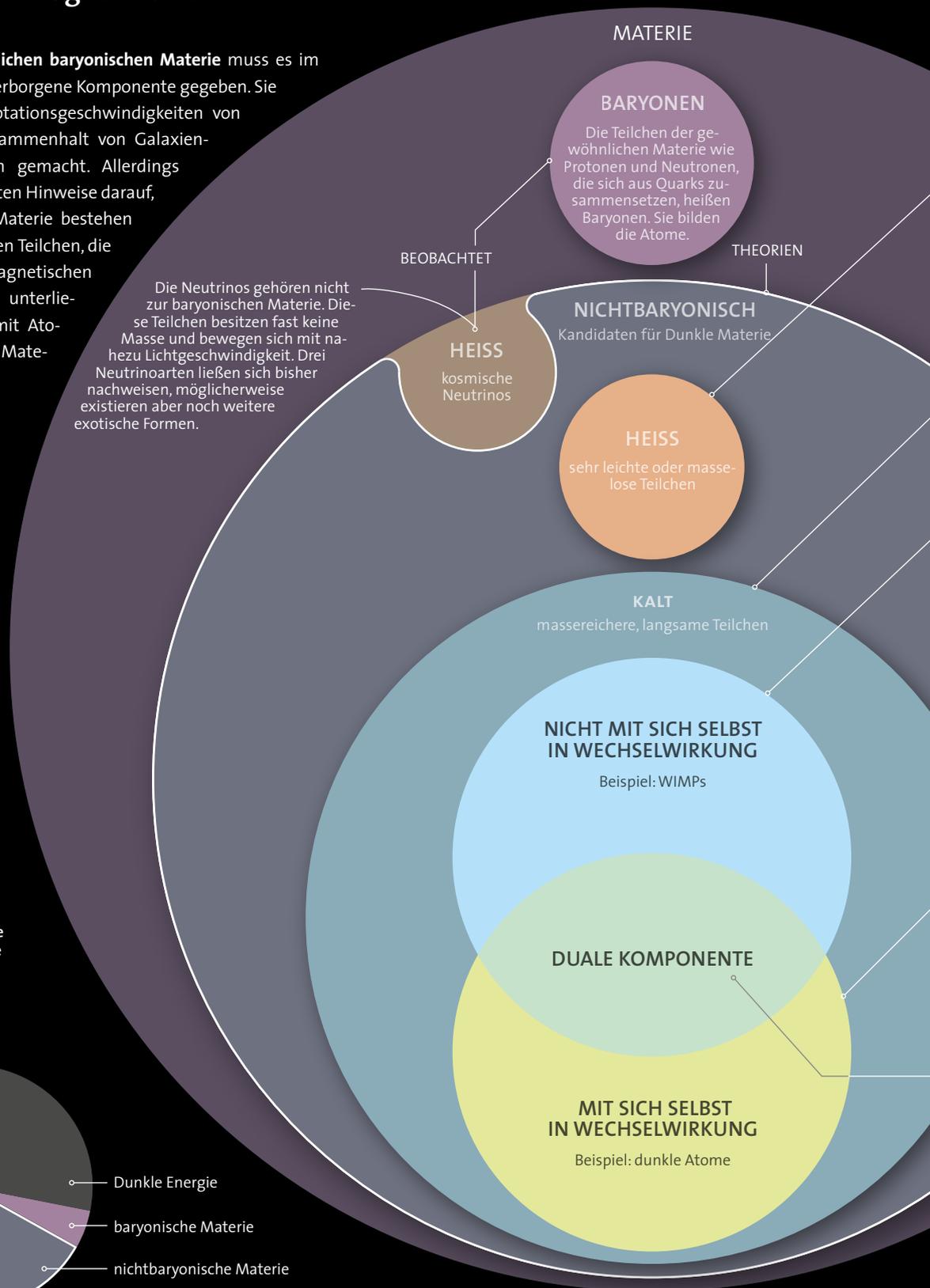
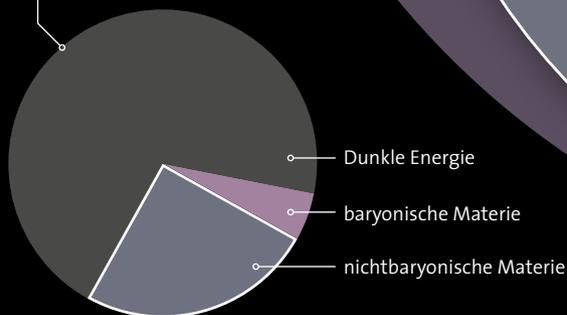
Nun können wir bestimmte Schlüsse über die Stärke des dunklen Elektromagnetismus und die Häufigkeit solcher Vernichtungsreaktionen ziehen, wenn wir bedenken, wie diese Kraft Galaxien indirekt beeinflusst. Da die Dunkle Materie bei den meisten Galaxien in einem sphärischen Halo verteilt und nicht wie normale Materie abgeplattet ist, können wir davon ausgehen, dass die Dunkle Materie nicht mit derselben Rate Energie über dunkle Photonen verliert wie gewöhnliche Materie über ihre Photonen. Falls dennoch eine dunkle Ladung existieren sollte, dürfte diese nach einer Studie von Lotty Ackerman und ihren Kollegen vom California Institute of Technology aus dem Jahr 2009 nur etwa ein Prozent der Ladung gewöhnlicher Materie betragen. Doch selbst bei so

Dunkle Materie: Ein Modell der Möglichkeiten

Zusätzlich zur gewöhnlichen baryonischen Materie muss es im Universum noch eine verborgene Komponente geben. Sie wird für die hohen Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien und den Zusammenhalt von Galaxienclustern verantwortlich gemacht. Allerdings gibt es noch keine direkten Hinweise darauf, woraus diese Dunkle Materie bestehen könnte. Vermutet werden Teilchen, die weder der elektromagnetischen noch der starken Kraft unterliegen und daher nicht mit Atomen der gewöhnlichen Materie wechselwirken.

Die Neutrinos gehören nicht zur baryonischen Materie. Diese Teilchen besitzen fast keine Masse und bewegen sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit. Drei Neutrinoarten ließen sich bisher nachweisen, möglicherweise existieren aber noch weitere exotische Formen.

Das Universum enthält baryonische wie Dunkle Materie und außerdem Dunkle Energie, die seine Expansion antreibt.



Die besten Kandidaten für Dunkle Materie

HEISS

Teilchen, die sich mit oder nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen; zum Beispiel exotische Neutrinos

KALT

Teilchen der Dunklen Materie, die sich deutlich unterhalb der Lichtgeschwindigkeit bewegen, könnten Galaxien und die Materieverteilung im Universum sehr viel besser erklären. Mindestens 95 Prozent der Dunklen Materie sind vermutlich kalt.

NICHT MIT SICH SELBST IN WECHSELWIRKUNG

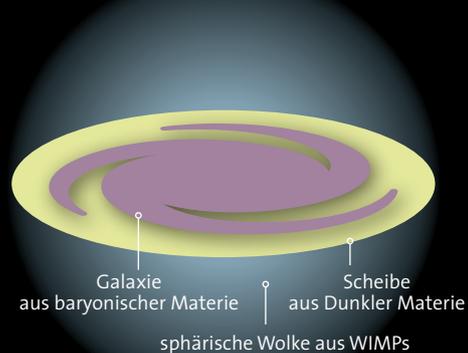
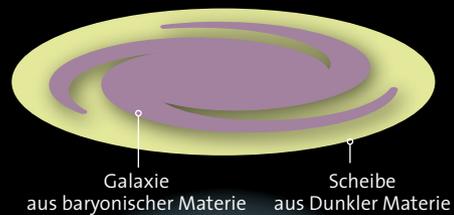
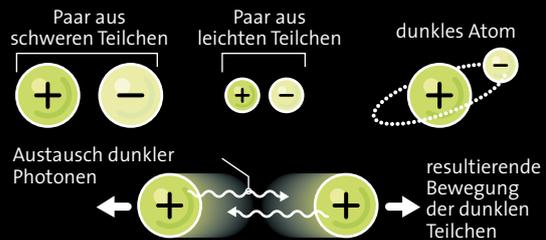
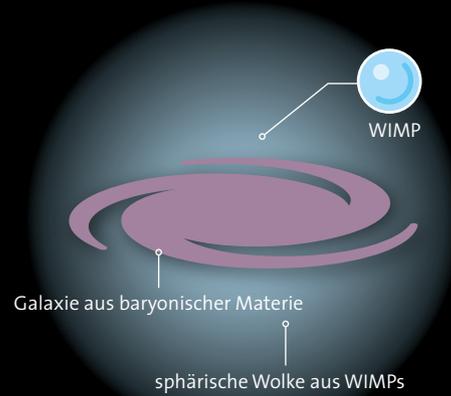
Die einfachste Art eines kalten Dunkle-Materie-Teilchens wäre ein WIMP (weakly interacting massive particle), das sehr selten oder gar nicht mit gewöhnlicher Materie wechselwirkt.

MIT SICH SELBST IN WECHSELWIRKUNG

Falls Dunkle Materie mit sich selbst wechselwirkt, müsste es eine »dunkle« Kraft geben, für die die baryonische Materie unempfindlich ist. Dabei könnte es sich um eine Art dunklen Elektromagnetismus handeln, bei dem die Teilchen eine Art positive und negative dunkle Ladung tragen, darüber miteinander in Wechselwirkung stehen und dunkle Photonen austauschen. Es könnten schwerere und leichtere Teilchen existieren, die sich ähnlichen wie bei der uns bekannten Materie zu dunklen Atomen zusammenfinden. Diese Form der Dunklen Materie könnte dann eine unsichtbare Scheibe bilden, die mit den Spiralarmen aus baryonischer Materie in Galaxien überlappt.

DUALE KOMponente

Die Dunkle Materie könnte eine Mischung aus zwei Arten von kalten Teilchen sein: solchen, die mit ihren Artgenossen wechselwirken, und solchen, die dies nicht tun. Dann müsste es sowohl eine sphärische Wolke aus WIMPs geben, die eine Galaxie umhüllt, wie auch eine abgeflachte Scheibe aus Teilchen der Dunklen Materie, die mit ihrer eigenen Art interagieren.





Unser Online-Dossier zum Thema »Dunkle Materie« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/dunkle-materie

einem kleinen Wert könnte sie bedeutsame Folgen für Galaxien und ihre Entwicklung haben.

Eine andere interessante Idee von »teilweise wechselwirkender Dunkler Materie« haben Jiji Fan, Andrey Katz, Lisa Randall und Mathew Reece von der Harvard University 2013 vorgeschlagen. Dabei gehen die Wissenschaftler davon aus, dass der Hauptanteil der Dunklen Materie aus WIMPs besteht, forderten aber noch zwei weitere Teilchentypen mit den Eigenschaften von Fermionen: ein schweres und ein leichtes, die beide dunkle Ladung besitzen. Fermionen sind Teilchen mit einem quantenmechanischen Spin von $\frac{1}{2}$ wie etwa unsere Protonen, Neutronen und Quarks, aus denen Ersterer bestehen. Diese dunklen Fermionen können sich gegenseitig anziehen und dunkle Photonen emittieren.

Die Chemie der dunklen Seite

Zwar darf man die Analogie nicht überinterpretieren, aber der Vorschlag ähnelt doch sehr einem Modell mit einem dunklen Proton, einem dunklen Elektron und einem dunklen Photon. Je nach Masse und Ladung der dunklen Fermionen könnten sie sich zu dunklen Atomen zusammenfinden und ihre eigene dunkle Chemie, dunkle Moleküle und vielleicht sogar noch komplexere Strukturen bilden. Das Konzept der dunklen Atome haben David E. Kaplan, Gordan Z. Krnjaic, Keith R. Rehermann und Christopher M. Wells bereits 2010 an der Johns Hopkins University in Baltimore detailliert untersucht.

Die Harvard-Wissenschaftler mit der Idee zu den dunklen fermionischen Teilchen haben anhand astronomischer Beobachtungen eine obere Grenze für den Anteil der stark über dunklen Elektromagnetismus wechselwirkenden Dunklen Materie abgeschätzt. Dabei kamen sie zu dem Schluss, dass deren gesamte Masse so groß wie jene der sichtbaren Materie sein könnte. Nach diesem Modell besteht die Milchstraße aus einer großen kugelförmigen Wolke aus WIMP-ähnlichen Teilchen, die 70 Prozent der gesamten Masse ausmacht und in die zwei abgeflachte Scheiben eingebettet sind, die jeweils 15 Prozent beisteuern. Eine dieser Scheiben besteht aus gewöhnlicher Materie und schließt die Spiralarme ein, die wir sehen können. Die andere besteht aus stark wechselwirkender Dunkler Materie. Diese beiden Scheiben dürften eine ähnliche räumliche Orientierung aufweisen. Allerdings sollte diejenige aus Dunkler Materie keine Sterne oder größere Plane-

ten enthalten. Denn deren gravitative Auswirkung auf die gewöhnliche Materie in der Milchstraße hätte man bereits beobachten müssen. Insgesamt würde eine solche zusätzliche Scheibe unsere sichtbare Galaxie kaum beeinflussen.

Nach Teilchen komplexer Dunkler Materie suchen Wissenschaftler auf dieselbe Weise wie nach den WIMPs: mit hochempfindlichen Detektoren im Untergrund. Diese sollten die Geräte aber häufiger passieren, als die einfachen WIMP-Modelle es vorhersagen. Und das würde die Wahrscheinlichkeit erhöhen, sie aufzuspüren. Zusätzlich zu solchen Experimenten hoffen Physiker darauf, Dunkle Materie in Teilchenbeschleunigern zusammen mit all den übrigen exotischen Teilchen zu erzeugen.

Ein bunter Strauß an Experimenten

Da wir sehr wenig über die Wechselwirkung von Dunkler Materie mit gewöhnlicher wissen – und damit auch nicht darüber, welche Prozesse in Beschleunigern stattfinden könnten –, haben Wissenschaftler ein breit aufgestelltes Forschungsprogramm in Angriff genommen. Es schließt eine ganze Reihe von Modellen ein, angefangen beim einfachen WIMP bis hin zu komplexeren Formen Dunkler Materie. Doch müssen wir hierbei einige Annahmen machen, nämlich zum Beispiel, dass die beiden Materieformen über eine oder mehrere Kräfte wechselwirken, die zwar stärker als die Gravitation (die ja die schwächste aller bekannten Kräfte ist) sind, aber dennoch so schwach, dass sie sich bisher nicht beobachten ließen. Außerdem wäre diese Kraft anders geartet als die oben vorgeschlagene dunkle elektromagnetische. Sollte Dunkle Materie jedoch allein über die Schwerkraft mit gewöhnlicher wechselwirken, werden wir sie niemals in einem Beschleuniger erzeugen oder sie in irgendeiner direkten Suche finden können.

Außerdem schränkt die Beschleunigerleistung des Large Hadron Collider (LHC) am CERN bei Genf, der weltweit die höchsten Energien erzeugt, die Suche nach schwereren Teilchensorten von Dunkler Materie ein. Denn je schwerer ein Teilchen ist, desto mehr Energie wird benötigt, um es in einem Beschleuniger zu erzeugen. Dasselbe gilt für solche Dunkle-Materie-Teilchen, die umso häufiger wechselwirken, je höhere Energien sie haben.

Da wir bereits wissen, dass Dunkle Materie nur sehr schwach die gewöhnliche beeinflusst, können wir nicht erwarten, sie im Detektor direkt zu beobachten. Dieser besteht ja selbst aus normaler Materie. Deshalb suchen Wissenschaftler stattdessen nach Teilchenkollisionen, bei denen scheinbar Energie verloren geht. So könnten zum Beispiel nach der Kollision zweier Protonen in die eine Richtung ein oder mehrere bekannte Teilchen wegfliegen und einige der Dunklen Materie in die andere Richtung. Als Signatur eines solchen Ereignisses messen wir die Energie auf der einen Seite des Detektors, aber nicht auf der anderen.

Mit einer gewissen Häufigkeit sollten solche asymmetrischen Ereignisse auch für den Fall auftreten, dass es keine Dunkle Materie existiert. Bisher gibt es am LHC keine Anzei-

chen für einen Überschuss. Das deutet also darauf hin, dass Dunkle Materie mit gewöhnlicher selten wechselwirkt, wenn überhaupt. Doch nachdem der LHC nun nach einer Pause mit höheren Kollisionsenergien wieder in Betrieb ist, gibt es neue Möglichkeiten, um solche Anzeichen zu finden.

Zusätzlich zu diesen Suchmethoden, die sich sowohl für WIMPs als auch für komplexe Dunkle Materie eignen, gibt es Ansätze, die mehr auf letztere Form zugeschnitten sind. Viele davon suchen nach dem dunklen Photon. Einige Modelle gehen davon aus, dass dunkle Photonen sich nach den Gesetzen der Quantenmechanik kontinuierlich in gewöhnliche Photonen umwandeln können und wieder zurück. Letztere sollten sich im Prinzip beobachten lassen. Manchen Modellen zufolge könnten die dunklen Photonen (anders als die gewöhnlichen) auch eine Ruhemasse besitzen. Dann könnten sie möglicherweise in leichtere Teilchen zerfallen. Und wenn sich das dunkle Photon kurzzeitig in ein gewöhnliches Photon umwandeln kann, besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass während dieses Prozesses Elektron-Positron-Paare oder ähnliche Teilchen-Antiteilchen-Paare von Myonen entstehen.

Daher suchen manche experimentelle Kollaborationen nach Kollisionen, bei denen Elektron-Positron-Paare oder Myon-Antimyon-Paare entstehen. Solche Studien laufen am LHC, aber auch an anderen Beschleunigern wie dem KLOE-2-Projekt am Istituto Nazionale di Fisica Nucleare der Laboratori Nazionali di Frascati in Italien. Weitere Studien dazu sind das Heavy Photon Search (HPS) Experiment an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Newport News und das BaBar Detector Experiment am SLAC National Accelerator Laboratory in Menlo Park. Außerdem durchforsten die Wissenschaftler dazu mehr als zehn Jahre alte Daten des SLAC.

Einen anderen interessanten Ansatz verfolgt das Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia, Illinois: Es versucht, Strahlen aus dunklen Materieteilchen zu erzeugen. Fermilab produziert derzeit dichte, energiereiche Neutrinostrahlen, die auf weit entfernte Detektoren treffen. Neutrinos sind sehr leichte subatomare Teilchen, die allein über die schwache Kernkraft Materie beeinflussen. Sollte Dunkle Materie mit gewöhnlicher über Teilchen wie dunkle Photonen wechselwirken, wäre es möglich, dass in diesen Neutrinostrahlen auch Dunkle Materie entsteht, die mit einem der Detektoren des Fermilab registriert wird.

Und schließlich können Wissenschaftler nach astronomischen Anzeichen für Dunkle Materie suchen, etwa wenn zwei Galaxien miteinander kollidieren. Treffen in einem solchen Szenario die Dunkle-Materie-Teilchen aus den beiden Galaxien aufeinander, könnten sie sich abstoßen und dabei dunkle Photonen austauschen. Einige Studien von solchen Galaxienkollisionen konnten bisher keinen Nachweis für dieses Phänomen liefern. Dagegen deuten vor wenigen Monaten veröffentlichte Beobachtungen am Galaxienhaufen Abell 3827, der besonders nah und räumlich günstig ausgerichtet ist, auf genau solch ein Muster hin. Allerdings werden noch weitere Beobachtungen an dieser und anderen Galaxien notwendig sein, um den Hinweis zu bestätigen. Doch die bishe-

rigen Daten sehen viel versprechend für Modelle mit komplexer Dunkler Materie aus.

Ohne Frage stehen wir bei alledem vor einem großen Rätsel. Auf astronomischen Größenskalen verhält sich gravitativ gebundene Materie nicht so, wie es mit der bekannten Physik und der beobachteten Verteilung von sichtbarer Materie vereinbar ist. Auf Grund dieser Diskrepanz sind Wissenschaftler zuversichtlich, dass irgendeine Form von Dunkler Materie existiert. Welche Form sie annehmen könnte, wird jedoch immer umstrittener, da ein Experiment nach dem anderen beim Versuch versagt, die einfachsten Modelle zu bestätigen. Aus diesem Grund und weil weiterhin einige Widersprüche zwischen den Beobachtungen und den Vorhersagen des einfachen WIMP-Modells bestehen, werden Ideen zu komplexer Dunkler Materie immer beliebter. Sie liefern den Theoretikern mehr Parameter, die sie variieren können, um die Übereinstimmung mit Beobachtungen zu erhöhen. Sie passen außerdem besser zur Vielfalt der gewöhnlichen Materie.

Man könnte an diesem Vorgehen durchaus kritisieren, dass man sich hierbei nahezu verrenke, um die Hypothese der Dunklen Materie um jeden Preis aufrechtzuerhalten. Ähnelt diese Situation vielleicht jener im 16. Jahrhundert, als Astronomen zwanghaft versucht haben, das geozentrische Weltbild beizubehalten, indem sie Epizykeln für die Planetenbahnen einführten?

Wir denken nicht. Denn Dunkle Materie erklärt viele astronomische Rätsel ausgesprochen gut, und es gibt a priori keinen Grund, warum Dunkle Materie so einfach gebaut sein muss, wie die WIMP-Hypothese es verlangt. Aber es bleiben noch jede Menge Fragen. Bis wir die Antworten darauf finden, müssen wir offen sein für eine Fülle von Erklärungen, die sogar die Möglichkeit einschließen, dass wir mit einer dunklen Parallelwelt in der Nachbarschaft leben. ☞

DIE AUTOREN



Der theoretische Teilchenphysiker **Bogdan A. Dobrescu** (links) forscht am Fermilab in Illinois. Zu seinen Ideen gehört, dass am dortigen Beschleuniger Dunkle Materie erzeugt und später in Neutrindetektoren nachgewiesen werden könnte.

Am Fermilab arbeitet auch **Don Lincoln**, der für seine Untersuchungen Daten vom Large Hadron Collider des CERN verwendet.

QUELLEN

- Ackerman, L. et al.:** Dark Matter and Dark Radiation. In: Physical Review D 79, 023519, 2009
- Fan, J. et al.:** Dark-Disk Universe. In: Physical Review Letters 110, 211302, 2013
- Freese, K.:** The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter. Princeton University Press, 2014
- Kaplan, D.E. et al.:** Atomic Dark Matter. In: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2010, 021, 2010

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368108

Wenn die Blätter fallen, steht Weihnachten schon bald vor der Tür



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie.

12 AUSGABEN, € 89,-
(ERMÄSSIGT € 69,90)



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung.

12 AUSGABEN, € 89,-
(ERMÄSSIGT € 67,80)



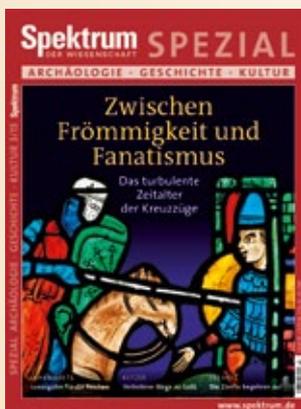
Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin.

12 AUSGABEN, € 85,20
(ERMÄSSIGT € 68,40)



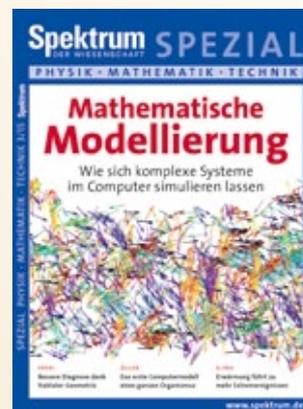
Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung.

4 AUSGABEN, € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60)

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

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

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



+ GRUSSKARTE



Ein ganzes Jahr Freude:

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

Mit Grußkarte:

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

Plus Geschenk zur Wahl:

- 1 Kalender »Himmel und Erde 2016«
- 2 Spiel »Dog Compact«
- 3 Reisetheil-Shoulderbag »Stamp«
- 4 Buch »Den Kopf frei machen und so bleiben«
- 5 DVD »Die Tricks der Pflanzen«
- 6 Füllhalter »Kaweco Sport«

+ EIN GESCHENK FÜR SIE



Wirbel auf dem Honigbrot

Der Strahl einer fallenden, zähen Flüssigkeit kann sich falten und zu Spiralen winden. Dabei wirken sein zugleich fester und flüssiger Charakter zusammen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Honig fließen zu lassen, hat etwas Meditatives. Die erste Portion löst sich von dem zur Seite gekippten Löffel und fällt wie ein zusammenhängendes Seil mit einem breiteren Tropfen voran auf die Brotscheibe. Die Geschwindigkeit des fallenden Honigs nimmt unter dem Einfluss der Schwerkraft zu, so dass sich der Querschnitt des Seils nach unten hin verringert. Schwebt der Löffel hoch genug über dem Brot, wird der Honigstrahl schließlich so dünn, dass er in einzelne Tropfen zerfällt, die auf dem kleinen Honigsee landen.

Aber so weit lassen wir es gar nicht erst kommen, um ein anderes Phänomen näher beobachten zu können: Hält man den Löffel beispielsweise in etwa

fünf Zentimeter Höhe, windet sich das Seil am unteren Ende zu einer nach oben wachsenden zylindrischen Spirale. Ihre Höhe ist begrenzt, denn je mehr Wicklungen auf den Untergrund drücken, desto schneller verschwindet die jeweils untere darin. Bei einer bestimmten Anzahl von Wicklungen löst sich die unterste genau in der Zeit auf, wie oben eine neue hinzukommt. Dieses stationäre Gleichgewicht bleibt erhalten, solange Honig in gleich bleibender Weise nachströmt.

In der nichtlinearen Physik spricht man auch von einer dissipativen Struktur: Die Energie des Systems bleibt im zeitlichen Mittel konstant, weil ihm genauso viel Höhenenergie zufließt, wie

es durch Dissipationsvorgänge, also letztlich als Wärme, abgibt.

Dieses eigenständige Wirbeln kennt man sonst nur von einem flexiblen Seil, das gleichmäßig aus einer bestimmten Höhe auf den Boden sinkt. Eine zum Seil gedehnte viskose Flüssigkeit verhält sich somit zumindest in einer kurzen Zeitspanne sehr unflüssig. Das derart verwandelte Material ist dem Feststoff in ästhetischer Hinsicht sogar überlegen: Bei einem herkömmlichen Tau rutschen die Schlaufen voneinander ab und bleiben kaum übereinander liegen.

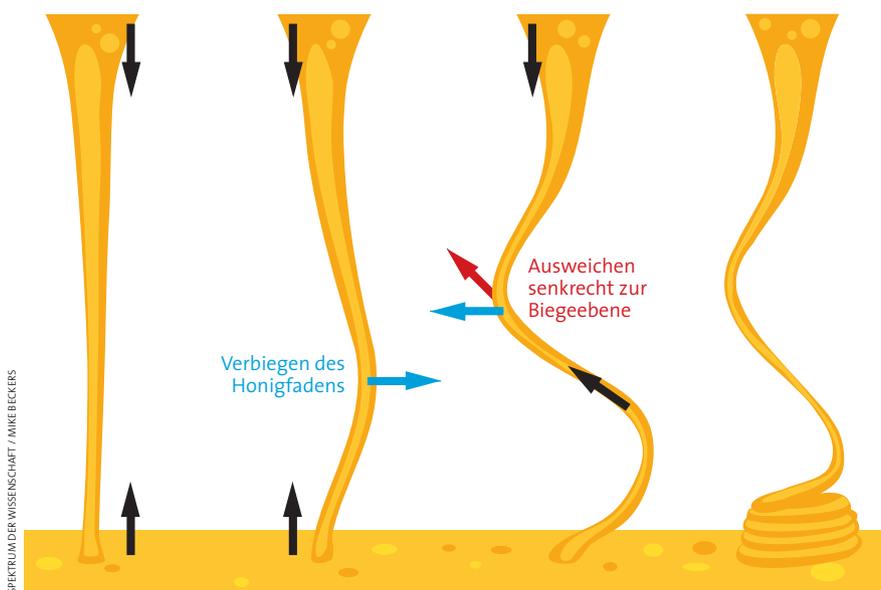
Doch sobald beim Honig eine neue Windung die vorangegangene berührt, ziehen sie einander an und beginnen zu verschmelzen. Das geschieht so unmerklich langsam, dass man die schöne Illusion haben kann, die Wendel würde kontinuierlich in die Höhe wachsen. Aber nach und nach verschwinden die Konturen der unteren Ebenen, sie laufen seitlich auseinander und gehen nahezu übergangslos im Honigsee auf.

Dieses merkwürdige Aufspulen entsteht, wenn der Faden beim Auftreffen gebremst und gestaucht wird. Wegen seiner Zähflüssigkeit verhält er sich ein wenig wie ein fester, aber flexibler Stab, den man senkrecht kräftig auf den Boden drückt. Das macht ihn instabil, so dass stets vorhandene, zufallsbedingte Abweichungen von der Senkrechten ausreichen, um ihn an der schwächsten Stelle auszubeuken.

Ganz ähnlich geht es beim Honig zu (Illustration links). Zwar sind weder er noch der Boden im herkömmlichen Sinn starr, aber doch steif genug, um kurzfristig einen genügend großen

»Der Wirbel ist nicht etwas Feststehendes, sondern beständig Wandelbares – aber in jedem Augenblick neu Reproduziertes.«

Friedrich Wilhelm Joseph Schelling (1775–1854)



Der fallende Honigfaden wird immer dünner und verbiegt sich nach dem Auftreffen durch den Druck von oben und unten – ähnlich wie ein fester, flexibler Stab. Das erzeugt weitere Spannkraften, denen das Flüssigkeitsseil nun senkrecht zur ersten Biegerichtung ausweicht. So entsteht eine kreisförmige Bewegung, die eine Schlaufe auf den Boden legt. Nachströmendes Material windet sich gleichförmig darüber.



Ein dünnes Honigseil bildet die ersten Windungen (links). Im stationären Zustand (rechts) versinken die unteren Wendeln kontinuierlich in dem Untergrund, während oben neue hinzukommen.



Ein breites Honigband legt sich in gleich großen Falten ab. Die unteren laufen hier bereits auseinander, um im Honigsee aufzugehen.

Druck entstehen zu lassen, der eine ähnliche Biegung bewirkt. Da sein dickes oberes Ende stabiler ist, beult sich der Honigfaden am ausgedünnten unteren Teil aus.

Wenn er sich verbiegt, wird die konkave Innenseite gestaut und die konvexe Außenseite entsprechend gestreckt. Dadurch wachsen die elastischen Rückstellkräfte sehr stark an, so dass abermals eine Instabilität auftritt. Der Flüssigkeitsstab weicht seitlich zur Biegeebene aus. Die Richtung, in die er sich ausbeult, ist vom Zufall bedingt und legt die Drehrichtung des Aufspulens fest.

Die Überlagerung dieser beiden Krümmungen führt zu einer Art von Schlaufe. Anders als bei einer starren Stange tendiert der flexible Honig dazu, immer weiter nach unten zu sinken. Dabei hindert ihn das nachfließende Material daran, sich beim seitlichen Kippen allzu weit von der Falllinie zu entfernen. Auf diese Weise stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem sich die Schlaufe um den ursprünglichen Landepunkt des Fadens in einem Radius ablegt, der für die jeweiligen Parameter wie Fallhöhe und Viskosität charakteristisch ist.

Honig hat jedoch noch mehr Formen zu bieten als diese Wirbelstruktur. Wenn er nämlich als breites Band vom Löffel fließt oder direkt aus dem Honigglas auf das Brot gekippt wird, reicht die Tendenz zur Minimierung der

Oberflächenenergie meist nicht aus, bis zur Landung eine kleinstmögliche Oberfläche mit zylindrischem Querschnitt auszubilden. Der Honig trifft dann als flaches Band auf.

Falten statt Schlaufen

Damit ändern sich aber die Stabilitätsbedingungen drastisch, denn ein gebogener bandförmiger Flüssigkeitsstab kann nicht seitlich ausbrechen. Das verhindert die platte Form – bei einem seitlichen Einknicken wäre die Differenz zwischen Zugkraft auf der einen und Druckkraft auf der anderen Seite zu groß. Das wissen wir aus Erfahrung: Ein zylindrischer Stab lässt sich in alle Richtungen biegen, eine flache Leiste aber nur in eine.

Daher wird der Honig gewissermaßen gefaltet. Auch hier begrenzt die wegen ihrer Schwerkraft hinterherfallende Flüssigkeit die Weite der Auslenkung. Das Band wechselt nach dem Ablegen jeder Falte zur jeweils anderen Seite. Es entsteht eine ziehharmonikaartige Struktur, deren untere Schichten allmählich auseinanderlaufen, um dann vollends im Untergrund aufzugehen – ähnlich wie schon die Wicklungen. Im Unterschied zum Flüssigkeitsseil kommt es aber zu keiner Rotation, sondern zu einer Schwingung.

Der kuriose Biegeeffekt von Honig, Sirup und anderen zähen Stoffen ist längst nicht auf den Frühstückstisch beschränkt. Wissenschaftler befassen

sich seit vielen Jahren mit diesem Phänomen, um das Verhalten solcher Materialien zu verstehen. Sie arbeiten jedoch eher mit synthetischen Flüssigkeiten wie etwa Silikonölen, deren Parameter sie besser bestimmen und leichter verändern können. Diese quantitative Beschreibung erlaubt es ihnen beispielsweise vorherzusagen, unter welchen Bedingungen eine bestimmte Flüssigkeit Wirbel bildet und was deren Radius beeinflusst. So kann man auch berechnen, warum bei gering viskosen Flüssigkeiten wie Wasser kein solches Verhalten auftritt: Es müsste sich in einem Radius aufwinden, der kleiner ist als derjenige des entsprechenden Wasserseils, was rein topologisch unmöglich ist. ∞

DER AUTOR



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

QUELLE

Jeng, M.: Liquid Rope Coiling. In: Annual Review of Fluid Mechanics 44, S. 249–266, 2012

Dieser Artikel und mehr Links im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368112



SHOUT (ALESSANDRO GOTTARDO)

Lassen sich alle Vorgänge im All prinzipiell berechnen, oder bleiben einige Ereignisse auf fundamentale Weise unvorhersehbar?

QUANTENPHYSIK

Kosmische Würfelspiele

Einstein war kein Gegner der Quantenmechanik und ihrer Unbestimmtheit, wie viele denken. Seine Überlegungen zur Rolle des Zufalls im All waren überraschend vielschichtig.

Von George Musser

»Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt«, schrieb Einstein in einem auf den 4. Dezember 1926 datierten Brief an Max Born.

Für viele ist die Stichelei des Physikers ein Beleg dafür, dass er die Quantenphysik dogmatisch ablehnte, da sie Zufälligkeit als festen Bestandteil der physikalischen Welt betrachtet. Der Kern eines radioaktiven Elements zerfällt spontan, und es ist vorher unmöglich zu sagen, zu welchem Zeitpunkt das passiert. Trifft ein einzelnes Photon auf einen halbdurchlässigen Spiegel, so wird es entweder reflektiert oder es durchquert ihn ungehindert. Keiner weiß, welche dieser beiden Fälle eintreten wird. Heute können wir solche Prozesse nicht nur im Labor beobachten, sondern direkt über das Internet abrufen: Zahlreiche Websites erzeugen unvorhersehbare Zahlen mit Hilfe von Geigerzählern oder Quantenoptik, die sich beispielsweise für Glücksspiele und Kryptografie eignen (siehe Artikel ab S. 78 in diesem Heft).

Einstein, so die geläufige Annahme, weigerte sich anzuerkennen, dass manche Vorgänge nicht deterministisch sind und einfach geschehen – ohne die Möglichkeit herauszufinden, wann oder warum. Nahezu isoliert im Kreis seiner Fachkollegen klammerte er sich an das mechanistisch tickende Uhrwerkuniversum der klassischen Physik, in dem jeder Moment den nächsten bestimmt. Das Würfelzitat wurde damit zum Sinnbild eines vom Revolutionär zum Reaktionär gewordenen Wissenschaftlers. Einstein hatte die Physik mit seiner Relativitätstheorie völlig umgekrempelt – aber bezüglich der Quantentheorie war er, wie sein Kollege Niels Bohr einmal formulierte, »in der Mittagspause«.

Doch im Lauf der Zeit haben viele Historiker, Philosophen und Physiker Zweifel an dieser Darstellung angemeldet. Setzt man sich nämlich damit auseinander, was Einstein tatsächlich gesagt und geschrieben hat, so zeigt sich seine sehr viel nuanciertere Denkweise über den Indeterminismus der Quantenmechanik. »Es ist dringend nötig, die Geschichte zu rechtzurücken«, mahnt der Historiker Don Howard von der University of Notre Dame im US-Bundesstaat Indiana. »Das

Missverhältnis zwischen dem, was üblicherweise erzählt wird, und dem, was wir in den Archiven finden, ist erstaunlich.« Howard und andere Geschichtswissenschaftler haben gezeigt, dass Einstein den unbestimmten Charakter der Quantenphysik akzeptierte – wenig überraschend, denn er selbst hatte ihn bei seinen Arbeiten schließlich mitentdeckt. Dagegen nahm er nicht hin, dass dieser Indeterminismus eine fundamentale Eigenschaft der Natur sein sollte. Er sah vielmehr Hinweise darauf, dass dieses Verhalten seine Ursache in einer tieferen Ebene der Realität hat, welche die bestehenden Theorien nicht erfassten. Seine Kritik war also keineswegs mystischer Natur, sondern sie war auf wissenschaftliche Probleme fokussiert, die bis heute ungelöst sind.

Die Frage, ob das Universum einem Uhrwerk oder eher einem Würfeltisch gleicht, trifft einen wunden Punkt der Physiker. Sie gehen davon aus, dass ihre Wissenschaft die Suche



DIE SERIE IM ÜBERBLICK

100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

- | | | |
|--------|---|----------------------|
| Teil 1 | ▶ Der Glanz des Genies
<i>Brian Greene</i>
Einsteins Weg zur
allgemeinen Relativitätstheorie
<i>Michel Janssen, Jürgen Renn</i> | Oktober 2015 |
| Teil 2 | ▶ Kosmische Würfelspiele
George Musser | November 2015 |
| Teil 3 | ▶ Gravitationswellenjäger
auf heißer Spur
<i>Felicitas Mokler</i> | Dezember 2015 |
| Teil 4 | ▶ Auf der Suche nach der
Theorie von Allem
<i>Corey S. Powell</i> | Januar 2016 |
| Teil 5 | ▶ Die Vermessung Schwarzer Löcher
<i>Dimitrios Psaltis, Shepard S. Doeleman</i> | Februar 2016 |
| Teil 6 | ▶ Sind Zeitreisen möglich?
<i>Tim Folger</i>
Wo Einstein irrte
<i>Lawrence M. Krauss</i> | März 2016 |

FERDINANDSCHUTZER, 1921 / PUBLIC DOMAIN [M]

nach möglichst einfachen Regeln ist, welche die wunderbare Vielfalt der Natur erzeugen. Doch wenn einige Dinge ohne Grund geschehen, markieren sie die Grenze der rationalen Untersuchung der Natur. »Ein fundamentaler Indeterminismus würde das Ende der Wissenschaft bedeuten«, sorgt sich der Kosmologe Andrew Friedman vom Massachusetts Institute of Technology. Doch auf der anderen Seite sahen Philosophen jeder Epoche die Abwesenheit strenger Kausalketten als Voraussetzung für den freien Willen des Menschen an. Entweder sind wir alle Zahnräder und alles ist vorherbestimmt, oder wir sind die Schöpfer unseres eigenen Schicksals – dann kann das Universum nicht deterministisch sein. Diese Dichotomie hat gravierende Konsequenzen dafür, ob und wie eine Gesellschaft Menschen für ihre Handlungen für verantwortlich hält. Annahmen über den freien Willen durchziehen unser Rechtssystem: Um schuldig sein zu können, muss ein Täter mit Absicht gehandelt haben.

Ein tiefer liegendes Wirkprinzip

Wenn wir über Widersprüche reden, gehen wir üblicherweise davon aus, dass sie ein Indiz für einen Fehler sind. Doch viele Philosophen halten es für bedeutungslos, unser Universum als entweder deterministisch oder von Zufall durchsetzt anzusehen. Es kann, so argumentieren sie, beides richtig sein, abhängig davon, auf welcher Skala man die Natur untersucht. Geht es um Elementarteilchen, Moleküle, Zellen, Organismen oder Bewusstsein? »Die Unterscheidung hängt von der Ebene der Natur ab, die wir betrachten«, erläutert der Philosoph Christian List von der London School of Economics and Political Science. »Wenn eine bestimmte deterministisch ist, können sowohl die darüber als auch jene darunter durchaus zufällig sein.« Die Atome in unseren Gehirnen könnten sich komplett berechenbar verhalten – und würden trotzdem zu einem freien Willen führen, weil sie und unsere Persönlichkeit auf verschiedenen Stufen operieren. Einstein war entsprechend auf der Suche nach einer Subquantenebene mit Ursache und Wirkung, ohne deshalb abzustreiten, dass die Quantenstruktur probabilistisch ist.

Es ist ohnehin seltsam, wie Einstein jemals mit dem Etikett versehen werden konnte, ein Gegner der Quantenmechanik zu sein. Denn er selbst war es, der 1905 die Vorstellung

diskreter Energiepakete – eben der Quanten – eingeführt hatte. Und anderthalb Jahrzehnte lang verteidigte er diese Idee fast auf einsamem Posten. Die meisten der von den Physikern heute als essenziell angesehenen Aspekte der Quantenmechanik gehen auf Einsteins Arbeiten zurück, etwa die seltsame Eigenschaft des Lichts, sowohl als Teilchen als auch als Welle zu agieren. Und seine Gedanken zu der Physik der Wellen bildeten die Grundlage für die von Erwin Schrödinger in den 1920er Jahren entwickelte Formulierung der Quantenmechanik. Einstein war auch keineswegs gegen jede Form der Zufälligkeit. Denn wie er 1916 selbst bewies, ist sowohl Zeitpunkt als auch Richtung der von Atomen ausgesendeten Photonen unbestimmt. »Das widerspricht dem populären Bild Einsteins als Gegner probabilistischer Effekte«, stellt der Philosoph Jan von Plato von der Universität Helsinki fest.

Doch Einstein und seine Zeitgenossen sahen sich mit einem ernsthaften Problem konfrontiert. Quantenphänomene sind zufällig, aber die Theorie dahinter ist es nicht. Die Schrödingergleichung beschreibt ein Teilchen oder ein System mit Hilfe der Wellenfunktion und sagt ihre Entwicklung zu jedem Zeitpunkt voraus. In mancher Hinsicht ist die Schrödingergleichung sogar deterministischer, als die klassischen Bewegungsgesetze es sind. Sie führt nicht zu so unangenehmen Erscheinungen wie Singularitäten, wo physikalische Größen unendlich und damit unbeschreibbar werden, oder zu chaotischen Verhältnissen, wo Bewegungen nicht mehr vorhersagbar sind.

Allerdings bezieht sich die Kausalität der Schrödingergleichung nur auf die Wellenfunktion – und die lässt sich im Gegensatz zu Positionen und Geschwindigkeiten nicht beobachten. Vielmehr gibt sie an, welche Größen beobachtet werden können und mit welcher Wahrscheinlichkeit sie bestimmte Werte annehmen. Die Theorie liefert keine Antwort darauf, was die Wellenfunktion ist und ob sie überhaupt als eine reale Welle in der physikalischen Welt angesehen werden sollte. Damit bleibt aber auch offen, ob die beobachtete Zufälligkeit eine intrinsische Eigenschaft der Natur ist oder nur eine Fassade.

Werner Heisenberg, ein weiterer Pionier der frühen Quantenmechanik, sah die Wellenfunktion als eine Art Nebel potenzieller Existenz. Wenn sie die Position eines Teilchens nicht eindeutig vorhersagt, dann deshalb, weil es eben nirgends lokalisiert ist. Erst wenn man ein Objekt beobachtet, materialisiert es an einem definierten Ort. Die Wellenfunktion mag vorher über eine große Region des Raums verschmiert gewesen sein – im Moment der Beobachtung kollabiert sie zu einem schmalen Maximum an einer einzigen Position, und das Teilchen taucht dort auf. Es reicht hinzuschauen, und schon verhält es sich nicht mehr deterministisch, sondern springt zu einem Ergebnis wie ein Kind bei der Reise nach Jerusalem zu einem freien Sitzplatz. Keine Regel beschreibt diesen Kollaps, es gibt keine Gleichung dafür. Es passiert einfach.

Der Kollaps der Wellenfunktion wurde zu einem zentralen Bestandteil der »Kopenhagener Deutung« der Quanten-

AUF EINEN BLICK

GLÜCK UND REGELN

1 Es ist eines der bekanntesten Zitate Albert Einsteins: »**Gott würfelt nicht.**« Oft wird das Bonmot als Kritik an der Quantenmechanik verstanden.

2 Tatsächlich lehnte Einstein aber weder die Quantenmechanik noch die Wahrscheinlichkeiten darin ab. Er vermutete allerdings, dass der **Zufall kein fundamentales Naturprinzip** sein könne.

3 Heute halten Philosophen die Physik und ihre Konsequenzen für sowohl **deterministisch** als auch **unbestimmbar** – je nachdem, welche Ebene der Realität man betrachtet.

mechanik, die nach der Stadt benannt ist, in der Bohr sein Institut hatte und Heisenberg einen großen Teil seiner frühen Arbeiten durchführte. Es ist eine Ironie der Geschichte, dass Bohr den Kollaps der Wellenfunktion selbst niemals akzeptierte. Die Kopenhagener Deutung nimmt die beobachtete Zufälligkeit der Quantenmechanik als gegeben hin und gibt keine weitere Erklärung dafür. Die meisten Physiker billigten das so, wenn auch eher aus pragmatischen Gründen: Die Interpretation funktionierte, und es war die erste, die da war.

Einstein war keineswegs gegen die Quantenmechanik, lehnte aber definitiv die Kopenhagener Deutung ab. Er schreckte vor der Vorstellung zurück, der Akt der Messung sollte zu einem Bruch in der kontinuierlichen Entwicklung eines physikalischen Systems führen. In diesem Zusammenhang beklagte er sich über das göttliche Würfelspiel. »Genau hier sah Einstein 1926 das Problem. Es war also keineswegs die pauschale metaphysische Annahme eines absolut notwendigen Determinismus«, so Howard, »sondern es ging ihm hauptsächlich um die Frage, ob der Kollaps der Wellenfunktion zu Diskontinuitäten führt oder nicht.«

Einsteins Hoffnung auf verborgene Variablen

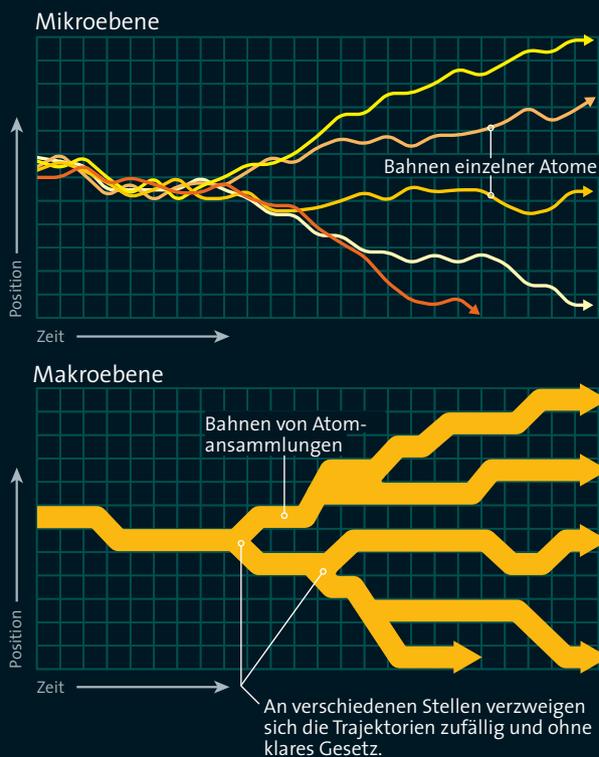
Der Kollaps könne kein realer Prozess sein, argumentierte Einstein. Denn das würde eine instantane Fernwirkung erfordern – einen mysteriösen Mechanismus, der beispielsweise sicherstellt, dass sowohl die linke als auch die rechte Seite einer Wellenfunktion gleichzeitig zu einem einzigen schmalen Maximum zusammenbricht, ohne dass eine Kraft dies koordiniert. Nicht nur Einstein, sondern jeder seiner Kollegen hielt so etwas für unmöglich. Denn dieser Mechanismus würde schneller als das Licht wirken und damit die Relativitätstheorie verletzen. Die Quantenmechanik scheint nämlich nicht nur ein Würfelspiel zu sein; ihre Würfel bilden auch noch Paare, die stets die gleiche Zahl zeigen, selbst wenn der eine Partner in Las Vegas und der andere auf einem Planeten der Wega rollt. Für Einstein war die Schussfolgerung klar: Die Würfel müssen gezinkt sein, also versteckte Eigenschaften besitzen, die das Resultat vorherbestimmen. Doch die Kopenhagener Deutung verneint ebendas. Demnach beeinflussen die Würfel sich instantan über große Entfernungen.

Einstein war außerdem unzufrieden mit dem Einfluss von Messungen in dieser Auslegung. Denn was ist eine Messung überhaupt? Etwas, was nur bewusste Wesen durchführen können? Heisenberg und die anderen Anhänger der Interpretation hatten darauf keine Antwort. Vielleicht erschaffen wir die Realität erst durch den Akt der Beobachtung, so ein recht poetischer Vorschlag. Einstein fand es außerdem ziemlich kühn, dass die Vertreter dieser Auffassung die Quantenmechanik als vollständig ansahen, als eine finale Theorie also, die niemals durch eine bessere ersetzt werden könne. Denn er betrachtete alle Gedankengebäude, auch seine eigenen, lediglich als Stufen auf einer Leiter zu höheren Wahrheiten.

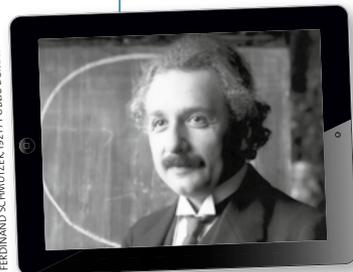
Howard geht davon aus, dass Einstein keine Probleme gehabt hätte, den Indeterminismus zu akzeptieren, wenn nur seine Bedenken ausgeräumt worden wären – wenn etwa jemand eine klare Definition für den Begriff der Messung geliefert hätte oder eine Erklärung dafür, wie zwei Teilchen sich in großer Entfernung ohne Wechselwirkung synchron verhalten können. Der Zufall war für Einstein ein sekundäres Problem. Er stellte die gleichen Fragen auch an deterministische Alternativen zur Kopenhagener Deutung und verwarf sie aus denselben Gründen ebenso. Der Historiker Arthur

Die vielen Ebenen der Realität

Ist die Welt vom Zufall bestimmt oder nicht? Die Antwort hängt nicht nur von den Naturgesetzen ab, sondern auch davon, aus welchem Blickwinkel wir ein System beschreiben. Bewegen sich mehrere Atome deterministisch (oberes Diagramm), starten sie von ähnlichen Positionen und laufen langsam auf berechenbaren Bahnen auseinander. In einem Gas auf der makroskopischen Ebene (unteres Diagramm) erhält man jedoch ein verschwommenes Bild der Situation und sieht lediglich Verdichtungen, keine einzelnen Atome. Nach einer Weile kann sich diese Ansammlung zufällig in einzelne Bereiche aufteilen. Die Unbestimmtheit auf der Makroebene nimmt ein Beobachter als eine objektive Eigenschaft der Natur wahr, die widerspiegelt, wie sich Teilchen spontan zusammenballen. Analog dazu nahm Albert Einstein an, dass eine deterministische Unterebene des Universums zu der Zufälligkeit in der Quantenmechanik führt.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: LUST, C., PIVATO, M., EMERGENT CHANGE IN THE PHILOSOPHICAL REVIEW 124, S. 119-132, 2015



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



www.spektrum.de/t/albert-einstein-und-die-relativitaetstheorie

Fine von der University of Washington meint zwar, Howard würde Einsteins Offenheit überschätzen. Er ist aber ebenfalls davon überzeugt, dass Einsteins Gedanken sehr viel differenzierter waren, als das Würfelzitat Generationen von Physikern glauben machte.

Rüttelt man an der Kopenhagener Deutung, so dachte Einstein, müsste sich die Zufälligkeit der Quantenmechanik als etwas ganz Ähnliches erweisen wie andere Arten scheinbarer Unberechenbarkeiten in der Physik: als Produkt von Ereignissen auf einer tieferen Ebene der Realität. So verrät der Tanz eines Staubkörnchens in einem Sonnenstrahl die komplexen Bewegungen der Luftmoleküle. Mit der Aussendung eines Photons oder dem radioaktiven Zerfall eines Atomkerns sollte es entsprechend sein, so Einsteins Überlegung. In seiner Vorstellung war die Quantenmechanik eine grobe Theorie, die zwar das generelle Verhalten der Bausteine der Natur wiedergibt, der aber die Auflösung fehlt, um individuelle Ereignisse zu erklären. Eine tiefere, vollständige Gesetzmäßigkeit würde die Bewegungen ohne mysteriöse Sprünge erklären.

In diesem Bild ist die Wellenfunktion eine kollektive Beschreibung, also vergleichbar mit der Aussage, dass ein ungezinkter Würfel, oft genug geworfen, alle Augenzahlen gleich häufig zeigt. Der Kollaps der Wellenfunktion ist kein physikalischer Vorgang, sondern das Erlangen von Wissen. Zeigt ein Würfel beispielsweise eine Vier, reduziert sich der Bereich von sechs möglichen Ergebnissen auf dieses eine Resultat. Ein göttliches Wesen, das die Bewegung aller Atome im Detail verfolgen kann, die am Fall des Würfels beteiligt sind, würde niemals von einem Kollaps sprechen.

Einsteins Intuition geht auf seine früheren Arbeiten über kollektive Effekte der Molekülbewegungen zurück – den als statistische Mechanik bezeichneten Teilbereich der Physik. Darin hatte er gezeigt, dass die Wirklichkeit auch dann probabilistisch erscheinen kann, wenn die dahinterliegende Realität kausal bestimmt ist. An den Philosophen Karl Popper schrieb Einstein 1935: »Ich möchte nochmals sagen, dass ich Ihre Behauptung, dass aus einer deterministischen Theorie keine statistischen Sätze gefolgert werden können, nicht für richtig halte. Denken Sie nur an die klassische statistische Mechanik (Gastheorie, Theorie der Brown'schen Bewegung).«

Wahrscheinlichkeiten waren in Einsteins Vorstellungen genauso objektive Größen wie in der Kopenhagener Deutung. Sie tauchen zwar nicht in den fundamentalen Geset-

zen der Bewegung auf, aber sie drücken andere Eigenschaften der Welt aus. Sie sind demnach keineswegs nur ein Artefakt menschlicher Unwissenheit. Einstein erläuterte Popper dieses Konzept am Beispiel eines Teilchens, das sich mit konstanter Geschwindigkeit im Kreis bewegt. Die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen auf einem bestimmten Teilstück zu finden, spiegelt die Symmetrie der Bahn wider. Ganz ähnlich ist es bei einem Würfel: Die Chance, eine bestimmte Augenzahl zu erhalten, beträgt ein Sechstel, weil er sechs geometrisch gleiche Seiten besitzt. »Einstein begriff besser als jeder seiner Zeitgenossen, dass in den Wahrscheinlichkeiten der statistischen Mechanik ein erheblicher physikalischer Inhalt steckt«, sagt Howard.

Eine weitere Lehre aus diesem Zweig der Physik ist, dass beobachtbare Größen auf einer tieferen Ebene oft keinen Sinn mehr ergeben. Ein Gas besitzt beispielsweise eine Temperatur, aber ein einzelnes Gasmolekül nicht. Einstein war deshalb davon überzeugt, dass sich eine Subquantentheorie radikal von der Quantenmechanik unterscheiden müsse. »Es ist kein Zweifel«, schrieb er 1936, »dass die Quantenmechanik ein schönes Stück Wahrheit erfasst hat. (...) Aber ich glaube, dass beim Aufsuchen jenes Fundamentes die Quantenmechanik nicht als Ausgangspunkt dienen kann, so wenig als man umgekehrt ausgehend von der Thermodynamik bzw. statistischen Mechanik auf das Fundament der Mechanik kommen könnte.« Einstein machte sich daher auf die Suche nach einer einheitlichen Feldtheorie, um diese tiefere Ebene zu füllen. Darin sollten sich die Elementarteilchen aus Strukturen ergeben, die keinerlei Ähnlichkeit mit Teilchen hätten.

Den Zufall nicht leugnen – sondern ihm auf den Grund gehen

Die Ansicht, Einstein hätte den Zufall in der Quantenmechanik abgelehnt, ist grundfalsch. Er wollte ihn erklären, nicht beseitigen. Obwohl er daran scheiterte, ist seine intuitive Einsicht auch heute noch richtig. Quanten- und Subquantenebene – ebenso wie andere Ebenenpaare in der Hierarchie der Natur – sind verschieden aufgebaut. Daher folgen sie unterschiedlichen Gesetzen. Die Regeln einer Ebene können ein zufälliges Element enthalten, selbst wenn die darunterliegende vollständig geordnet und berechenbar ist.

Beispielsweise existieren für einen Würfel auf atomarer Ebene Myriaden mögliche molekulare Konfigurationen, die uns ununterscheidbar erscheinen würden. Verfolgt man eine dieser Anordnungen, so erhält man, ganz deterministisch, ein spezifisches Ergebnis für den Wurf. Eine einzige makroskopische Bedingung – das Würfeln – kann zu verschiedenen Resultaten führen. »Wenn wir den Würfel auf der Makroebene beschreiben, sehen wir ihn als stochastisches System, das einen objektiven Zufall zulässt«, sagt List, der zusammen mit dem Mathematiker Marcus Pivato von der Universität de Cergy-Pontoise in Frankreich untersucht hat, wie solche verschiedenen Wirklichkeiten ineinandergreifen.

Obwohl die höhere Stufe auf der darunterliegenden aufgebaut, ist sie autonom. Um Würfel zu beschreiben, muss man

dort arbeiten, wo Würfel existieren. So kommt man nicht umhin, die Atome und ihre Dynamik zu vernachlässigen. Kreuzt man eine Ebene mit der anderen, begeht man einen Kategorienfehler – vergleichbar damit, nach der politischen Orientierung eines Tunfischsandwiches zu fragen, um auf ein Beispiel des Philosophen David Albert von der Columbia University zurückzugreifen. »Wenn wir Phänomene betrachten, die sich auf mehreren Ebenen beschreiben lassen«, so List, »müssen wir begrifflich sehr sorgfältig darauf achten, sie nicht zu vermischen.«

Deshalb ist der Ausgang eines Wurfs nicht nur scheinbar zufällig. Er ist es vielmehr wirklich. Ein göttliches Wesen könnte einwenden, es sähe im Voraus exakt, was passiert – aber es kann nur sagen, was mit den Atomen geschieht. Es wüsste nicht einmal, was ein Würfel ist, weil es sich dabei um eine Information aus einer anderen Realität handelt. Es sieht niemals einen Wald, sondern immer nur die Bäume. Damit es weiß, auf welcher Seite der Würfel landet, müssten wir ihm erklären, worauf es achten soll. »Der Beobachter könnte nur auf den Ablauf in der höheren Ebene schließen, wenn wir ihm mitteilen, mit welchen Elementen wir diese physikalische Wirklichkeit beschreiben«, sagt List. Vielleicht wäre das allsehende Wesen dann sogar neidisch auf unsere Perspektive.

Diese Logik funktioniert ebenso mit umgekehrten Vorzeichen. Indeterministische Mikrophysik kann zu determinis-

tischer Makrophysik führen. Bei der Flugbahn eines großen Objekts mitteln sich die Zufälligkeiten der Quantenebene heraus. Und auch Temperatur und andere Eigenschaften eines Gases folgen sehr einfachen Gesetzen, obwohl es aus Molekülen besteht, die enorm komplizierte und letztlich indeterministische Bewegungen durchführen. Physiker wie etwa Robert Laughlin von der Stanford University spekulieren deshalb sogar, die niedrigere Ebene könnte irrelevant sein. Selbst völlig beliebige Bausteine produzieren ein und dasselbe kollektive Verhalten. Tatsächlich lassen sich so unterschiedliche Systeme wie Wassermoleküle, Sterne in einer Galaxie und der Straßenverkehr mit denselben Gesetzen der Flüssigkeitsdynamik beschreiben.

Die Angst davor, die Abwesenheit von Kausalität könnte das Ende der Wissenschaft bedeuten, löst sich damit auf. Es gibt keine große Mauer um uns, die einen gesetzestreu Teil des Universums vom anarchistischen Rest abschirmt. Stattdessen präsentiert sich die Welt als abwechslungsreiche Schichttorte. Das irdische Wetter beispielsweise basiert auf Bewegungsgesetzen, doch Wetterberichte geben Wahrscheinlichkeiten an, während wiederum längerfristige klimatische Trends vorhersagbar sind. Auch biologische Vorgänge bauen auf deterministischer Physik auf, aber komplette Organismen und Ökosysteme erfordern ganz andere Modelle der Beschreibung.

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 der Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« und »Das Interview« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg

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

Spektrum-Workshop »Das Interview«; Preis: € 179,- pro Person; Sonderpreis für Abonnenten: € 159,-

Weitere Informationen und Anmelde­möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!



Wir Menschen sind Teil der Tortenschichten. Wir haben das überwältigende Gefühl, einen freien Willen zu besitzen. Wir verhalten uns oft unvorhersehbar, und bei den meisten Entscheidungen haben wir den Eindruck, wir hätten auch anders wählen können. Doch wenn man behauptet, menschliche Freiheit würde Freiheit der Teilchen erfordern und dafür müsste etwas – wie die Quantenmechanik – den deterministischen Fluss der Ereignisse unterbrechen, führt dieses Argument in die Irre. Es befreit die Teilchen, lässt die Menschen aber versklavt. Ob unsere Entscheidungen bereits seit dem Urknall vorherbestimmt sind oder durch freie Partikel zu Stande kommen – es sind in beiden Fällen nicht unsere eigenen. Um als Mensch frei zu sein, benötigen wir keine Freiheit auf der Ebene der Teilchen, sondern auf derjenigen der Menschen. Und diese ist möglich, weil die beiden Schichten unabhängig voneinander sind. Selbst wenn wir alles, was wir tun, bis zu den ersten Ereignissen im Kosmos zurückverfolgen können, sind wir trotzdem Autoren unserer eigenen Handlungen, weil wir und unsere Handlungen nicht auf der Mikroebene der Materie existieren, sondern auf der Makroebene des Geistes.

Frei in einer Welt der Gesetze

Man könnte einwenden, dass wir immer noch eine Marionette der Naturgesetze seien und unsere Freiheit nur eine Illusion wäre. Aber dieses Wort beschwört Bilder von Fata Morgana und zersägten Jungfrauen herauf, von Dingen, die selbst nicht real sind. Der makroskopische Indeterminismus ist jedoch anders. Er ist sehr real, nur eben nicht grundlegend. Er ist vergleichbar mit dem Leben. Atome sind vollständig leblos, doch große Mengen von ihnen können lebendig sein und atmen. »Alles, was mit handelnden Wesen zu tun hat, mit ihren inneren Zuständen, ihren Entscheidungen und Wahlmöglichkeiten, besitzt keinerlei Grundlage im begrifflichen Repertoire der fundamentalen Physik«, stellt List fest. »Das bedeutet nicht, dass diese Erscheinungen nicht existieren. Es bedeutet nur, dass es sich um Phänomene einer höheren Ebene handelt.«

Es wäre ein Kategorienfehler – und zudem wenig erhellend –, menschliche Entscheidungen mit der Mechanik der Atome im Gehirn zu beschreiben. Stattdessen müssen wir Konzepte der Psychologie verwenden: Verlangen, Wahlmöglichkeiten, Absichten. Weshalb habe ich mich für Wasser entschieden und nicht für Wein? Wenn wir nach dem Warum fragen, wollen wir zumeist die Motivation einer Person ergründen und nicht den physikalischen Hintergrund. Psychologische Erklärungen setzen genau die von List erläuterte Art von Indeterminismus voraus.

Sicher erklärt Lists Modell den freien Willen nicht vollständig. Die Hierarchie der Ebenen bietet Spielraum für ihn, indem sie Psychologie von Physik trennt und so für uns die Möglichkeit schafft, das Unerwartete zu tun. Aber wir müssen diese Möglichkeit auch nutzen. Würden wir beispielsweise jede Entscheidung vom Wurf einer Münze abhängig machen, so wäre das immer noch Indeterminismus auf ma-

roskopischer Ebene, wir würden es hingegen wohl kaum noch als unabhängige Wahl bezeichnen.

Diese Sichtweise auf den Determinismus passt letztlich auch zu einer 1956 (im Jahr nach Einsteins Tod) entwickelten Deutung der Quantenmechanik: der Viele-Welten-Interpretation. Ihre Anhänger behaupten, die Quantenphysik beschreibe ein Multiversum, eine große Menge paralleler Universen. Es verhält sich insgesamt deterministisch, sieht für uns jedoch zufällig aus, weil wir nur eine der Realitäten wahrnehmen.

Sendet etwa ein Atom ein Photon entweder nach rechts oder nach links, gibt die Quantenmechanik keine Antwort darauf, welche dieser beiden Möglichkeiten stattfindet. In der Viele-Welten-Interpretation treten einfach beide Varianten ein – das Universum spaltet sich in zwei neue Realitäten auf. Zusammengenommen ist der Vorgang also deterministisch. Wir als Beobachter von innen können ihn trotzdem nicht vorhersagen. »Es gibt keine echte Zufälligkeit im Kosmos, aber für das Auge des Betrachters können Dinge zufällig erscheinen«, sagt der Kosmologe Max Tegmark vom Massachusetts Institute of Technology (Cambridge, USA), ein prominenter Befürworter dieser Sichtweise. »Die Zufälligkeit entspringt der Unfähigkeit, den eigenen Standort zu lokalisieren.«

Dieser Gedanke bedeutet, wieder übertragen auf einen Würfel oder ein Gehirn: Jedes Objekt kann aus unzähligen unterschiedlichen atomaren Konfigurationen bestehen. Jede der Anordnungen ist für sich betrachtet deterministisch. Da wir aber nicht wissen können, welche von ihnen unserem Würfel oder unserem Gehirn entsprechen, halten wir das Ergebnis des Wurfs oder unserer Entscheidungen für unbestimmt. Die Existenz paralleler Universen ist keineswegs nur eine exotische Idee. Unsere Körper sind kleine Multiversen, und es ist die Vielfalt der daraus resultierenden Möglichkeiten, die uns einen freien Willen schenkt. ~

DER AUTOR



George Musser ist Journalist und Autor populärwissenschaftlicher Bücher über Physik, etwa »Spooky Action at a Distance« zum quantenmechanischen Phänomen der Verschränkung.

QUELLEN

- Butterfield, J.:** Laws, Causation and Dynamics at Different Levels. In: Interface Focus 2, S. 101–114, 2012
- Dennett, D. C.:** Freedom Evolves. Viking Press, New York 2003
- Howard, D.:** Review Essay: The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory by Arthur Fine. In: Synthese 86, S. 123–141, 1991
- List, C.:** Free Will, Determinism, and the Possibility of Doing otherwise. In: Noûs 48, S. 156–178, 2014
- Tegmark, M.:** Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality. Alfred A. Knopf, New York 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/136811

1915

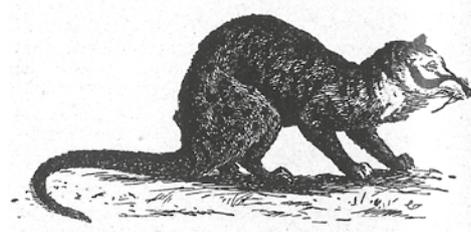
Kaffeefreunde im Tierreich

»Nach einer Legende soll die Entdeckung der anregenden Wirkung des Kaffees auf

die Beobachtung eines Ziegenhirten zurückzuführen sein, dessen Schutzbefohlene, nachdem sie die Blätter eines Kaffeestrauches aufgezehrt hatten, in merkliche Unruhe verfielen. Auf Java lebt eine Marderart, die mit großer Vorliebe Kaffeekirschen verzehrt. Das unter dem Namen Loewak bekannte Tier begnügt sich mit dem

Fleisch und gibt die Bohnen wieder zurück. Trotz des ungewöhnlichen Weges gelten sie nicht als unappetitlich,

diese Bohnen werden ausgewählt, da sie ein Getränk von vortrefflichem Geschmack liefern.« Kosmos 11, 1915, S. 394



Marder mit Vorliebe für Kaffeekirschen.

Gewitterwolke auf Abwegen

»Daß Berge und Hügel auf die Wetterlage Einfluß üben können, weiß man längst. Daß auch elektrische Kraftleitungen einen Einfluß haben können, darüber hat noch nichts verlautet. Herr Wennberg bringt aus Schweden eine merkwürdige Beobachtung. Das Dorf Fogdhytta, in einer von niedrigen Hügeln umgebenen Ebene gelegen, war früher von Gewittern nicht verschont geblieben. Seitdem nun vor etwa 20 Jahren in der Nähe eine Kraftstation angelegt wurde, kommen keine Gewitter mehr. Man kann jetzt beobachten, wie sich die Wolken trennen und sich auf die beiden Kraftleitungen nach Dalkarlsberg und Striberg verteilen.« Prometheus 1361, 1915, S. 144

Speiseplan des Mammuts

»Wiederholt wurden in den Tundren Nordsibiriens Kadaver des Mammuts gefunden, welche sich, im Eis eingefroren, jahrtausendlang gut erhalten hatten. Bei einem auf der Insel Liakhov gefundenen Mammut waren die Weichteile und die Eingeweide teilweise wie frisch. Der Magen enthielt ungefähr 1ccm einer grünlichen Masse aus zusammengereisten pflanzlichen Resten, die stark von den Verdauungssäften angegriffen waren. Immerhin konnten drei Moosarten festgestellt werden. Alle drei kommen noch in Sibirien vor. Fernand Camus glaubt, daß die Moose, die wegen ihres geringen Nährwertes meist verschmäht werden, beim Abweiden von Gräsern in den Magen gekommen sind.« Die Umschau 45, 1915, S. 896



Die Figuren von Esie.

Steinerne Kunst

»Der Schwerpunkt in der Kunst Afrikas liegt in der Plastik. Doch nicht von Holzmasken soll hier die Rede sein, sondern von den viel selteneren Steinplastiken. Gerade dort, wo Holz am üppigsten wächst, wirken auch

Feuchtigkeit und Insekten. Felsbilder werden nicht so leicht zerstört. Man nennt sie Nomoli, stellt sie auf den Feldern auf und opfert ihnen, damit die Ernte gut ausfällt. Die drei Zentren der Steinmetzkunst in Afrika sind das Mende-Kissi-Land,

1965

das Gebiet von Esie und Ife im Yoruba-Land sowie das Gebiet am unteren Kongo.« Kosmos 11, 1965, 476–478

Sicherer Hafen

»Drang nach Erkenntnis und sportliche Begeisterung führten zur Entdeckung des alten Hafens von Arvad vor der syrischen Küste durch die Archäologin Honor Frost, die zugleich eine erfahrene Sporttaucherin ist. Durch die Verbindung herkömmlicher Messungsmethoden mit Luftaufnahmen hat H. Frost die Archäologie um wesentliche Erkenntnisse bereichert. Die Forschungen gelten der Zeit um 2000 v. Chr., als die phönizische Küste das bedeutendste Zentrum des Seehandels war. Dieser muß sich auf einige größere Häfen zwischen Griechenland und Ägypten gestützt haben. Zeitgenössische Quellen nennen Tyrus, Pharos und Arvad. Wegen der Lage auf dem Riff, das heute etwa 800 m lang ist und 6000 Bewohner hat, ist Arvad erhalten geblieben.« Kosmos 11, 1965, S. 390

Schulstunde mit »Keyboard Kate«

»In einer Londoner Handelsschule wird der Schreibmaschinen-Unterricht von einem Roboter erteilt. »Keyboard Kate« arbeitet rascher und wirksamer als menschliche Lehrkräfte und ist imstande, auf die Schüler verständnisvoll einzugehen. Es handelt sich um ein Elektronen-Gehirn, das mit einem Übungsbuch für Schreibmaschinen-Unterricht »gefüttert« ist. Jeder Schüler hat einen Bildschirm vor sich, auf dem die Anweisungen aufleuchten. Bei falschen Griffen erscheint ein Warnungssignal. Da sich der Ablauf der Lerngeschwindigkeit jedes Schülers automatisch anpasst, werden die rascher Auffassenden nicht durch das langsame Tempo der Begriffsstutzigen beeinträchtigt.« Neuheiten und Erfindungen 354, 1965, S. 204

GEOMETRIE

Unordentliche Fünfeckspflasterungen

Nach jahrzehntelanger Pause ist ein neuer, fünfeckiger Stein entdeckt worden, mit dem man die Ebene lückenlos bedecken kann – aber nur auf komplizierte Weise.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Quadratische Kacheln fürs Badezimmer kennt jeder. Solche aus regelmäßigen Sechsecken nach Art der Bienenwaben kann man sich ebenfalls leicht vorstellen, auch wenn sie nicht mehr häufig zu finden sind. Aber fünfeckige Kacheln? Geht das überhaupt?

Sicher nicht mit regelmäßigen Fünfecken. Die haben einen Innenwinkel von 108 Grad; legt man drei von ihnen aneinander, bleibt eine Lücke von 36 Grad, und vier Stück passen nicht um eine Ecke. Aber wenn man die Forderungen an die Regelmäßigkeit auch nur ein bisschen lockert, tun sich zahlreiche Möglichkeiten auf.

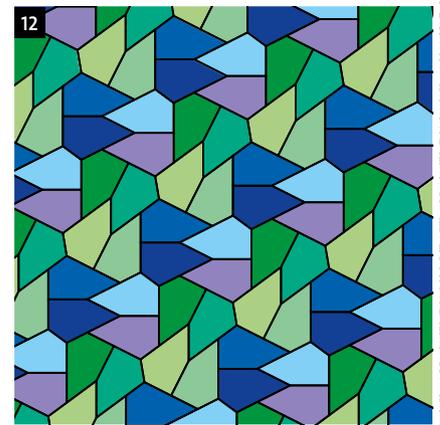
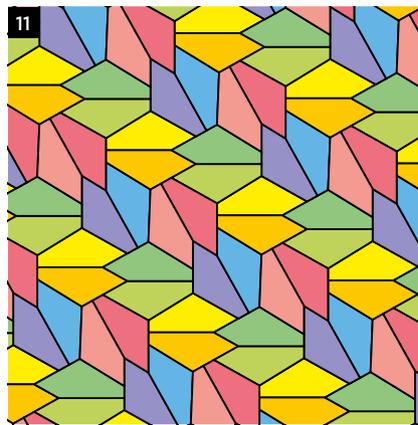
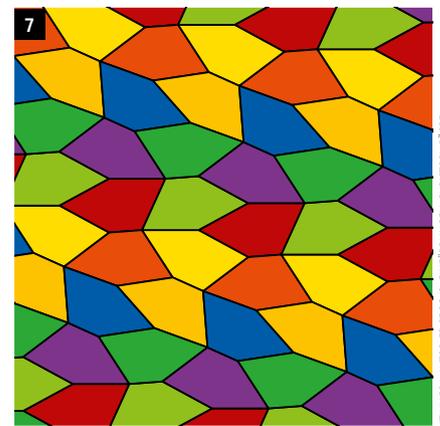
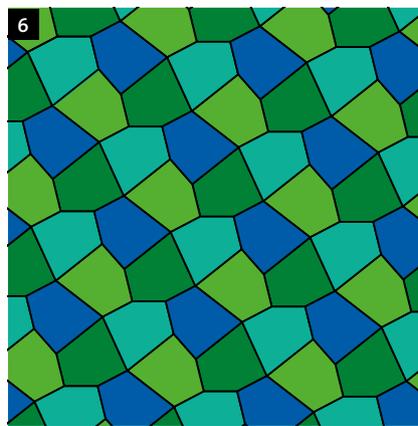
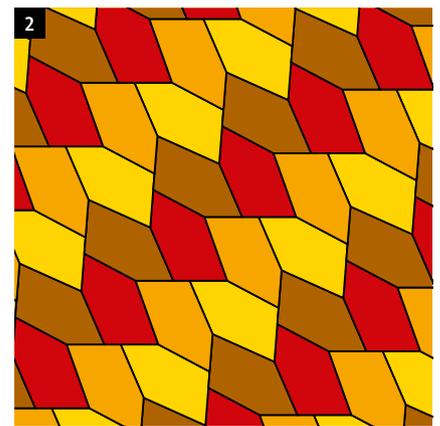
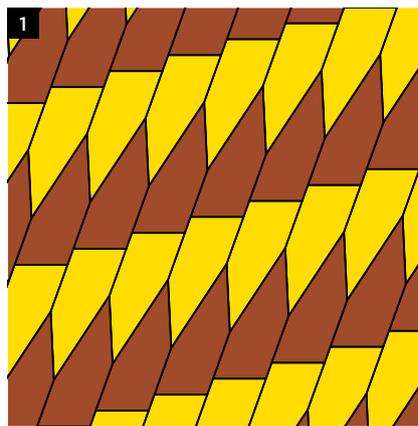
Eine von ihnen überraschte mich auf dem Vorplatz eines Postamts in Münster (Westfalen) – im Stadtteil Gievenbeck, um genau zu sein, günstig gelegen auf dem Weg vom Studentenwohnheim am Heekweg bis zum Mathematischen Institut am Coesfelder Kreuz. Ich war davon immerhin so beeindruckt, dass ich das Muster nachkonstruierte. Aber wie nicht anders zu erwarten, hatte der Hersteller der Pflastersteine keine tiefeschürfende mathematische Forschung betrieben, sondern eine längst bekannte Form übernommen. In der Literatur heißt sie Kairoer Pflaster, weil sie angeblich zahlreiche Straßen und Plätze der ägyptischen Hauptstadt bedeckt.

Der Kairoer Pflasterstein ist nicht nur spiegelsymmetrisch; er hat auch lauter gleich lange Seiten und zwei rechte Winkel, in denen sich je vier Steine treffen. Vier Exemplare bilden zusammen ein längliches Sechseck (Bild S. 64 oben). Das ist das, was die Kristallografen einen Fundamentalbereich nennen: Man kann das gesamte Parkett – das man sich stets unendlich ausgedehnt vorstellt – auch bilden, indem

man lauter Kopien des Fundamentalbereichs geeignet parallelverschoben nebeneinanderlegt. (Im Deutschen verwendet man die Bezeichnungen »Pflaster« und »Parkett« synonym für das

mathematische Objekt, das in der englischen Literatur »tiling« heißt.)

Darüber hinaus ist dieses Pflaster in einem besonderen Maß ordentlich. Es besteht nicht nur erstens aus lauter



WOLFRAM DEMONSTRATIONS PROJECT; HTTP://DEMONSTRATIONS.WOLFRAM.COM/PENTAGON/TLINGS/. AUTOR: ED PEGG JR. EINFÄHRUNGEN: CHRISTOPH PÖPPE

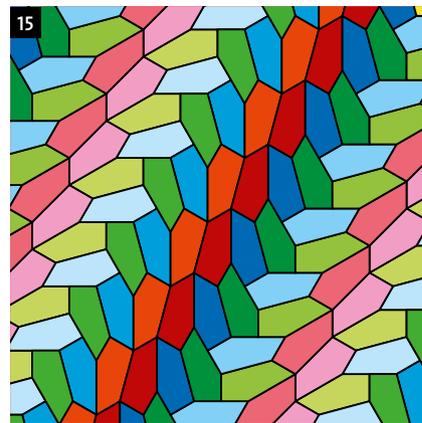
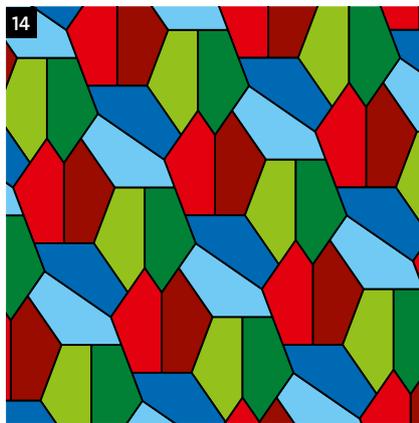
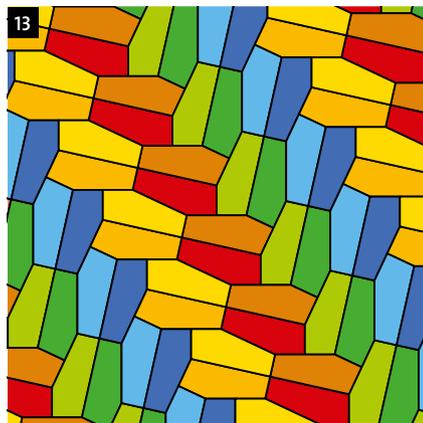
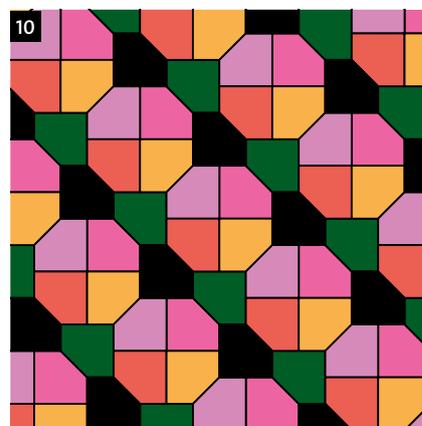
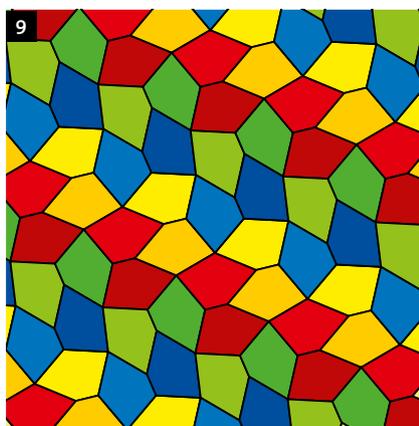
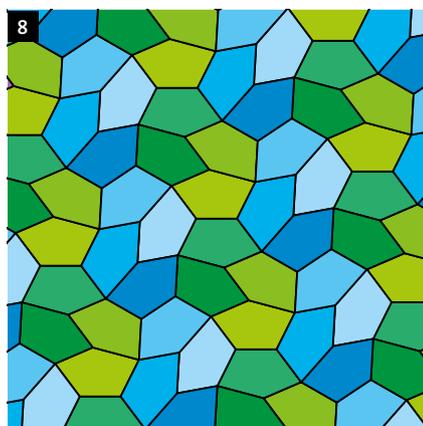
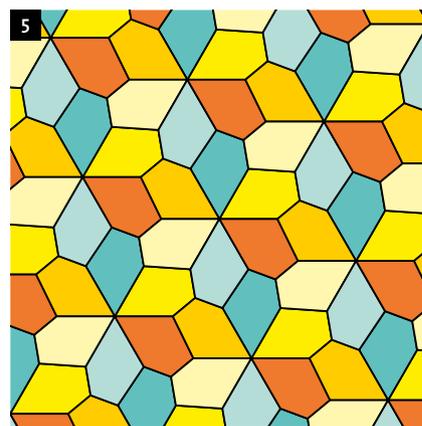
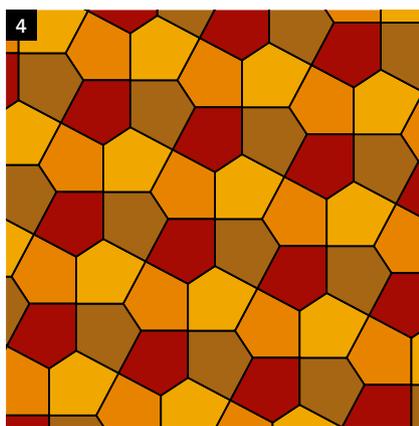
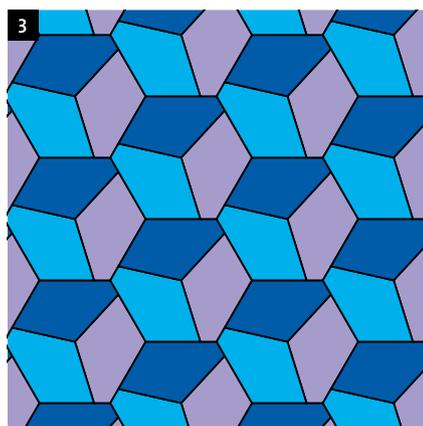
gleichen Steinen, sondern diese haben zweitens auch alle dieselben Beziehungen zueinander. Geometrisch präzise wäre der erste Satz wie folgt auszudrücken: Zu je zwei beliebigen Steinen gibt es eine Kongruenzabbildung – Parallelverschiebung, Drehung, Spiegelung oder eine Kombination daraus –, die den

ersten auf den zweiten abbildet. Und der zweite Satz lautet dann: Diese Kongruenzabbildung kann stets so gewählt werden, dass sie zugleich das ganze Pflaster auf sich selbst abbildet, also jeden Stein genau auf einen anderen Stein.

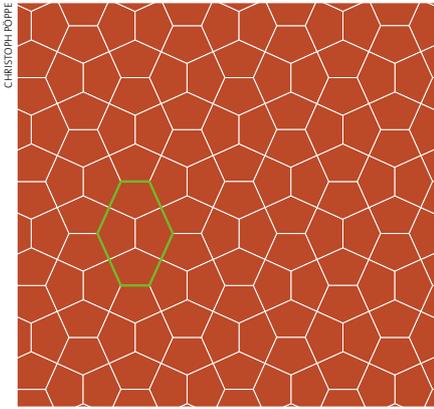
Ordentliche (offizielle Bezeichnung: »isohedrale«) Parkette sind gewisser-

maßen die Musterknaben. Sie verhalten sich sehr berechenbar; denn der Klub dieser Kongruenzabbildungen hat die Struktur einer mathematischen Gruppe. Wenn man nämlich mit einer Abbildung von Stein 1 zu Stein 2 kommt und mit einer anderen von Stein 2 zu Stein 3, so führt einen die Abbildung,

Die bisher bekannten 15 Klassen von Pflasterungen mit jeweils einem einzigen konvexen fünfeckigen Pflasterstein. Die ersten fünf wurden Anfang des 20. Jahrhunderts von Karl Reinhardt gefunden, die Nummern 6 bis 8 von Richard Kershner, 9, 11, 12 und 13 von Marjorie Rice, 10 von Richard James und 14 von Rolf Stein. Die letzte Klasse kam erst im Sommer 2015 bei einer Computersuche von Casey Mann, Jennifer McCloud und David Von Derau zu Tage.



WOLFRAM DEMONSTRATIONS PROJECT, [HTTP://DEMONSTRATIONS.WOLFRAM.COM/PENTAGONTILINGS/](http://demonstrations.wolfram.com/PentagonTilings/), AUTOR: ED PEGG JR., EINFÄRBUNGEN: CHRISTOPH PÖPPE



Das Kairoer Pflaster besteht aus symmetrischen, gleichseitigen Fünfecken mit je zwei rechten Winkeln. Vier Steine zusammen (grün umrahmt) bilden einen Fundamentalbereich: Unendlich viele Exemplare, mehrfach in zwei voneinander unabhängigen Richtungen verschoben, ergeben das gesamte Parkettmuster.

die aus den ersten beiden zusammengesetzt ist, von Stein 1 zu Stein 3, gehört also auch zum Klub. Nichtstun (das »neutrale Element«) ist eine Kongruenzabbildung, die das Pflaster invariant lässt; Gleiches gilt für die Umkehrung jeder Abbildung, die zur Gruppe gehört. Damit sind sämtliche wesentlichen Zutaten einer Gruppe beisammen.

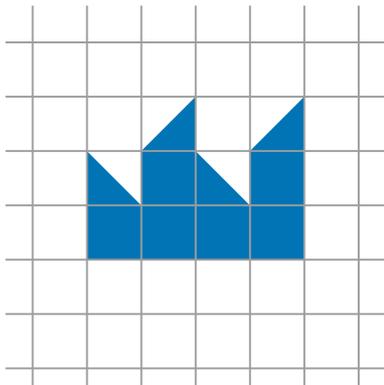
Obendrein enthält die Menge dieser Abbildungen eine Schar von Parallelverschiebungen – das sind diejenigen, die ganze Fundamentbereiche aufeinander abbilden – in zwei voneinander unabhängigen Richtungen, also ist es eine der (ebenen) kristallografischen Gruppen. Deren gibt es nur 17; sie liegen allen möglichen Ornament- und Tapetenmustern zu Grunde (Spektrum der Wissenschaft 3/2014, S. 68), und

man kennt viele ihrer Eigenschaften. Aus diesen wiederum kann man Bedingungen für isohedrale Pflaster erschließen, was deren Erforschung einigermaßen übersichtlich macht.

Erzwungene Unordentlichkeit

Gibt es überhaupt unordentliche Pflaster? Aber sicher. Ein schlampiger Fliesenleger kann sie mit ganz gewöhnlichen Quadratkacheln mühelos herstellen, indem er erst eine Reihe legt, die zweite leicht versetzt darüber, so dass es keine durchgehenden senkrechten Fugen gibt, die dritte ein bisschen anders versetzt, und so weiter, und schon ist jede Gruppenstruktur dahin. Diese Art von Unordentlichkeit kann immer dann auftreten, wenn das Parkett durchgehende gerade »Bruchlinien« enthält, so dass man die Halbparkette

Der unordentliche Pflasterstein von Heinrich Heesch

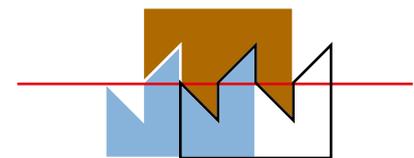


dass nur sein Spiegelbild die Lücken füllen kann. Das ist auf zwei verschiedene Weisen möglich (links unten).

In beiden Fällen geht der obere Stein aus dem unteren nicht durch eine Spiegelung hervor, sondern durch eine »Gleitspiegelung«, das heißt eine Spiegelung an einer horizontalen Achse (rot) gefolgt von einer Translation (Parallelverschiebung) um eine Kästchenbreite nach links beziehungsweise rechts.

Durch Translationen in horizontaler Richtung kann man aus dem blauen Stein einen unendlich ausgedehnten »Unterkiefer« erzeugen und aus dem braunen – in jeder der beiden Positio-

nen – einen »Oberkiefer«. Zusammen ergeben sie ein perfekt schließendes Gebiss, das sich wiederum auf ordentliche Weise nach oben und unten zu einer Pflasterung der Ebene vervielfachen lässt (Mitte unten).

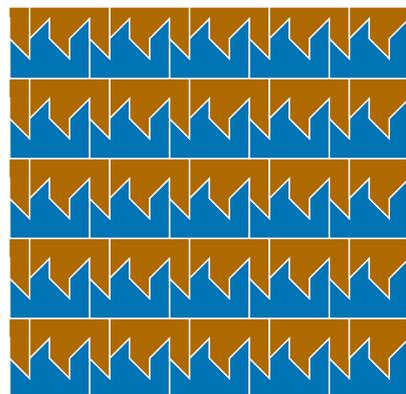
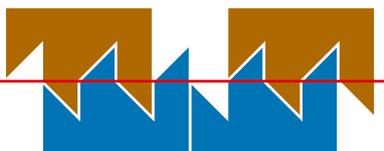


Wenn man aber die Gleitspiegelung, die aus dem blauen Stein den braunen macht, zweimal hintereinander anwendet, ist das Ergebnis nicht ein brauner Stein der Pflasterung, sondern einer an falscher Stelle (oben). Also ist die Pflasterung nicht isohedral.

Man vergewissert sich, dass es auch keine Möglichkeit gibt, sie ordentlich zu machen. Vielmehr ist das Heesch-Pflaster ein Beispiel für ein 2-isohedrales Pflaster: Es gibt zwei Klassen von Steinen (hier durch Farben gekennzeichnet), die jede für sich ein ordentliches Teilpflaster bilden, aber nur gemeinsam die Ebene füllen.

David Hilbert (1862–1943) glaubte, es gebe keine anisohedrale Kachel, also eine, die nur auf unordentliche Weise die Ebene lückenlos füllt. Doch der Stein, mit dem Heinrich Heesch seiner Vermutung den Garaus machte, ist überraschend einfach zu konstruieren; ein Stück Rechenkästchenpapier genügt (oben).

Er hat zwei nach oben weisende »Zähne«, die so asymmetrisch gebaut sind,



beiderseits einer Bruchlinie gegeneinander verschieben kann. Aber eine derartige Unordentlichkeit gilt irgendwie als unwesentlich, weil sie sich durch sorgfältiges Arbeiten vermeiden lässt.

Interessanter ist die Frage, ob es Kachelformen gibt, welche die Unordentlichkeit erzwingen. Ein solcher »anisohedrales Stein« wäre zwar so gebaut, dass man mit ihm die Ebene pflastern kann, aber unter keinen Umständen in ordentlicher Weise. Vor einem guten Jahrhundert galt die Frage als so bedeutend, dass David Hilbert (1862–1943) sie 1900 unter der Nummer 18 in seine berühmte Liste der 23 Probleme aufnahm, die seiner Ansicht nach die Mathematik des anbrechenden Jahrhunderts bestimmen würden.

Nicht ohne Grund formulierte Hilbert das Problem gleich in drei Raumdimensionen; es ging ihm also um die Frage, ob es einen Klotz geben könnte, der zwar in unendlich vielen Exemplaren den Raum lückenlos füllt, das aber nur in unordentlicher Weise tun kann. Die zweidimensionale Variante war ihm vermutlich nicht gewichtig genug für ein Jahrhundertproblem; vielmehr glaubte er, dass ein echt anisohedrales Pflasterstein in der Ebene ohnehin nicht existiere.

Davon ging auch der Frankfurter Mathematiker Karl Reinhardt (1895–1941) aus, der im Ersten Weltkrieg ein Jahr als Hilberts Assistent in Göttingen zubrachte. In seiner Dissertation klärte er einige Grundlagen. So zeigte er, dass sich jedes Dreieck ebenso wie jedes Viereck als Grundstein einer ordentlichen Pflasterung eignet. Über die Berechnung der Winkelsummen wies er nach, dass Pflasterungen mit lauter kongruenten Siebenecken nicht existieren, es sei denn, die Pflastersteine wären nicht konvex, hätten also einspringende Ecken. Entsprechendes gilt für alle Vielecke mit noch höherer Eckenzahl.

Für konvexe Sechsecke konnte Reinhardt alle Klassen möglicher Parkettsteine aufzählen und feststellen, dass sie sämtlich ordentlich sind. Übrig blieb der Fall der Fünfecke. Wieder gelang es Reinhardt, die ordentlichen kon-

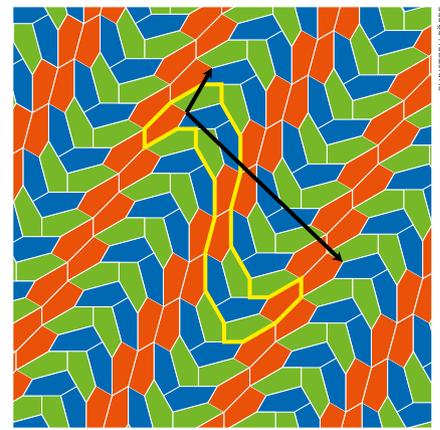
Die neue Pflasterung mit Fünfecken von Casey Mann, Jennifer McLeod und David Von Derau. Zwölf Steine bilden einen Fundamentalbereich (gelb umrahmt): Das ganze Parkett lässt sich durch wiederholtes Parallelverschieben mit zwei Vektoren (schwarz) erzeugen. Innerhalb eines Fundamentalbereichs finden sich Drehungen um 90 oder 180 Grad, die gleichfarbige Kacheln aufeinander abbilden, sowie Spiegelungen (blau nach grün und umgekehrt); aber diese Abbildungen gehören nicht zur Symmetriegruppe des Parketts.

vexen fünfeckigen Pflastersteine vollständig zu erfassen. Sie gehören zu fünf Klassen, jede von ihnen gekennzeichnet dadurch, dass manche Seiten und Winkel des Pflastersteins gewisse Bedingungen erfüllen müssen. Andere Längen und Winkel sind noch variabel. Meistens kann man daher ein Mitglied einer Klasse auf gewisse Arten deformieren, und es bleibt immer noch in der Klasse.

Endlose Suche nach fünfeckigen Pflastersteinen

Somit konnte Reinhardt mit gutem Recht vermuten – allerdings nicht beweisen –, dass er auch bei den Fünfecken seine überaus mühsame Klassifikationsarbeit erschöpfend erledigt hatte. Denn die isohedralen Steine hatte er alle gefunden und beschrieben, und anisohedrale gab es angeblich nicht.

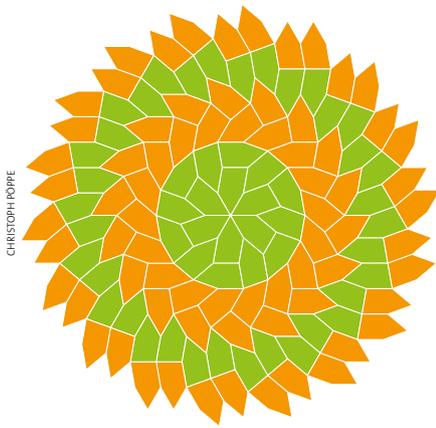
Das stellte sich 35 Jahre später als Irrtum heraus. Heinrich Heesch (1906–1995) gelang es, einen solchen Stein zu konstruieren (»Der unordentliche Pflasterstein«, links). Konvex ist er nicht; einen Schönheitswettbewerb dürfte er auch kaum gewinnen, und ein Fliesenleger würde sich nicht gerade darum reißen, mit ihm zu arbeiten, schon weil von seinem Standpunkt eine Kachel und ihr Spiegelbild verschiedene Dinge sind – man kann das Ding ja nicht einfach auf die Rückseite drehen. Gleichwohl lehrte Heeschs Entdeckung die Mathematiker, dass es sich lohnt, außerhalb des übersichtlichen Bereichs der ordentlichen Pflaster nach interessanten Steinen zu suchen.



CHRISTOPH POPPE

Wieder vergingen Jahrzehnte, bis 1967 Richard Brandon Kershner drei weitere – unvermeidlich unordentliche – fünfeckige Pflastersteine fand. Im Hauptberuf erarbeitete Kershner übrigens im Labor für angewandte Physik der Johns Hopkins University die Grundlagen des Satellitennavigationssystems, das heute unter dem Namen GPS Autofahrern das mühselige Studieren von Straßenkarten erspart. Wie zuvor Reinhardt war auch Kershner überzeugt, damit das Feld vollständig abgegrast zu haben; und auch er irrte sich.

Als im Juli 1975 Martin Gardner in seiner legendären Kolumne »Mathematical Games« im »Scientific American« Kershners Ergebnis vorstellte und dem Problem damit allgemeine Aufmerksamkeit verschaffte, meldete sich wenig später ein Wissenschaftler von der Control Data Corporation namens Richard E. James III mit einer Pflasterung, die Kershner entgangen war. Er zersägte ein regelmäßiges Achteck in vier gleiche (fünfeckige) Teile, setzte solche Achtecke in langen Reihen aneinander und stellte erfreut fest, dass zwischen zwei solcher Reihen genau ein anmutig gewundenes Band aus denselben Fünfecken passt (Bild S. 62/63, Teil 10). Diese Pflasterung ist, wie auch einige andere, nicht kantentreu (»edge-to-edge«), das heißt, Pflastersteine stoßen nicht nur an den Ecken der Fünfecke zusammen, sondern manchmal liegt ein Treffpunkt mehrerer Pflastersteine irgendwo auf einer Fünfecksseite.



CHRISTOPH PÖPPE

Damit nicht genug: Marjorie Rice, eine Hausfrau aus San Diego, die seit den üblichen Schrecken der Schulzeit nicht mehr ernsthaft mit Mathematik in Kontakt gekommen war, machte sich mit ihrer eigenen Systematik über das Problem her und spürte im Lauf mehrerer Jahre vier weitere Steine auf. 1985 fügte Rolf Stein, damals Doktorand in Dortmund, der Liste noch ein Fünfeck hinzu.

Kombinatorische Suche

Durch Schaden klug geworden, hielten sich die Mathematiker fortan mit voreiligen Aussagen zurück. Niemand wagte mehr zu behaupten, die mittlerweile auf 14 Einträge angewachsene Liste sei vollständig. Immerhin geben neuere Ergebnisse wertvolle Hinweise darauf, wo man nicht mehr suchen muss. Michael Hirschhorn und David Hunt von der University of New South Wales in Australien zeigten 1985, dass es zumindest unter den konvexen Fünfecken mit lauter gleich langen Seiten keinen Pflasterstein gibt, der nicht zu einer der bekannten 14 Klassen gehört. Olga Bagina von der Staatsuniversität in Kemerowo bei Nowosibirsk (Russland) konnte 2004 die entsprechende Aussage für alle kantentreuen Pflasterungen mit konvexen Fünfecken beweisen.

Nun wollten Casey Mann und seine Frau Jennifer McCloud von der University of Washington in Bothell es wissen. Im Prinzip ist es ein kombinatorisches Problem mit endlich vielen Möglichkeiten. Man weiß, wie ein Fundamentbereich in der Ebene auszusehen hat: im Wesentlichen ein Parallelogramm,

Das *Versatile* ist ein gleichseitiges Fünfeck mit den Winkeln 60, 160, 80, 100 und 140 Grad. Diese Winkel ergänzen sich in den verschiedensten Kombinationen zu 360 Grad, so dass mehrere Fünfecke, entsprechend angeordnet, um eine Ecke passen. Die hier gezeigte sechszählig rotations-symmetrische Anordnung stammt von Michael Hirschhorn; sie ist beliebig fortsetzbar und wird nie periodisch. Die Urform und ihr Spiegelbild sind mit verschiedenen Farben gekennzeichnet.

bei dem parallele Seiten in genau gleicher Weise zu Streckenzügen deformiert sein dürfen. Diese Fläche gilt es in eine vorgegebene Anzahl kongruenter Fünfecke zu zerlegen; dabei darf man kantentreue Zerlegungen von vornherein aussortieren und gleichseitige Fünfecke ebenso.

Also bleibt die Aufgabe, eine endliche Menge von Punkten in der Ebene zu finden, nämlich die Eckpunkte des Fundamentbereichs und die Ecken der Pflasterung im Inneren desselben. Diese müssen zahlreiche Bedingungen erfüllen, damit die Fünfecke auch kongruent sind. Um welche Bedingungen es sich im Einzelfall handelt, ist nicht von Anfang an klar, sondern ergibt sich daraus, wie die Fünfecke relativ zueinander zu liegen kommen sollen.

Die Menge der denkbaren Bedingungen ist so groß und unübersichtlich, dass Lösungsversuche mit Papier und Bleistift keine Chance haben. Also taten sich Mann und McCloud mit dem Doktoranden David Von Derau zusammen; der verbrachte immerhin ein Jahr damit, ein Computerprogramm zu schreiben, das auf einem Superrechner binnen erträglicher Zeit die ersten Ergebnisse erwarten ließ.

Dann kam die Überraschung: Noch während der Testphase spuckte das Programm ein Pflaster aus, das eine Klasse für sich eröffnete – die fünfzehnte (Bild S. 65). Es ist zugleich das einzige seiner Klasse, denn die Bedingungen lassen keinen Raum mehr für Deformationen.

Ob da noch mehr nachkommen? Dazu können die Autoren selbst keine belastbare Prognose abgeben. Sie ha-

ben der Welt zwar ihren Treffer unverzüglich mitgeteilt, aber die wissenschaftliche Arbeit, die das alles erklärt, lässt noch auf sich warten.

Ob man sich mit dem neu entdeckten Stein das eigene Badezimmer kacheln möchte? Ich weiß nicht so recht. Der Hersteller müsste die Kacheln in zwei zueinander spiegelbildlichen Versionen fertigen, und der Kreativität sind äußerst enge Grenzen gesetzt, denn die Teile passen eben nur auf eine Weise zusammen. Da haben sich bei der Erforschung der Fünfeckskacheln ganz andere Möglichkeiten aufgetan, die über die eingangs erwähnte Schlampigkeit weit hinausgehen. Das »Versatile« lässt sich mit seinesgleichen auf so viele verschiedene Weisen zusammenfügen, dass man die unglaublichsten Muster legen kann (Bild links). ☞

DER AUTOR



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

QUELLEN

- Bagina, O.:** Tiling the Plane with Congruent Equilateral Convex Pentagons. In: Journal of Combinatorial Theory, Series A 105, S. 221–232, 2004
- Bellos, A.:** Attack on the Pentagon Results in Discovery of New Mathematical Tile. In: The Guardian, 11. August 2015
- Gardner, M.:** Tiling with Convex Polygons. In: Time Travel and Other Mathematical Bewilderments. Freeman, New York 1987, S. 163–176
- Hirschhorn, M. D., Hunt, D. C.:** Equilateral Convex Pentagons which Tile the Plane. In: Journal of Combinatorial Theory, Series A 39, S. 1–18, 1985
- Reinhardt, K.:** Über die Zerlegung der Ebene in Polygone. Dissertation, Frankfurt am Main 1918
- Schattschneider, D.:** Tiling the Plane with Convex Pentagons. In: Mathematics Magazine 51, S. 29–44, 1978

WEBLINK

Dieser Artikel und Links zu den oben genannten Publikationen im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368114

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

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Kalifornien verdurstet

Seit vier Jahren leidet der Sonnenstaat unter einer extremen Dürre, die inzwischen die Landwirtschaft – und Nationalparks – ernstlich bedroht. Noch hoffen die Bewohner, dass es sich um ein vorübergehendes Extremereignis handelt. Doch angesichts der globalen Erwärmung scheinen die weiteren Aussichten düster.

Von Dan Baum

Als der amerikanische Naturforscher William Henry Brewer (1828–1910) auf seiner geologischen Erkundungstour durch den jungen US-Bundesstaat Kalifornien am 2. Dezember 1860 in der winzigen Lehmhüttsiedlung Los Angeles eintraf, notierte er in seinem Tagebuch: »Alles, was die Natur liefern müsste, um diese Gegend in ein Paradies zu verwandeln, wäre Wasser, mehr Wasser.« Drei Wochen später fielen bei den heftigsten Regenfällen seit elf Jahren viele der Lehmbauten einer reißenden Sturzflut zum Opfer. So ist das Wetter in Kalifornien.

Die Analyse des in Baumringen erhaltenen Klimaarchivs ergibt für die Vergangenheit ein ähnliches Muster wie für die heutige Zeit: Seltene feuchte Jahre unterbrechen jeweils lange, trockene Phasen. So fiel ab 1130 für 40 Jahre praktisch überhaupt kein Regen. Immer wieder kam es in der Geschichte Kaliforniens zu jahrzehntelangen Dürreperioden.

Besser als in den absoluten Niederschlagszahlen zeigt sich die Trockenheit jedoch in der Differenz zwischen der vorhandenen Feuchtigkeit und derjenigen, die eigentlich benötigt würde. In dieser Hinsicht hat es eine Dürreperiode wie die



Als Folge der jahrelangen Trockenheit in Kalifornien ist der Oroville-Stausee – hier Fotos vom Juli 2011 (links) und August 2014 (rechts) – inzwischen nur noch zu 32 Prozent gefüllt.

momentane tatsächlich noch nie gegeben. Kalifornien ist trockener als jemals zuvor seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1895. Außerdem ist es extrem heiß. Das Jahr 2014 übertraf den bisherigen Wärmerekord um mehr als ein halbes Grad Celsius. Und 2015 dürfte sogar noch heißer gewesen sein. Dadurch steigt der Wasserbedarf des Landes ausgerechnet in einer Zeit des Regenmangels. Überdies sind die Ansprüche der Bevölkerung höher als in der Vergangenheit. In Kalifornien leben heute fast 40 Millionen Menschen, und der Rest der USA wie auch Teile der übrigen Welt sind von den Lebensmitteln abhängig, die hier erzeugt werden.

Kalifornier können die Dürreperioden am Schnürchen hersagen: 1977, 1986 bis 1991, 2001 bis 2002, 2006 bis 2007 und die jetzige, die 2011 begann. Möglicherweise werden künftige Baumringforscher darin keine Abfolge getrennter Ereignisse sehen, sondern den Beginn einer Megadürre ähnlich denen im Mittelalter, in die auch gelegentliche feuchte Jahre eingestreut waren. Falls die überbevölkerte »Salatschüssel«, wie Kalifornien gerne genannt wird, tatsächlich im Zuge der globalen Erwärmung auf eine jahrzehntelange Trockenperiode zusteuert, ist der Golden State am Ende womöglich nicht wiederzuerkennen. Im schlimmsten Fall würde er seiner üppigen Landwirtschaft und uralten Baumriesen beraubt. Günstigstenfalls könnte es den bekannt einfallreichen Bewohnern gelingen, ihr Land in ein weltweit ein-

maliges Labor für das Einsparen und Wiederverwenden von Wasser zu verwandeln. So oder so ist eine schmerzliche Anpassung an die neuen Gegebenheiten unausweichlich.

Wer die kalifornische Dürre verstehen will, muss dem Weg des Wassers folgen. Es ist eine Reise voller Überraschungen. Gleich als Erstes erstaunt, dass sie etwa 10 000 Kilometer entfernt beginnt, weit draußen im Westpazifik bei den grünen Inselgruppen von Fidschi, Vanuatu und der Salomonen.

Eine irrwitzig stabile Hochdruckzone

Längs des Äquators erwärmt die Sonne den Pazifik, und die an der Erdoberfläche herrschenden Ostwinde drücken warmes Wasser in das inselreiche Meer westlich der Internationalen Datungsgrenze. Dort staut es sich zu einem riesigen »Hügel« auf, der nicht nur einige Grad wärmer ist als die See vor der Küste Südamerikas, sondern sich auch gut einen Meter höher aufwölbt. Durch diese Wärme bilden sich Gewitterwolken, die Feuchtigkeit hoch in die Atmosphäre befördern, wo der Strahlstrom, ein Höhenwind aus westlicher Richtung, sie erfasst und mit auf die Reise nach Nordamerika nimmt.

Solange die äquatoriale Warmwasserzone weit gehend westlich der Datungsgrenze verharret, herrscht La Niña: ein Wetterphänomen, das mit Dürreperioden im Südwesten der USA einhergeht. Wenn sich die oberflächennahen Winde am Äquator abschwächen oder ihre Richtung umkehren und der



GETTY IMAGES / JUSTIN SULLIVAN



GETTY IMAGES / JUSTIN SULLIVAN

Im Central Valley, der am schlimmsten von der Dürre betroffenen Region Kaliforniens, verdorren Mandelbäume (ganz links), wäh-

rend Farmer auf Plakaten gegen Wasserrationierungen protestieren (links). In Porterville sind Hunderte von Haushalten inzwi-

Warmwasserhügel auf die Ostseite der Datumsgrenze hinübergelitet, entsteht dagegen – sofern der Effekt ausgeprägt genug ist – El Niño, der als Gegenspieler von La Niña dem Südwesten der USA vermehrt Regen bringt. Die derzeitige Lage entspricht allerdings weder El Niño noch La Niña. Im betroffenen Bereich westlich der Datumsgrenze lag die Temperatur in den letzten Wintern um rund ein viertel Grad Celsius über dem Durchschnitt der vergangenen 30 Jahre, was für Meerwasser recht viel ist. Zudem fielen dort Ende 2013 bis Anfang 2014 etwa 30 Zentimeter mehr Regen als üblich. Hinzu kam ein Hurrikan der Kategorie 5, der eine gewaltige Wärmemenge aus dem aufgeheizten Ozean hoch in die Atmosphäre beförderte. Ähnliches bewirkten zwei weitere gigantische Wirbelstürme in der Region Anfang 2015.

Wissenschaftler legen sich nicht gerne fest, was in den Zeiten des Klimawandels welche Ursachen oder Folgen hat. Doch irgendetwas in Zusammenhang mit dem Warmwasserhügel im Westpazifik – vielleicht in Kombination mit einem verringerten Temperaturunterschied zwischen dem Äquator und den Polen – scheint das meteorologische Getriebe zu blockieren. Über dem Ostpazifik hat sich jedenfalls ein Hochdruckrücken in den Weg des wassergesättigten Strahlstroms gestellt. Wie ein Felsblock, der in einen Bach gerollt ist, unterbricht er die Westwindströmung und zwingt sie zum Ausweichen nach Norden. Die eigentlich für Kalifornien bestimmten Niederschläge sind folglich in riesigen Mengen auf Alaska und den Nordwesten Kanadas gefallen. Möglicherweise war das auch der Grund für die Rekordschneemassen von Chicago bis Boston im Winter 2014/15 und die historische Winterflut in Großbritannien Anfang 2014.

Solche Hochdruckrücken vor der Küste Kaliforniens, die sich dem Strahlstrom in dem Weg stellen, sind an sich nicht ungewöhnlich. Normalerweise lösen sie sich allerdings unter dem Einfluss von Stürmen, welche die Luftmassen auseinandertreiben, innerhalb weniger Wochen auf. Das aktuelle Hoch besteht jedoch schon seit dem Winter 2013/14. Zwar schwächt es sich von Zeit zu Zeit etwas ab, erholt sich dann aber erschreckend hartnäckig wieder und stemmt sich er-



GETTY IMAGES / JUSTIN SULLIVAN

neut gegen die ankommende Feuchtigkeit. Daniel Swain, ein 25-jähriger Doktorand an der Stanford University (Kalifornien), gab dieser Anomalie einen einprägsamen Namen: »ridiculously resilient ridge« (»irrwitzig stabiler Rücken«) oder Triple R. Mehrere schwache Stürme durchstießen im Winter 2014/15 das Hochdruckgebiet, darunter auch einer mit heftigen Regenfällen. Doch anstatt sich aufzulösen, baute sich der Triple R erstaunlicherweise anschließend immer wieder auf. Wie lange er sich noch hält, weiß niemand.

neut gegen die ankommende Feuchtigkeit. Daniel Swain, ein 25-jähriger Doktorand an der Stanford University (Kalifornien), gab dieser Anomalie einen einprägsamen Namen: »ridiculously resilient ridge« (»irrwitzig stabiler Rücken«) oder Triple R. Mehrere schwache Stürme durchstießen im Winter 2014/15 das Hochdruckgebiet, darunter auch einer mit heftigen Regenfällen. Doch anstatt sich aufzulösen, baute sich der Triple R erstaunlicherweise anschließend immer wieder auf. Wie lange er sich noch hält, weiß niemand.

Schneemangel in der Sierra Nevada

Vom Westpazifik herangeführte Feuchtigkeit erreicht den Erdboden weit oben in den Bergen der Sierra Nevada, die sich über 650 Kilometer hinweg entlang der Ostgrenze Kaliforniens erstreckt. Dort liegt hoch über dem Lake Tahoe der Echo Lake. In feuchten Jahren drückt der Strahlstrom Wolken in dieses Gebiet, wo sie ihre feuchte Fracht in gewaltigen Niederschlägen abladen. Vor Jahren brach ein Bekannter von mir einmal morgens auf Schiern zu seiner Hütte am Seeufer auf, die unter einer dicken Schneeschicht verborgen lag. Auf der Suche nach dem Haus grub er überall am Berghang

AUF EINEN BLICK

WASSERNOTSTAND IN DER KORNCAMMER

- 1** Kalifornien wird von einer historischen Dürre heimgesucht. Wie **Baumringdaten** zeigen, gab es **jahrzehntelange Trockenperioden** auch in der Vergangenheit, doch heute sind wesentlich mehr Menschen auf Wasser angewiesen.
- 2** Der Wassermangel hat dramatische Folgen. In der Sierra Nevada **verdorren alte, große Bäume** und machen kleineren Exemplaren Platz. Selbst die berühmten Sequoias sind bedroht.
- 3** Durch **übermäßige Förderung von Grundwasser** kollabiert der Untergrund des Central Valley. Farmer lassen Felder brach liegen und holzen Obstplantagen ab, Wasserleitungen versiegen.
- 4** Kalifornien könnte ein zweites Arizona werden. Doch die Bewohner haben begonnen, mit kreativen Ideen **Abhilfe** zu schaffen – und mit den **Lösungen** für die Probleme Geld zu verdienen.



GETTY IMAGES / JUSTIN SULLIVAN

schen ohne fließendes Wasser (rechts). Als Reaktion auf die Trockenheit bewässern Bauern bei der Stadt Firebaugh ihre Felder



GETTY IMAGES / JUSTIN SULLIVAN

neuerdings auf möglichst sparsame Weise mittels unterirdischer Leitungen (ganz rechts).

Löcher in den Schnee, ohne jedoch fündig zu werden, so dass er schließlich im Dunkeln unverrichteter Dinge auf seinen Schiern zurückfahren musste. Dagegen fiel im Winter 2014/15 fast gar kein Schnee am Echo Lake. Im Lee des Triple R gab es schon ein Jahr davor die geringste Schneebedeckung seit Beginn der Aufzeichnungen. Und dieses Jahr wurde der Negativrekord mit nur fünf Prozent der durchschnittlichen Schneehöhe gleich wieder gebrochen. Im April sind die Schneeverwehungen am Echo Lake normalerweise mannhoch. Doch als ich auf der Suche nach dem fehlenden kalifornischen Wasser Mitte des Monats dort eintraf, sah ich nur ein paar kümmerliche weiße Flecken unter den Bäumen.

Vom Echo Lake fuhr ich gute 300 Kilometer nach Süden, am Yosemite-Nationalpark vorbei, um Nathan Stephenson zu treffen, einen Pflanzenökologen beim Geologischen Dienst (Geological Survey) der USA, der sich um die weltberühmten Mammutbäume im Sequoia-Nationalpark kümmert. Diese Riesen wachsen in einem der trockensten Gebiete Kaliforniens, dem Tulare County im Central Valley. Vom Park aus fließt der Kaweah River hinab zum Lake Kaweah, einem inzwischen weit gehend entleerten Stausee, und dann weiter talwärts. Stephenson hat in seinen 35 Jahren als Park Ranger viele Dürren erlebt, doch die aktuelle ist beispiellos. »Ich schätze, dass ein Drittel der Eichen an den Hängen schon tot oder kurz vor dem Absterben ist«, beklagte er mit Blick auf einen Hangwald, der gesprenkelt mit braunen Bäumen war und selbst dem ungeübten Auge ausgebleicht und verdorrt erschien. Stephenson ist groß und schlaksig, hat einen grauen Bart und das sonnige Gemüt eines Mannes, der die meiste Zeit in der freien Natur verbringt. Aber nun starrte er missmutig unter der Krempe seines Schlapphuts hervor auf den Berghang. »Und es ist erst April«, knurrte er.

Wir stiegen wieder in seinen Subaru und fuhren den Berg hinauf zu einem Gehölz aus Weihrauchzedern, viele davon komplett braun. »Sie sind jahrhundertealt, extrem robust und kaum anfällig für Insektenbefall«, erklärte Stephenson. »Wir haben sie scherzhaft ›die Unsterblichen‹ genannt, weil sie nie einzugehen schienen.« Er hielt inne und strich mit der

Hand über die braunen Nadeln einer Zeder. »Ich fürchte, jetzt erweisen sie sich doch als sterblich.« Weiter bergauf gelangten wir in das Reich der namengebenden Sequoias. Viele standen inmitten von Haufen abgefallener Nadeln – unübersehbares Zeichen dafür, wie ihnen die Trockenheit zusetzt.

Stephenson und seine Kollegen haben 20000 Exemplare aller möglichen Baumarten an 30 weit auseinanderliegenden Standorten 33 Jahre lang überwacht. In normalen Zeiten steigt – durch winzige Kapillaren heraufgezogen – Wasser in einem zusammenhängenden Strang von den Wurzeln eines Baums bis zu jedem Blatt oder jeder Nadel. Jetzt jedoch bilden sich Hohlräume in der Flüssigkeit: Der Wasserfaden reißt, und Luftblasen gelangen in die Kapillargefäße. Die Wasserversorgung ist dadurch unterbrochen, so dass die betroffenen Pflanzenteile absterben. Manche Bäume schließen die Poren ihrer Blätter, damit weniger Wasser verdunstet. Dann können sie aber kein Kohlendioxid aufnehmen, das sie für den Aufbau von Nährstoffen bei der Fotosynthese benötigen. Normalerweise kehrt die Feuchtigkeit zurück, bevor es zu einem bedrohlichen Mangel kommt. Die aktuelle Trockenheit dauert jedoch schon so lange und die Hitze ist so groß, dass vielen Bäumen nur die verhängnisvolle Wahl zwischen Verdursten und Verhungern bleibt.

Und dann sind da die Käfer, die sich besonders gern über dürregegestresste Bäume hermachen und derzeit riesige Kiefernbestände im gesamten Westen der USA vernichten. Unter den momentanen Umständen treten sie teils in so dichten Schwärmen auf, dass man sie mit einer Baseballkappe aus der Luft fischen kann. Für einen breiten Waldstreifen in der kalifornischen Sierra Nevada, der auch durch den Sequoia-Nationalpark verläuft, ergab eine Erkundung per Flugzeug im Frühjahr 2015 mehr als zehn Millionen tote Bäume, was einem Zehntel des Bestands entspricht. Die meisten waren im Jahr davor abgestorben. Sollte die Dürre länger anhalten, könnte sie die majestätischen Wälder in den Bergen Kaliforniens zerstören – und damit auch die imposanten Sequoias wie den »General Sherman Tree«, einen 84 Meter hohen und am Boden elf Meter breiten Baumriesen,

der mit einem Rauminhalt allein des Stamms von rund 1500 Kubikmetern als der voluminöseste Baum der Welt gilt.

Dies wäre nicht nur ein enormer Verlust für Kalifornien, sondern könnte auch weltweite Auswirkungen haben. So würden unzählige Tonnen des Treibhausgases Kohlendioxid in die sich ohnehin schon erwärmende Atmosphäre freigesetzt. Außerdem ergab 2014 eine breit angelegte Studie an 673 046 Bäumen aus 403 Arten auf sechs Kontinenten unter Federführung von Stephenson, dass entgegen der allgemeinen Ansicht Bäume umso schneller wachsen, je größer und älter sie sind. Falls der Wald in der Sierra Nevada also weiterhin abstirbt, tritt bestenfalls irgendwann ein sehr viel jüngerer an seine Stelle, welcher der Atmosphäre weniger klimawirksames Kohlendioxid zu entziehen vermag.

Ein vertrocknendes Flussdelta

In feuchten Jahren enthält die winterliche Schneedecke der Sierra Nevada mehr Wasser, als die Talsperren in Kalifornien fassen können. Im Frühjahr und Sommer setzt sie es beim Tauen allmählich frei, so dass es die Westhänge des Gebirges hinabrinnt und schließlich zu meiner nächsten Station auf der Suche nach dem fehlenden Wasser Kaliforniens gelangt: dem 2845 Quadratkilometer großen Sacramento-San Joaquin River Delta. Östlich der Bucht von San Francisco gelegen, ist es eine prägende Struktur des dicht besiedelten Staats. Vor Ankunft der ersten Kolonisten erstreckte sich hier eine Süßwassermarsch mit Wasserläufen, Tümpeln und Inseln.

Heute wird das Binnendelta vorwiegend landwirtschaftlich genutzt und beherbergt mehr als eine halbe Million Menschen in Städten wie Antioch oder Rio Vista. Große Teile sind allerdings unerschlossenes Überschwemmungsland geblieben. In diese unheimliche, urwaldartige, topfebene Wildnis, durchzogen von einem Gewirr aus insgesamt über 1100 Kilometer langen Wasserwegen, verirrt sich kaum je ein Mensch. Hier laufen die Flüsse zusammen, welche die weiten Täler des Sacramento und des San Joaquin entwässern. Dabei bilden sie das größte Ästuar (trichterförmig aufgefächerte Flussmündung) an der Westküste der USA.

Doch dieses weitgehend unberührte Stück Natur dient zugleich als großes Verteilungszentrum für das bewirtschaftete Oberflächenwasser Kaliforniens. Wasser, das aus den Talsperren im Norden zu Farmen und Haushalten im Süden geleitet wird, muss hier hindurchfließen. Nach stundenlanger Fahrt kreuz und quer über schmutzige Straßen und Dämme erreichte ich schließlich Clifton Court Forebay, einen kleinen Zipfel im Delta, in dem sich die Pumpenhäuser aneinanderreihen, die Wasser durch die betonverkleideten Kanäle, Tunnel und Pipelines des Kalifornien-Aquädukts zum 550 Kilometer entfernten Los Angeles und durch den Delta-Mendota-Kanal zu den riesigen Farmen des Central Valley drücken.

So intensiv, wie das Oberflächenwasser in Kalifornien bewirtschaftet wird, gleicht es eher einem industriellen Produkt als einer natürlichen Ressource. Ein Netzwerk von staats- und bundeseigenen Talsperren, ein kompliziertes System von Kanälen und Aquädukten und ein Wirrwarr von Wassergeset-

zen, Wasserrechten, Umweltvorschriften, gerichtlichen Anordnungen und Rechtsgutachten sorgen für eine Verteilung des Oberflächenwassers, mit der garantiert jeder unzufrieden ist. Etwa die Hälfte verbleibt in den Strömen und Flüssen sowie im Delta, um Feuchtgebiete und Lebensräume von Fischen zu bewahren, die Artenschutzbestimmungen zu erfüllen und salziges Meerwasser davon abzuhalten, in das Ästuar einzudringen und die Kanäle und Aquädukte zu überfluten.

Die andere Hälfte ist für den menschlichen Bedarf vorgesehen: 20 Prozent für die Kommunen – die im April 2015 vom kalifornischen Gouverneur Jerry Brown angewiesen wurden, den Verbrauch um durchschnittlich ein Viertel zu senken – und 80 Prozent für die Landwirte. Soweit die Theorie. In den Jahren 2014 und 2015 war das Oberflächenwasser jedoch dermaßen knapp, dass die meisten Landwirte gar keines erhielten.

In dieser Situation sind sie mehr oder weniger gezwungen, auf Grundwasser auszuweichen. Kalifornien ist der einzige US-Bundesstaat, in dem jeder beliebig viel davon fördern darf, solange er es nicht verschwendet oder verkauft. Die aktuelle Dürre hat eine Art Wettrüsten im Central Valley ausgelöst: Jeder Farmer versucht tiefer als der Nachbar zu bohren, »wie ein Haufen Vierjähriger mit einem Milchshake und vielen Strohhalmen«, so ein Agrarwissenschaftler. Niemand kennt die Fördermengen, doch der Grundwasserspiegel ist überall niedriger denn je. Und wer tiefer bohrt als die anderen, senkt ihn weiter ab – ohne Rücksicht darauf, dass die Brunnen der Nachbarn dadurch austrocknen.

Bis 500 Meter hinab dringen einige inzwischen vor, um Wasser zu erreichen, das vor 10 000 Jahren herabgeregnet ist. Dessen Qualität hat durch den langen Kontakt mit dem geologischen Untergrund jedoch gelitten. So enthält es oft Arsen, Chrom, Salz und andere Verunreinigungen. Auch ist Bohren bis in solche Tiefen teuer: Die Kosten liegen bei etwa einer halben Million Dollar. Hinzu kommen hohe Summen für das Heraufholen des Wassers von so weit unten. Dennoch ist die Nachfrage groß, und es gibt Wartezeiten von etwa einem Jahr, da nur wenige Firmen technisch in der Lage sind, derartige Bohrungen vorzunehmen.

Nicht nur Landwirte leiden unter der Trockenheit. Yolanda Serrato aus Porterville, einer vergleichsweise armen Landarbeiterstadt im Bezirk Tulare County, bewässerte im Dezember 2014 ihre kleine Rasenfläche, als der Schlauch ruckelte und das Wasser versiegte – endgültig. Gleichzeitig fielen auch die Brunnen bei etwa 400 Nachbarn trocken. All diese Menschen sind seither auf einen Mix aus öffentlicher Unterstützung und privater Wohlfahrt angewiesen. Als ich Serrato traf, lehnte sie an ihrem Maschendrahtzaun und hielt Ausschau nach dem Kleintransporter, der ihr hoffentlich einige Flaschen Wasser bringen würde. Unwillkürlich drängte sich mir die Vorstellung auf, die Kalifornier könnten eines Tages gezwungen sein, ihr Land wegen Wassermangel zu verlassen.

Wasser fließt stets zum Geld, lautet ein hier geläufiges Sprichwort. Bis die Bewohner der reichen Küstenstädte vor leeren Wasserhähnen stehen, dürfte deshalb noch einige Zeit

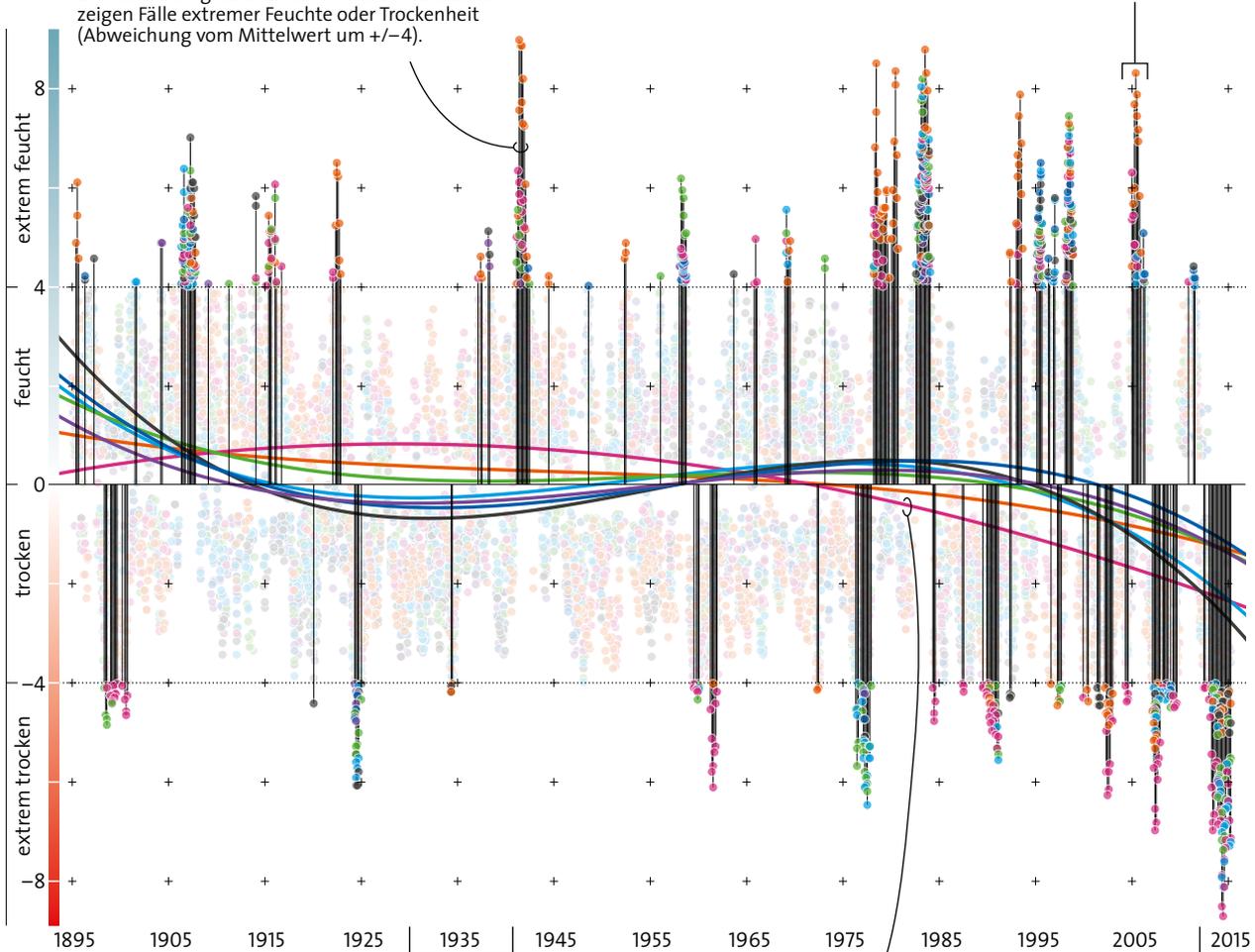
Der lange Weg in die Dürre

Die Entwicklung des Klimas in Kalifornien lässt sich aus dem Palmer-Dürre-Index ablesen, einem Maß für die Bodenfeuchte, in das Wasserstände in Talsperren, die Höhe des Grundwasserspiegels und andere sich nur langsam verändernde Indikatoren eingehen. Wie sich den Daten entnehmen lässt, sind seit den 1970er Jahren vermehrt Extremperioden mit ungewöhnlicher Feuchte oder Trockenheit aufgetreten. Insgesamt bestand in allen Regionen Kaliforniens jedoch eine Tendenz zur Dürre.

Nässeperioden

Obwohl die Trockenphasen in der jüngeren Vergangenheit von ungewöhnlich regenreichen Jahren unterbrochen wurden, überwog auf Dauer der Wassermangel. Ein ähnliches Muster trat vor Jahrhunderten auf: Auch die jahrzehntelangen extremen Dürreperioden des Mittelalters, die sich im kalifornischen Baumringkalender abzeichnen, schlossen gelegentliche regenreiche Jahre ein.

Die vertikalen grauen Linien in diesem Schaubild zeigen Fälle extremer Feuchte oder Trockenheit (Abweichung vom Mittelwert um +/-4).



Palmer-Dürre-Index

Jeder Punkt im Schaubild repräsentiert einen Monatswert des Palmer-Dürre-Index für jede der sieben großen Wassereinzugsregionen. Punkte innerhalb des normalen Bereichs (+4 bis -4) erscheinen nur blass im Hintergrund.

- North Coast drainage
- Sacramento drainage
- Northeast interior basins
- Central Coast drainage
- San Joaquin drainage
- South Coast drainage
- Southeast Desert basins



Jahre des Dust Bowl

Kalifornien blieb weitgehend verschont vom »Dust Bowl«, der katastrophalen Dürreperiode in Nordamerika während der 1930er Jahre. Farmer von den stark betroffenen Großen Ebenen (Great Plains) strömten deshalb auf der Suche nach Arbeit dorthin.

Langzeittrend

Die durchgezogenen Linien sind Ausgleichskurven, die den langfristigen Trend hinter den kurzzeitigen Schwankungen der Bedingungen in den sieben großen kalifornischen Wassereinzugsregionen wiedergeben. Sie verlaufen teils in weit ausholenden Wellen, bewegen sich seit dem Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1895 jedoch generell abwärts. Alle Regionen Kaliforniens sind seither also tendenziell trockener geworden.

Verbreitete, anhaltende Trockenheit

Ungewöhnlich und fatal an der aktuellen Dürre ist, dass sie all die unterschiedlichen Regionen in dem großen, geografisch vielseitigen US-Bundesstaat auf einmal mit voller Wucht erfasst.

vergehen. San Francisco bezieht sein Wasser hauptsächlich aus dem Hetch-Hetchy-Stausee, der 270 Kilometer entfernt im Yosemite-Nationalpark liegt. Los Angeles zapfte schon in den 1920er Jahren den rund 320 Kilometer entfernten Owens Lake an, so dass er austrocknete – wie jeder weiß, der den Film Chinatown gesehen hat. Heute wird die Stadt von noch weiter nördlich gelegenen Talsperren versorgt. Solange Kalifornien auch nur über einen einzigen Tropfen Wasser verfügt, kommt er mit Sicherheit den reichen Küstenbewohnern zugute.

Im Central Valley dagegen ist die Situation schon jetzt kritisch. Aus geologischer Sicht handelt es sich um einen gut 50 000 Quadratkilometer großen Trog, in dem Sedimente aus Ton, Kies, Lehm und Sand zwischen Bergketten aus festem Gestein eingekleimt sind. In Kies- und Sandschichten bewegt sich das Wasser mit Leichtigkeit seitwärts. Gespeichert wird es jedoch in erster Linie in Tonlagen, die es nur langsam in den Kies und Sand abgeben. Das macht den aktuellen Pumprausch so heikel.

Bodensenkung durch übermäßiges Abpumpen von Grundwasser

Katastrophen befördern zuvor unbekannte Wissenschaftler manchmal über Nacht ins Rampenlicht. Michelle Sneed, eine junge Angestellte beim Geologischen Dienst, beschäftigte sich jahrelang in ihrem stillen Kämmerlein mit einem wenig aufregenden Thema: der möglichen Absenkung des Untergrunds. Plötzlich aber hängt davon die Zukunft des Staats Kalifornien ab. Mit offenem Blick aus blau blitzenden Augen und langem, gewelltem Haar schien sie ihren Auftritt als wissenschaftlicher Rockstar zu genießen, als wir uns in ihrem Büro in Sacramento am Nordostrand des Deltas gegenüber-saßen. Geschickt drehte sie die Handflächen nach oben und verschränkte ihre Finger, während sie erklärte, dass Ton aus winzigen, regellos zueinander angeordneten Plättchen besteht. »Stellen Sie sich vor, wie viel Wasser in das Spülbecken Ihrer Küche passt, wenn die Teller darin kreuz und quer durcheinanderliegen«, sagte sie. Dann drehte sie ihre Hände um und drückte die Handflächen gegeneinander. »Jetzt malen Sie sich aus, wie viel Platz zwischen den Tellern bleibt, wenn diese ordentlich gestapelt sind.« Im Wesentlichen passiert genau das, wenn zu viel Wasser zu schnell aus dem Untergrund gefördert wird: Die mikroskopisch kleinen Plätt-

chen im Ton lagern sich zu Stapeln übereinander, so dass die Tonschicht in sich zusammenfällt.

Auch der Boden Hunderte von Metern darüber sackt dadurch ein. Riesige Gebiete des Central Valley haben sich seit den 1920er Jahren um insgesamt fast zehn Meter abgesenkt. Innerhalb von zwei Jahren – zwischen 2008 und 2010 – ist mehr als ein Zehntel der Region um fünf Zentimeter abgesunken. Straßen- und Bahnarbeiter hatten reichlich damit zu tun, rissige Fahrbahnen und Brücken zu reparieren und Schienen wieder zu nivellieren. Zudem war die Wasserversorgung im Staat beeinträchtigt. In Kanälen und Aquädukten mit leichtem Gefälle kann Wasser hunderte Kilometer weit strömen. Schon eine leichte Absenkung unterbricht diesen Fluss jedoch. Genau das geschah 2014 unter anderem an der Einmündung eines großen Kanals in das San Luis Reservoir in Zentralkalifornien. Doch die Unterbrechungen der Wasserversorgung sind nicht das Schlimmste. Schwerer wiegt, dass einmal zusammengefallene unterirdische Tonablagerungen nie wieder Wasser aufnehmen können. So erschöpfen die pumpfreudigen Farmer in Kalifornien nicht nur den Wasserspeicher, von dem sie abhängig sind, sondern zerstören ihn auch für immer.

Die einzige Hoffnung besteht darin, den verbliebenen Rest des – fachsprachlich Aquifer genannten – Grundwasserleiters so schnell wie möglich wieder aufzufüllen. Leider geht das nicht überall. Unter etwa der Hälfte des Central Valley liegt Corcoran-Ton, der von Ablagerungen in einem früheren See stammt. Weil er im Unterschied zu den meisten anderen Tonen wasserundurchlässig ist, verhindert er, dass Feuchtigkeit bis zu tiefer gelegenen Aquiferen gelangt, die bei Brunnenbohrungen angezapft wurden. Geologen kennen zwar Gebiete ohne Corcoran-Ton, deren Untergrund durchlässig ist und sich somit geologisch zur Flutung eignet, um die Grundwasserleiter aufzufüllen. Allerdings stehen auf einigen Trabantenstädte, Einkaufszentren oder Farmen. Permeablen Untergrund aufzuspüren und die Flutungserlaubnis einzuholen, ist ein mühseliges Geschäft.

In Abstimmung mit dem Almond Board of California (Gemeinschaft kalifornischer Mandelanbauer) prüfen Wissenschaftler von der University of California in Davis derzeit in einem Feldversuch, ob Mandelpflanzungen, die auf geologisch geeignetem Untergrund stehen, zum Auffüllen des Grundwasserleiters geflutet werden können, während die Bäume Winterruhe halten. Das wirft außer geologischen auch juristische Fragen auf. Nach kalifornischem Recht dürfen Farmer vom Staat zugeteiltes Wasser nur zu »nützlichen Zwecken« verwenden. Das Auffüllen des Grundwassers könnte demnach als »übermäßige Bewässerung« unter-sagt sein.

Zudem stellt sich die Frage, ob ein Farmer, der Wasser auf diese Weise bunkert, später ein Anrecht auf den Bezug einer gleichen Menge hat. Nicht zuletzt bedarf es außer der Genehmigung und der juristischen Klärung einer nicht ganz unwichtigen Zutat: Wasser. Das reicht in letzter Zeit nicht einmal zur Versorgung der vorhandenen Pflanzen, geschweige

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/wetter



denn zur Vorsorge für künftige Kulturen. Jedes große Wasseranreicherungsprogramm, so dringend es nötig wäre, muss deshalb auf das nächste feuchte Jahr warten.

Die momentane Krise war schwer wiegend genug, um Gouverneur Jerry Brown und die Legislative zur Änderung der 150 Jahre alten Wassergesetze Kaliforniens zu bewegen, was einen kleinen Schritt hin zur Regulierung des Grundwassers darstellt. Ein im November 2014 verabschiedetes Gesetz verpflichtet die örtlichen Wasseragenturen in jedem der 515 Grundwassereinzugsgebiete des Staats, innerhalb von fünf Jahren Pläne für eine nachhaltige Nutzung zu entwickeln und sie bis in 30 Jahren umzusetzen.

Das kommt einer kleinen Revolution gleich. Die städtischen Wasserwerke, von Landwirten geführten Bewässerungsverbände, Wasserämter der Countys und anderen Organe der Wasserwirtschaft – die alle in ihren eigenen Welten leben, mit ihren geschützten Daten und konkurrierenden Interessen – werden sich zu Grundwasser-Nachhaltigkeitsagenturen (groundwater sustainability agencies, GSAs) zusammenschließen müssen, um ihre wertvollste Ressource zu teilen. In einem provisorischen Bürogebäude mitten im Tal des San Joaquin, das als Sitz des Wasserverbands City of Tulare dient, traf ich einen jungen Mann namens Benjamin Siegel, der die undankbare Aufgabe übernommen hat, eine GSA zusammen mit der Stadt Visalia und einem örtlichen Bewässerungsverband auf die Beine zu stellen. »Es kommt mir vor, wie eine neue Sprache zu erfinden«, sagte er.

Knapp 25 Kilometer entfernt befragte ich die Wasserbeauftragte des Countys, Denise Atkins. Sie meinte, allein sich darüber zu einigen, wer bei der örtlichen GSA ein Mitspracherecht erhält, sei schier unmöglich, gar nicht zu reden davon, die Leute zum Austausch ihrer Daten zu bringen. »Vor fünf Jahren hätten Sie besser eine kugelsichere Weste getragen, wenn Sie einen Landwirt fragen wollten, was er von einer Messuhr an seinem Brunnen hielt«, erzählte sie. »Doch inzwischen wollen die Farmer selbst wissen, wie viel Wasser sie verbrauchen.« Sie lehnte sich über ihren von Papierkram überquellenden Schreibtisch, verdrehte die Augen und fügte in gedämpftem Ton hinzu: »Obwohl es für gewöhnlich heißt, der Nachbar würde zu viel abpumpen.«

Folge der globalen Erwärmung?

Die brisante Frage lautet, ob der vom Menschen verursachte Klimawandel die Dürre verursacht. Die Meinungen dazu gehen auseinander. Die Nationale Ozean- und Atmosphärenverwaltung NOAA antwortete 2014 mit »Nein«, der Weltklimarat IPCC wollte sich nicht festlegen, und eine Forschergruppe der Stanford University – darunter auch Swain, der Namensgeber von Triple R – sagt klipp und klar »Ja«. Das Stanford-Team modellierte das Klima heute und in vorindustrieller Zeit. Der Vergleich ergab, dass die mit Triple R einhergehenden Bedingungen inzwischen dreimal so wahrscheinlich sind wie damals. Ob der Klimawandel nun die Dürre hervorruft oder nicht – in einem Punkt scheinen sich alle jedenfalls einig zu sein: dass die größere Hitze die Folgen



Einwohner von Porterville, deren aus Brunnen gespeiste Wasserleitungen versiegt sind, füllen vor dem Feuerwehrdepot des Doyle County Fässer mit nicht trinkbarem Wasser für Haushaltszwecke.

der Trockenheit verschlimmert, in den Wäldern der Sierra Nevada ebenso wie auf den Farmen des Central Valley.

Nach Jahren mit einer Wetterlage, die an La Niña erinnerte, verkündete die NOAA im März 2015 den Beginn eines schwachen El-Niño-Ereignisses, welches das Wetter in Kalifornien in absehbarer Zeit aber wohl nicht beeinflussen würde. Inzwischen deutet alles darauf hin, dass es viel stärker ausfallen dürfte als seinerzeit erwartet, ja vielleicht sogar einen neuen Rekord aufstellen wird. Kalifornien kann also im nächsten Winter mit reichlich Niederschlag rechnen. Der Boden von den Gipfeln der Sierra Nevada bis hin zum Central Valley ist allerdings derart ausgetrocknet, dass es Jahre dauern wird, ihn ordentlich zu durchfeuchten, und noch viel länger, das Grundwasser zu regenerieren. Der Staat kann die gegenwärtigen Bedingungen als seltene Anomalie ansehen – als unvorhersehbare Katastrophe, die es durchzustehen gilt. Laut Noah Diffenbaugh vom Woods-Umweltinstitut der Stanford University wäre dies jedoch eine verhängnisvolle Fehleinschätzung. »Es ist ganz klar, dass Kalifornien jetzt ein anderes Klima hat«, beteuert er. Sollte dieses andere Klima gehäuft jahrzehntelange Dürren mit sich bringen, werden die Bergwälder absterben, da es dort keine künstliche Bewässerung gibt. Die nächsten Opfer würden die Farmen und Plantagen des Central Valley sein, einst ein Aushängeschild Kaliforniens.

Manche sagen vielleicht: na und? Der Ackerbau hat nur einen Anteil von etwa zwei Prozent an Kaliforniens Wirtschaft. Der Staat könnte leicht von Warenfabrikation, Gesundheitsdienstleistungen sowie Finanz- und Bildungswesen leben, die seine Wirtschaft bisher schon zur siebtgrößten der Welt gemacht haben. Realistischerweise scheint es jedoch kaum vorstellbar, dass die Kalifornier einen Wirtschaftszweig einfach so aufgeben, der ihr ganzer Stolz ist. Mehr als 30 Prozent der Agrarfläche des Central Valley sind mit Weinreben und Baumkulturen bedeckt, die Mandeln, Walnüsse, Pistazien und Zitrusfrüchte liefern. Sie repräsentieren enorme Investitionen, die sich manchmal erst sieben Jahre nach der Pflanz-

zung rechnen. Die Farmer setzen deshalb zunehmend auf eine dynamische Hightechindustrie mit GPS-gesteuerten Bewässerungsfahrzeugen, wetterabhängigen automatischen Bewässerungssystemen, Bodenfeuchtesensoren und weiterer Agrarelektronik, um den Wasserverbrauch zu drosseln. Eine noch radikalere Maßnahme ergriff der Staat im Juni, als er Angehörigen des kalifornischen »Landwirtschaftsadels« ihre als unantastbar geltenden Wassernutzungsrechte in den Tälern der Flüsse Sacramento und San Joaquin beschnitt, die noch aus den Zeiten des Goldrauschs im 19. Jahrhundert stammen. Bei einer Reise durch Kalifornien gewinnt man den Eindruck, dass die Not den Erfindungsreichtum beflügelt.

Anpassung an die Dürre als neuen Normalzustand

Die Dürre verwandelt Kalifornien in fast allen Bereichen – meteorologisch, geologisch, biologisch, landwirtschaftlich, sozial, ökonomisch und politisch. Die momentane Kombination aus Trockenheit und Hitze ist künftig höchstwahrscheinlich der Normalzustand. Selbst wenn von Zeit zu Zeit feuchte Jahre auftreten, sorgt das unaufhaltsam wärmer werdende Klima dafür, dass der Niederschlag keine mächtige Schneedecke mehr bildet, die das Wasser nur allmählich abgibt. Vielmehr kommt er dann in Form von heftigen Regenfällen herunter. Aus diesem Grund stimmten die Kalifornier im November 2014 für Proposition 1, ein gewaltiges öffentliches Arbeitsprogramm, das mehr als sieben Milliarden Dollar für die Wasserinfrastruktur vorsieht. Fast die Hälfte davon geht in den Bau neuer Dämme und Staubecken. Und so hat die Dürre in Kalifornien auch eine positive Seite: Was dem einen schadet, ist des anderen Chance.

Es gibt weitere Maßnahmen, die aus der Not geboren, aber zugleich von ökonomischem Nutzen sind. Dazu zählt ein Vorhaben des Pionierkorps der Armee, welches das Betonbett aus einem etwa 18 Kilometer langen Abschnitt des Los Angeles River entfernen will. Derzeit handelt es sich um einen hässlichen Regenkanal, durch den fast 800 Millionen Liter Wasser pro Tag ins Meer fließen. Zumindest ein Teil davon könnte nach Entfernen des Betonbetts dazu dienen, die Grundwasservorräte aufzufüllen. Außerdem würde das Projekt mehr als eine Milliarde Dollar in die Kassen der örtlichen Wirtschaft spülen.

Durch Meerwasserentsalzung ließen sich die Küstenregionen mit fast unbegrenzten Wassermengen versorgen. Allerdings ist sie immens teuer und weist wegen des hohen Energieverbrauchs eine sehr ungünstige Kohlendioxidbilanz auf. Zudem entsteht eine hoch konzentrierte Salzlauge, die sich nur schwer sicher entsorgen lässt. Das wahre Potenzial für das Dürre-Management liegt also im Einsparen und Recycling des Wassers. Würden die Möglichkeiten dazu voll ausgenutzt, kämen die Privathaushalte in Kalifornien nach Schätzungen des Pacific Institute, einer Umwelt-Denkfabrik in Oakland, mit rund 3,7 Milliarden Kubikmeter weniger von dem kostbaren Nass aus, was fast einem Drittel des gesamten kommunalen Wasserverbrauchs entspricht.

Proposition 1 schließt 725 Millionen Dollar für das Recycling von Wasser ein. Das ist das Siebenfache dessen, was der

Staat jemals dafür aufgewendet hat, aber nur etwa ein Fünftel der Summe, welche die WaterReuse Association, der Wirtschaftsverband der Wasseraufbereitungsindustrie, für nötig hält, um das Recyclingpotenzial Kaliforniens auszuschöpfen. Allerdings soll das vom Staat bereitgestellte Geld weitere finanzielle Mittel von Kommunen, Countys und aus privaten Quellen für Wasseraufbereitungsprojekte lockermachen. Die Nachrüstung von Stadtparks, Golfplätzen, Fabriken, Bürogebäuden und sogar Privathäusern mit den hellvioletten Leitungen für Wasser, das zwar nicht zum Trinken, aber für die Bewässerung von Gärten, Parks und Golfplätzen, für Toilettenspülungen und andere Zwecke geeignet ist, dürfte sich bald zu einem viele Millionen Dollar schweren Wirtschaftssektor entwickeln.

In Orange County hat der Wandel schon begonnen. Dort wird seit 2008 mehr als ein Drittel des Abwassers zu Trinkwasser aufbereitet und in einen künstlichen See geleitet, wo es im Boden versickert und den Aquifer speist, den die Versorgungsbetriebe anzapfen. Weitere 17 Prozent werden genug gereinigt, um industriell, zur Bewässerung von Gärten, Parks und Golfplätzen oder in Haushalten – etwa für die Toilettenspülung – einsetzbar zu sein. Die Infrastruktur war teuer, doch für das behandelte Wasser bezahlt das County kaum mehr als die Hälfte dessen, was die Heranführung von dem sich rasch erschöpfenden Colorado River kosten würde. Im November 2014 stimmte der Stadtrat von San Diego dafür, fast drei Millionen Dollar für Einrichtungen auszugeben, mit denen die Stadt genug Wasser für ein Drittel ihrer Bewohner aufarbeiten kann. Laut WaterReuse könnte Abwasserrecycling den Bedarf von acht Millionen Menschen und damit einem Fünftel aller Einwohner Kaliforniens decken. Obendrein würde es unzählige Arbeitsplätze schaffen.

Die neue Normalität mag ein wenig beängstigend wirken, aber so ist das im »Golden State« Kalifornien. Probleme, ja. Doch aus den Lösungen lässt sich Gold machen. ~

DER AUTOR



Dan Baum ist freier Autor. Früher war er Korrespondent des Magazins »The New Yorker«.

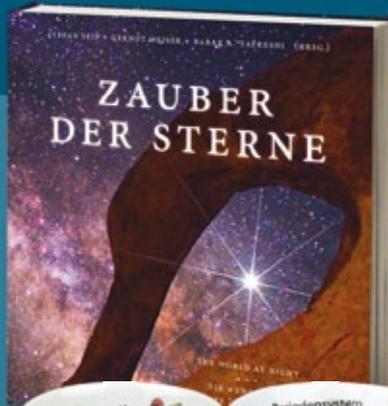
QUELLEN

- Cook, B. I. et al.:** Unprecedented 21st Century Drought Risk in the American Southwest and Central Plains. In: *Science Advances* 1, e1400082, 2015
- Herring, S. C. et al. (Hg.):** Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 95, S. S1–S104, 2014
- Mann, M. E., Gleick, P. H.:** Climate Change and California Drought in the 21st Century. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112, S. 3858–3859, 2015

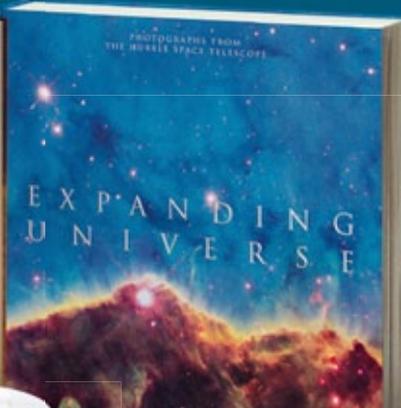
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368115

Über 1.000 Geschenkideen für kluge Köpfe:

9-3591-9



9-4232-3



9-3630-6



9-3169-7



9-3788-6



9-3788-8



9-4776-7 Eisenbahn-Zollstock



9-4382-0 Erfinder-Zollstock



9-3589-1



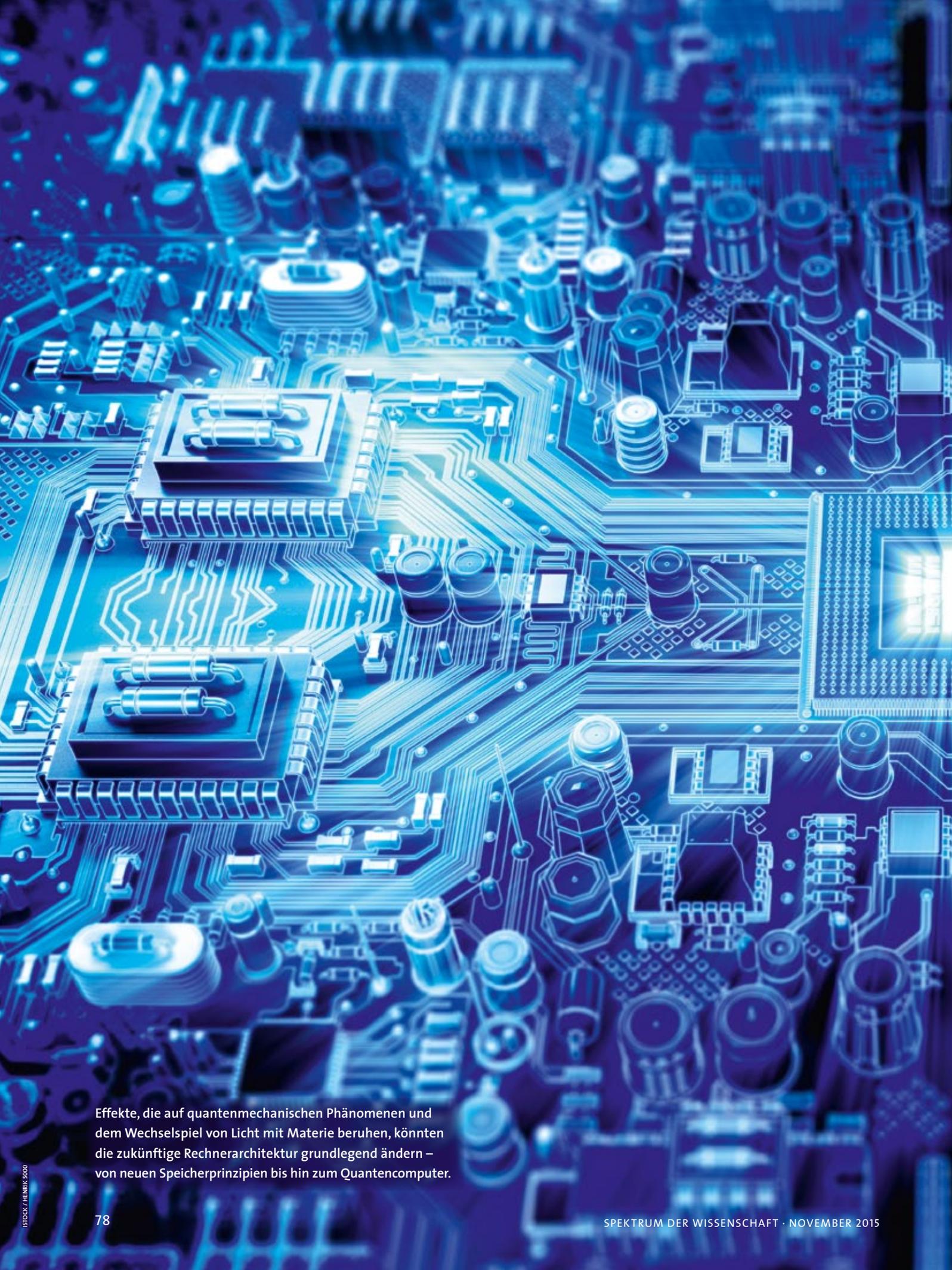
9-3169-8

€ 5,- Gutschein

Gutscheincode: BUUAP
www.Science-Shop.de

Der Gutschein über 5 Euro ist bis zum **31.12.2015** gültig. Einfach im Bestellprozess im Feld „Gutscheinnummer“ den Code **BUUAP** eingeben. Bitte haben Sie verständnis, dass bei einer Bestellung von ausschließlich preisgebundenen Büchern der Gutschein nicht einlösbar ist. Science-Shop by Mail:Order:Kaiser • Postfach 80791 München • Telefon 0180-5 34 17 34* (0,14 €/Min. aus dem Festnetz, Mobilfunk max. 0,42 €/Min.)





Effekte, die auf quantenmechanischen Phänomenen und dem Wechselspiel von Licht mit Materie beruhen, könnten die zukünftige Rechnerarchitektur grundlegend ändern – von neuen Speicherprinzipien bis hin zum Quantencomputer.

TECHNIK

Quantenoptik auf dem Sprung

Wenn Physiker die Wechselwirkungen von Licht und Materie enträtseln, entstehen oft konkrete praktische Anwendungen. Doch diese aus den Laboren in die Industrie zu bringen, ist eine große Herausforderung.

Von Jürgen Stuhler

Wie immens Anwendungen aus der Quantenoptik die Gesellschaft verändern können, zeigt der erstmals 1960 konstruierte Laser. Sein Funktionsprinzip beruht auf den quantenmechanischen Besonderheiten von Wellen und Teilchen (siehe Kasten »Seltsame Quantenwelt«, rechts). Der weltweite Jahresumsatz mit Lasern liegt bei etwa zehn Milliarden US-Dollar – und das bereits, ohne den Mehrwert durch ihren Einbau in weitere Geräte zu berücksichtigen. Fast alle Industriezweige nutzen sie, von der Materialbearbeitung bis zur Medizin. Auch viele von uns verwenden sie täglich – etwa in optischen Laufwerken und Laserdruckern. Das zeigt, wie enorm sich die Entdeckung und erste Umsetzung eines physikalischen Phänomens Jahrzehnte später auswirken kann.

Zudem produziert die Grundlagenforschung in der Quantenoptik und Photonik immer wieder bemerkenswerte neue Ergebnisse. In Deutschland ist der entsprechende Fachverband sogar einer der größten in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, und seine Mitglieder gehören in diesem Bereich zur Weltspitze. Doch welche der grundlegenden Entwicklungen, die über die bislang technisch genutzten quantenmechanischen Prinzipien hinausführen, haben genug Potenzial für die nächsten kommerziellen Erfolgsgeschichten?

Bei der Kommunikationstechnologie etwa wären die Grundlagen für eine mögliche optische Infrastruktur schon gelegt, denn die Anbieter nutzen Licht in Glasfasernetzen, um schnell viele Daten zu übertragen. Neben dem Bedarf nach immer mehr Bandbreite gerät zunehmend ein weiterer Aspekt der Übertragung in das öffentliche Interesse: die Sicherheit. Nachrichten über abgehörte Personen oder gehackte Firmen sind inzwischen alltäglich. Das Thema ist aber nicht neu. Schon seit Jahrtausenden versuchen Menschen die Nachrichten, die sie übermitteln, vor anderen geheim zu halten. Und ebenso alt ist die Kunst des Entschlüsselns. Die Quantentechnologie bietet hier allerdings einen grundlegenden Vorteil: Wenn man verschränkte Teilchen bei der Übertragung verwendet – ein Phänomen, das es nur bei Quantenobjekten gibt –, kann man absolut sicher sein, nicht heimlich abgehört

AUF EINEN BLICK

AUS DEM LABOR IN DIE WIRTSCHAFT

- 1** Quantenoptiker untersuchen die vielfältige und oft unerwartete Weise, auf die **Licht** mit **Materie** wechselwirkt.
- 2** In den letzten Jahren machen die Forscher immer schneller Fortschritte, und **neue Effekte** führen häufig auch zu viel versprechenden **Anwendungsmöglichkeiten**.
- 3** Doch nicht jeder potenziell bahnbrechenden Entdeckung gelingt der Weg in die Industrie. Oft sind sogar spezielle **Förderprogramme** nötig, um Forschungsergebnisse überhaupt in kommerzielle Produkte zu überführen.

zu werden. Damit beschäftigt sich die so genannte »quantum key distribution«, also quantenbasierte Schlüsselverteilung. Besteht der Code zusätzlich aus rein zufälligen Zeichen, die sich ebenfalls mit Hilfe von Quantenphänomenen herstellen lassen, ist es im Gegensatz zu allen klassischen Kryptografie-techniken nicht nur schwierig, die Schlüsselübertragung unbemerkt abzuhören oder den Code in hinreichend kurzer Zeit zu knacken – es geht physikalisch grundsätzlich nicht. Und der Bedarf an solchen Technologien, die direkt aus der quantenoptischen Forschung kommen, ist groß.

Generatoren für echte, quantenbasierte Zufallszahlen werden immer besser und sind längst kommerziell verfügbar. Es gab zudem bereits erfolgreiche Praxistests der Quantenverschlüsselungen – so haben Banken damit schon sichere Überweisungen getätigt –, und erste darauf basierende Systeme sind auf dem Markt, etwa von einem Spin-off der Universität Genf. Derartige Verbindungen sind mit normalen Glasfaserkabeln auf Entfernungen von mehr als 100 Kilometern möglich, unter Laborbedingungen erreichen die Entwickler sogar schon über 300 Kilometer. Diese Distanzen entsprechen typischen Abständen von Verbindungsstellen in unseren bestehenden Glasfasernetzen – flächendeckende Quantenkryptografie wäre technisch umsetzbar. China begann 2014 mit dem Bau einer 2000 Kilometer langen, sicheren Netzwerkverbindung zwischen Peking und Schanghai, um das praktisch zu überprüfen. Wer entsprechend große wirtschaftliche oder politische Bedürfnisse hat, kann sich diese Sicherheit also bereits heute erkaufen – dem frühen Entwicklungsstadium entsprechend noch sehr teuer.

Ein weiteres Feld, in dem sowohl staatliche als auch private Institutionen enorm von der Quantentechnologie profitieren könnten, sind Berechnungen und Simulationen. Auch hier locken fundamental neue Konzepte. Denn quantenmechanische Zustände können sich überlagern, anders als ein klassisches Bit. Die elementare Einheit jedes herkömmlichen Computers kann nur zwei mögliche Zustände annehmen, meist null und eins genannt. Dazwischen gibt es nichts. Wendet man eine Rechenoperation auf dieses Bit an, wirkt sie auf eine einzige Zahl und ergibt auch wieder nur einen Wert. Nimmt man dagegen ein Quantenbit (Qubit) aus zwei Zuständen,

OPTIK



etwa denen eines Atoms, so kann es auch in einer Überlagerung vorliegen. Wenn man es geschickt anstellt, dann wirkt eine Rechenoperation auf sehr viele Zahlen gleichzeitig. So wird massiv paralleles Rechnen möglich. Quantencomputer können daher zumindest theoretisch bestimmte Aufgaben viel schneller bewältigen. Eine der berühmtesten ist die, bei einer sehr großen Zahl herauszufinden, aus welchen Primzahlen sie besteht. Mit dieser Zerlegung lassen sich wiederum die verbreitetsten Kryptografiemethoden entschlüsseln.

Als Bausteine für die Qubits sowie zu ihrem Auslesen und Manipulieren erproben Physiker verschiedene Konzepte und Kombinationen, von quantenoptischen Effekten über Mikrowellen bis hin zur Supraleitung. Obwohl viele Experimente erfolgreich waren und es zahlreiche Ansätze für die einzelnen Komponenten gibt, existiert aber wohl noch kein echter Quantencomputer, der diese Teile zu komplexen Schaltkreisen verbindet. Zwar kann man bereits einen Rechner kommerziell erwerben, dessen Hersteller ihm dieses Prädikat geben, allerdings ist seine wirkliche Leistungsfähigkeit umstritten. Daher forschen viele Länder sehr intensiv. Besonders für Geheimdienste wäre so ein leistungsfähiger Primzahlzerleger unschätzbar wertvoll, da sie mit ihm herkömmlich verschlüsselte Daten leicht dekodieren könnten. Auf Grund der demonstrierten technischen Machbarkeit dürften die Investitionen und die Wahl der besten prinzipiellen Rechnerarchitektur darüber entscheiden, wer das Ren-

nen gewinnt. Eine andere Frage ist, ob und wie die Öffentlichkeit dann überhaupt von dem Erfolg erfährt.

Neben dem Konzept der Quantencomputer gibt es noch Quantensimulatoren, die gewissermaßen eine Vorstufe dazu darstellen. Hier geht es nicht um frei programmierbares Rechnen, sondern darum, eine ganz bestimmte Aufgabe zu lösen – etwa ein ausgesuchtes physikalisches Phänomen in handhabbarem Maßstab im Labor untersuchen zu können oder andere, komplexere Systeme zu berechnen (siehe »Simulierte Quantenwelten«, SdW 11/2014, S. 40–47). In vielen Forschungseinrichtungen stehen mittlerweile solche Experimente und bewältigen Simulationsaufgaben, die zu komplex oder zu aufwändig für klassische Computer sind.

Eine Frage der Zeit

Auch durch bessere Zeitmessung verändern quantenoptische Entwicklungen zahlreiche moderne Anwendungen. Beispielsweise ist die satellitengestützte Navigation per GPS auf präzise Taktgeber angewiesen. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt entscheidend davon ab, wie gut die Uhren an Bord der Satelliten sind. Moderne Daten- oder Stromnetzwerke brauchen ebenso genaues Timing, ganz zu schweigen von wissenschaftlichen Präzisionstests.

Um Zeit zu messen, benutzen Physiker die Energiedifferenz zweier Quantenzustände. Dabei setzen sie quantenoptische Methoden ein, um diesen Unterschied auszulesen

Seltsame Quantenwelt

Die Quantenoptik ist der Teilbereich der Quantenphysik, der im weitesten Sinne etwas mit Optik zu tun hat. Ihr liegen verblüffende Phänomene zu Grunde.

Welle-Teilchen-Dualismus und Superposition

Die Rollen von Teilchen und Wellen sind in der Quantenmechanik austauschbar. In der Atomoptik zum Beispiel haben die Atome klassische Welleneigenschaften; sie werden gebeugt oder zur Interferenz gebracht. Häufig wirken dabei Anordnungen von Licht als optische Elemente wie Linsen oder Strahlteiler. Licht und andere elektromagnetische Wellen zeigen je nach Experiment auch teilchenartigen Charakter. Die Energie steckt zudem nicht kontinuierlich in ihnen, sondern kommt portionsweise in »Lichtquanten« daher. Trotz ihres wellenartigen Verhaltens sind die Zustände diskret und nehmen nur ganz bestimmte Energiewerte an – zumindest, wenn man nachmisst. Bis dahin kann sich ein Teilchen, sei es Photon oder Atom, auch in einer »Superposition« mehrerer Zustände gleichzeitig befinden sowie sich mit anderen Teilchen überlagern.

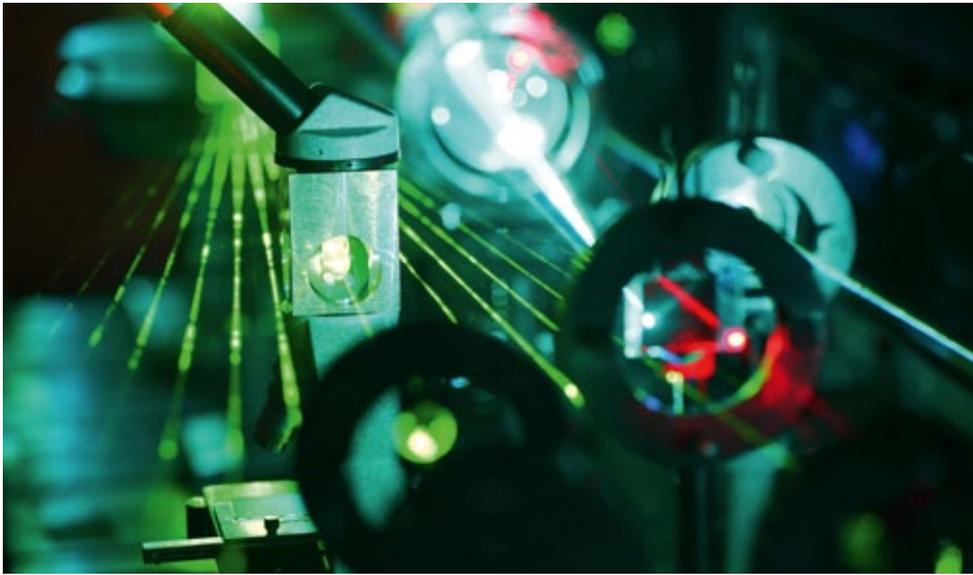
Wahrscheinlichkeiten und Statistik

Viele Gesetzmäßigkeiten der Quantenphysik scheinen zufallsbedingt. Das bedeutet, dass man für einzelne Ereignisse nur

Wahrscheinlichkeiten angeben kann. Zwei Klassen von Teilchen, die »Bosonen« und die »Fermionen«, verhalten sich dabei grundverschieden. Bosonen (etwa Photonen) können denselben Zustand einnehmen, für Fermionen (etwa Elektronen) ist das gar nicht möglich. Phänomene, in denen Bosonen experimentell besonders präpariert werden, sind Grundlage für einige der wichtigsten Anwendungen der Quantenoptik, etwa für Laser.

Verschränkung und »spukhafte Fernwirkung«

Paare (oder auch größere Gruppen) von Teilchen lassen sich so präparieren, dass ihre wechselseitigen Eigenschaften fest miteinander verknüpft sind. Das geht auch dann, wenn die Einzelseigenschaft dem Zufall unterliegt oder sich in einer Superposition verschiedener Eigenschaften befindet. Das Paradebeispiel hierfür sind verschränkte Paare aus zwei Photonen. Die Richtung ihres elektrischen Feldes kann horizontal, vertikal oder in einer beliebigen Überlagerung davon sein. Diese »Polarisation« des einen Photons hängt mit der des anderen fest zusammen. Das gilt sogar dann, wenn die beiden Photonen so weit entfernt sind, dass es selbst mit Lichtgeschwindigkeit nicht gelänge, rechtzeitig Informationen über den Polarisationszustand auszutauschen – was Albert Einstein dazu bewegte, den Effekt als »spukhaft« zu bezeichnen.



Laser sind inzwischen alltäglich – in zahlreichen Bereichen der Gesellschaft und in fast allen Laboren. Die Geräte wurden im Lauf eines halben Jahrhunderts immer kompakter, günstiger und leistungsfähiger, so dass Forscher zunehmend komplexere Experimente mit ihnen durchführen konnten. So entdeckten sie viele quantenoptische Effekte, die ihrerseits demnächst eine neue Generation kommerzieller Anwendungen hervorbringen dürften.

und das System so zu präparieren, dass es nicht durch äußere Einflüsse verfälscht wird. In herkömmlichen Atomuhren misst man die Frequenz der Mikrowellenstrahlung, die einen Übergang zwischen zwei atomaren Zuständen auslöst. Je hochfrequenter die Strahlung ist, desto genauer ist das möglich. Optische Übergänge in Atomen sind etwa 100 000-mal präzisere Taktgeber als Mikrowellen. Daher werden neuerdings optische Atomuhren entwickelt, die mit Laserlicht arbeiten. In Labors erreichen sie schon relative Messgenauigkeiten im Bereich von 10^{-18} , einigen Milliardstel eines Milliardstels. Sie gehen gemessen über das gesamte Alter des Universums weniger als eine Sekunde falsch.

Kommerzielle, auf Mikrowellen basierende Atomuhren (mit Genauigkeiten von etwa 10^{-13}) sind allerdings hinsichtlich technischer Reife und Miniaturisierung wesentlich weiter entwickelt. So gibt es bereits Exemplare auf Chips mit wenigen Zentimeter Größe und einer Masse von kaum 50 Gramm. Ihre optischen Verwandten nehmen dagegen noch ganze Labors in Anspruch. Doch sie werden technisch nun so verfeinert, dass sie sich transportieren lassen. Mit ihnen ausgestattete Sensoren würden für zahlreiche Messszenarien ganz neue Genauigkeiten ermöglichen.

Präzision ist auch beim Aufspüren von extrem fein verteilten Molekülen nötig, die beispielsweise in der Luft nur ei-

nen winzigen Anteil ausmachen, aber eine wichtige Rolle bei chemischen Prozessen spielen. Die Techniken bei der Untersuchung solcher »Spurengase« reichen von der Absorptionsspektroskopie bis zur komplexen Atomfallen-Spuren-gasanalyse (atom trap trace analysis). Hier werden einzelne Isotope bestimmter Atome mit Laserstrahlen und Magnetfeldern gefangen und vermessen. Diese neue Methode dient etwa zur Altersbestimmung von Grundwasser oder dazu, in Luftproben Hinweise auf nukleare Aktivitäten wie Atombombentests zu erhalten. Die wenigen Labore, die diese Technik anbieten, sind stark nachgefragt. Auch hier steht der Einzug in kommerzielle Geräte erst noch bevor.

So genannte Atominterferometer nutzen räumliche Überlagerungen mehrerer Objekte, die wegen der Welleneigenschaften von Teilchen vorkommen. Mit ihnen lassen sich kleinste lokale Änderungen der Schwerkraft feststellen. Jenseits der Grundlagenforschung in Physik und Geologie sind diese Apparate vor allem für Firmen interessant, die nach verborgenen förderbaren Rohstoffen suchen, aber genauso für das Militär, da man mit ihnen navigieren könnte, ohne Signale auszusenden oder zu empfangen. Mehrere Start-up-Firmen vertreiben solche Geräte bereits. Selbst komplette Aufbauten zur Bose-Einstein-Kondensation von Atomen können fertig gekauft werden. Dabei handelt es sich um ein Phänomen, bei dem alle Teilchen in einem einzigen Quantenzustand vorliegen – ein idealer Ausgangspunkt für hochsensible Sensorik.

Auch weitere Ansätze für extrem genaue Messungen kommen aus der Quantenoptikforschung. So könnten Fehler in der Kristallstruktur von Diamanten – so genannte Stickstofffehlstellen – kleinste Detektorgrößen ermöglichen. Dabei werden einzelne dieser Zentren mit Lasern abgetastet. Sie werden immer wieder als mögliche Bauteile für Quantencomputer gehandelt, könnten aber ebenfalls dazu dienen, die magnetischen Eigenschaften einzelner biologischer Zellen zu untersuchen. Allerdings existieren solche Instrumente bislang nur in Laboren. Noch höhere Empfindlichkeit er-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/quantenphysik



reicht man mit Hilfe von Atomen in kleinen Gaszellen. Damit wurden schon magnetische Felder gemessen, die etwa dem zehnmilliardsten Teil des Erdfelds entsprachen. So ließen sich sogar magnetische Veränderungen in Körpergewebe messen, etwa im Hirn oder beim Schlagen des Herzens.

Viele Instrumente aus der Quantenoptikforschung werden inzwischen in ganz anderen Bereichen eingesetzt. Ein Beispiel sind gitterstabilisierte Diodenlaser (external cavity diode lasers, ECDLs). Sie zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Wellenlänge mit einer relativen Genauigkeit von mehr als einem Milliardstel eingestellt und verändert werden kann. Ihre erste Anwendung hatten ECDLs in der Atom- oder Molekülspektroskopie sowie in der Laserkühlung von Atomen und Ionen. Sie wurden rasch kommerziell vertrieben und ermöglichen so zahlreiche weitere Erfolge. Hochpräzise Laser waren nun einfach zu bedienen, zuverlässig und zu moderaten Preisen erhältlich. So konnten Forscher zunehmend komplexere Experimente durchführen, die auf dem Zusammenspiel von immer mehr Lasern beruhen.

Einige Firmen investierten in die technische Weiterentwicklung der ECDL-Systeme. Heute gibt es durch Halbleiternachverstärkte ECDLs, die mehr Leistung bereitstellen. Außerdem sind Diodenlaser erhältlich, die Farbe kontrolliert umwandeln, etwa rotes Laserlicht in blaues. ECDLs werden inzwischen auch bei einer Weiterentwicklung des Radars verwendet, dem Lidar (laser-induced detection and ranging), mit dem Umweltforscher und Geologen die Atmosphäre oder die Erdoberfläche vermessen. Sogar viele medizinische Untersuchungen werden mit ECDLs durchgeführt.

Den Quanten auf die Sprünge helfen

Die Quantenoptik hat – hauptsächlich durch Laser – bereits in vielerlei Hinsicht unsere Gesellschaft und die Wirtschaft beeinflusst. Was bis heute jedoch noch fehlt, ist der industrielle Durchbruch einer weiteren fundamental neuen Anwendung. Quantencomputer, optische Atomuhren, Atominterferometer oder spezielle Magnetometer müssen erst noch den Weg der erfolgreichen Kommerzialisierung beschreiten. Das mag auch an der Zurückhaltung der Industrie liegen. So ist es schwer, die Kluft zwischen großen und komplexen Laboraufbauten an Forschungsinstituten auf der einen Seite und kompakten, automatisierten industriellen Apparaten auf der anderen zu überbrücken. Während die Großindustrie deshalb oft Investitionen scheut, können kleinere Unternehmen die erforderlichen Änderungen und Weiterentwicklungen der verwendeten Komponenten meist nicht stemmen. Dieses Problem tritt sehr häufig beim Übergang vom Labor in die Industrie auf und wird gelegentlich als »Tal des Todes« bezeichnet. Die Bezeichnung geht auf eine Aussage des US-amerikanischen Kongressabgeordneten Vernon Ehlers zurück, der damit 1998 den Umstand beschrieb, dass es das erarbeitete Wissen oft nicht ohne öffentliche und private finanzielle Unterstützung auf den Markt schafft.

Inzwischen entstehen in vielen Ländern Zentren für angewandte Quantentechnologie, und es werden Instrumente ent-

wickelt, um Unternehmen bei Investitionen zu unterstützen. Großbritannien startete 2014 mit 270 Millionen Pfund (etwa 370 Millionen Euro) die wohl breiteste Initiative. Innerhalb weniger Jahre soll sie Quantenoptikanwendungen industriereif machen. Gleichzeitig wird ein Schwerpunkt auf die Ausbildung von Fachkräften gelegt. Auch in den USA und in China laufen Programme, meist im Bereich der Landessicherheit, also mit Fokus auf Navigation, Quantencomputer und die bereits vergleichsweise weit entwickelte Quantenkryptografie.

In Deutschland gestaltet sich die Situation schwieriger. In einer Stellungnahme vom Juni 2015 bedauern etwa die deutschen Wissenschaftsakademien, dass es hier zu Lande bislang kein Unternehmen gebe, »das versucht, die neuen quantenphysikalischen Effekte wirtschaftlich zu verwerten«. Die Akademien identifizieren dabei die bestehenden Strukturen als eines der Hauptprobleme: Über viele Fachgebiete und zahlreiche Orte verstreute Fördergelder und Kompetenzen würden es der Industrie schwer machen, einzelne Kandidaten für ein Engagement zu identifizieren. Das könnten Forschungscluster ändern, die gezielt dabei unterstützt würden, quantenoptische Technologien gemeinsam weiterzuentwickeln.

Nur durch den Ausbau von Strukturen und die gezielte Finanzierung industrieller Entwicklungsarbeit hat Deutschland bei den kommenden Anwendungen eine Chance im internationalen Wettbewerb. Dabei sollte sich seine herausragende Position in der Grundlagenforschung ausgezeichnet in die Industrie übertragen lassen – statt im »Tal des Todes« zu verbleiben. ∞

DER AUTOR



Jürgen Stuhler ist Direktor der Abteilung Quantentechnologien bei der Toptica Photonics AG, einem Hersteller von Dioden- und Faserlasern für technische Anwendungen.

QUELLEN

Budker, D., Kimball, D. F. J. (Hg.): Optical Magnetometry. Cambridge University Press, 2013

Korzh, B. et al.: Provably Secure and Practical Quantum Key Distribution over 307 km of Optical Fibre. In: Nature Photonics 9, S. 163–168, 2015

Lu, Z.-T., Wendt, K. D. A.: Laser-Based Methods for Ultrasensitive Trace-Isotope Analyses. In: Review of Scientific Instruments 74, S. 1169–1179, 2003

Ricci, L. et al.: A Compact Grating-Stabilized Diode Laser System for Atomic Physics. In: Optics Communications 117, S. 541–549, 1995

WEBLINKS

www.akademienunion.de/publikationen/stellungnahmen-und-positionspapiere

Perspektiven der Quantentechnologien. Stellungnahme der deutschen Wissenschaftsakademien vom Juni 2015

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368116

Die Tücken tragbarer Elektronik

Schon bald werden wir zahlreiche digitale Geräte an – und sogar in – unserem Körper tragen. Doch die sichere Übertragung der anfallenden Flut von persönlichen Daten wirft große technische und rechtliche Probleme auf.

Von Kat Austen

Tom ist zum ersten Mal in Rom und muss dringend einen Zug erreichen, kennt aber den Weg zum Bahnhof nicht. Er drängt sich durch einen Pulk von Touristen, die eifrig fotografieren und Bilder über Instagram und Facebook verschicken. Tom befiehlt seinen Online-Kontaktlinsen, den Stadtplan zu laden, und ruft zugleich per Smartwatch Fahrkarte und Bahnsteignummer auf. Im Augenwinkel blinkt ein Alarmsignal – noch 15 Minuten bis zur Abfahrt –, aber der Stadtplan erscheint nicht, denn die auf das Internet zugreifende Touristenmeute belegt alle Datenkanäle. Stattdessen läuft ein Text über sein Gesichtsfeld: »Du fühlst dich gestresst. Atme durch. Lass dich umarmen!«

Willkommen in einer chaotischen Zukunft, in der tragbare elektronische Geräte die nahtlose Verbindung von realem und digitalem Leben versprechen! In fünf Jahren könnten Millionen Menschen solche »Wearables« (von englisch für »tragbar«) umschnallen oder sogar im Körperinneren mit sich führen.

Heutzutage sind das noch meist Fitness-Messgeräte und Smartwatches (»schlaue Uhren«), welche die Gesundheit prüfen und permanenten Zugang zu Onlinediensten garantieren. Doch es gibt auch schon Stirnbänder, die den Träger vor Konzentrationsverlust warnen, oder Armbänder, die rückfällige Raucher mit Elektroschocks strafen. Elektronikfirmen versprechen Wearables, die Krankheitssymptome behandeln, Pflege organisieren, Epileptiker vor einem Anfall warnen, Angstattacken verhüten und Blinden die Orientierung ermöglichen.

Für all das müssen riesige Datenmengen bewältigt und sicher übertragen werden. Fast eine halbe Milliarde neuer Geräte – vom Toaster bis zum Auto – begann sich allein 2014 drahtlos mit dem Internet zu verbinden; in den vorhergehenden fünf Jahren war der mobile Informationsaustausch auf das 25-Fache gestiegen. Zumeist handelt es sich

AUF EINEN BLICK

WEARABLES: BALD ÜBERALL

- 1** Schon in naher Zukunft wird es gängig sein, jederzeit mehrere Wearables – **körpereigene, mobil vernetzte Elektronikgeräte** – mitzuführen.
- 2** Bereits jetzt wächst der Markt für **intelligente Uhren** und **Fitness-Armbänder**. Geplant sind **elektronische Implantate**, die persönliche Gesundheitsdaten sammeln.
- 3** Die anfallende **Unzahl intimer Informationen** muss raffiniert **verschlüsselt** werden. Andernfalls bekommen **Hacker** leichtes Spiel, die persönlichen Daten zu missbrauchen.

bei der anschwellenden Datenflut um intime Persönlichkeitsdaten, die zum Missbrauch geradezu einladen. »Mit den Wearables und dem so genannten Internet der Dinge beginnt eine neue Ära, und wir müssen rechtzeitig über den Schutz der Privatsphäre nachdenken«, meint Anupam Joshi, der das Center for Cybersecurity an der University of Maryland in Baltimore leitet.

Verstopfte Datenautobahnen

Bis Ende 2014 erreichte der globale Mobilatenverkehr nach Aussage der Netztechnikfirma Cisco Systems 2,5 Exabytes (2,5 Milliarden Gigabytes) pro Monat. Allein die weltweit rund 100 Millionen Wearables erzeugen monatlich 15 Millionen Gigabytes, und diese Zahl soll sich bis 2019 verfünffachen. Hinzu werden immer mehr Datenbrillen kommen, die mit intensivem Informationsaufwand das Erleben von virtueller Realität vermitteln, prophezeit Robert Heath, Professor für Elektrotechnik an der University of Texas in Austin.

All diese Geräte drohen den für den mobilen Datenaustausch vorgesehenen Teil des elektromagnetischen Spek-

trums zu verstopfen. Die begrenzte Bandbreite ist ein globales Problem, das jedes Land auf seine Weise zu lösen versucht.

Die US-Regierung hatte 2010 versprochen, die Bandbreite bis 2020 um 500 Megahertz (MHz) auf das Doppelte zu erhöhen, aber selbst das halten Experten nun für zu wenig. In Indien, wo nur ein Zehntel der heutigen US-Bandbreite zur Verfügung steht, fordern Nutzer die Freigabe militärisch verwendeter Frequenzen. In Großbritannien hat die Regierung alte Fernsehfrequenzbänder für den Datenhunger digitaler Geräte frei gegeben.

Um die elektromagnetischen Wellen besser zu nutzen, müssen Netzbetreiber auf Frequenzen ausweichen, die weniger überlaufen sind als die Radio- und Fernsehbänder. Die Daten sämtlicher Wearables einer Person könnten beispielsweise durch ein körpernahes Millimeterwellennetz strömen. Erst dann würde ein einziges Gerät die gesammelten Daten durch die üblichen Kanäle dem Internet zuführen. Allerdings verbrauchen kürzere Wellenlängen mehr Energie und werden durch andere Körper abgeschirmt.

Vernetzung mit Licht

Eine Alternative bildet das sichtbare Licht von Leuchtdioden (LEDs, light emitting devices) als Übertragungsmedium. LED-Wearables können eine Person quasi mit einem körper-eigenen Lichtnetz umhüllen, das jede Bewegung den Leuchten eines Zimmers meldet, die wiederum über die Stromversorgung mit dem Internet verbunden sind.

Obwohl diese Technik auf sichtbaren Wellenlängen beruht, sind die schwachen und schnellen Helligkeitsschwankungen für das Auge nicht wahrnehmbar. Demnächst sollen Patienten in einem schottischen Krankenhaus versuchsweise Armbänder bekommen, die ihre Temperatur messen und den Wert per LED zu den Deckenlampen übertragen.

Tragbare Geräte könnten auch Informationen zwischen zahlreichen Personen austauschen, statt jede einzeln mit dem Internet zu verbinden. Diese Idee passt zu den vielstufigen Netzsystemen der fünften Generation, die vielerorts für 2020 angekündigt werden. Wenn eine Menschenmenge gleichzeitig auf dieselbe Information zugreift – etwa auf Verkehrsverbindungen nach einem Sportereignis –, könnte ein Gerät als Verteiler dienen und die Daten anderen Netzteilnehmern übermitteln; das würde die Anzahl der Zugriffe auf das Internet drastisch senken.

Ein besonders attraktiver Ansatz macht Geräte schlauer bei der Nutzung von Kommunikationskanälen. Solche intelligenten Sender erspüren die momentan weniger überlaufenen Frequenzen und hüpfen von einem dieser Schlupflöcher geschickt zum anderen. Dabei verhandeln sie quasi miteinander, um sich das zugängliche Spektrum zu teilen. Ihre Entwicklung krankt allerdings vorläufig noch an fehlenden Standards für die gemeinsame Frequenznutzung.

Bei der großen Consumer Electronics Show in Las Vegas vom Januar 2015 waren neue Wearables der Knüller – zum Beispiel der Pacif-i, ein intelligentes Babyphone, das die Tem-

Bandbreite und Datensicherheit

Die rapide Verbreitung tragbarer Elektronikgeräte, so genannter Wearables, stößt an die Belastungsgrenzen der verfügbaren Datennetze. Außerdem entsteht eine Flut intimer Daten, deren Schutz neuartige Probleme aufwirft.

globaler Mobilatenverkehr

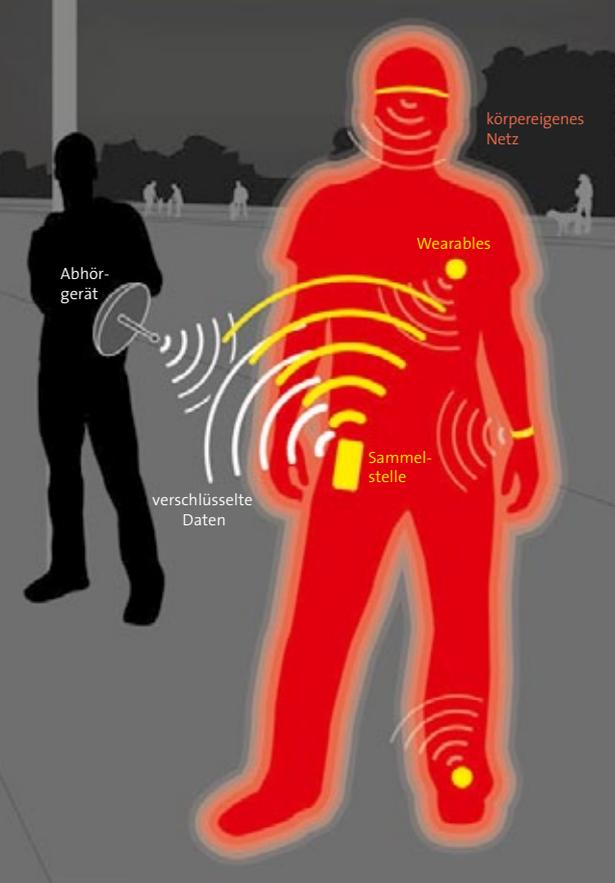


Anzahl der Wearables



RISIKANTE DATENFLUT

Die Datenmenge lässt sich reduzieren, wenn alle Wearables einer Person mit einer körper-eigenen Sammelstelle kommunizieren, die mit dem Internet in Verbindung steht. Das körpereigene Netz könnte herkömmliche Radiofrequenzen oder Lichtsignale nutzen; Letztere würden über Leuchten ins Internet übertragen. Die Daten müssen durch Verschlüsselung vor Hackern geschützt werden.



AUSTEN, K.: THE TROUBLE WITH WEARABLES. IN: NATURE 525, S. 22-24, 2015

peratur des Babys misst und dem elterlichen Smartphone meldet.

Falls dann die Eltern vor Stress weder aus noch ein wissen, verspricht ihnen das Melomind-Headset Beruhigung; es misst die elektrische Hirnaktivität und holt per Smartphone aus dem Netz die Lieblingsmusik des Melomind-Trägers, um ihn zu entspannen.

Vor allem im medizinischen Bereich werden tragbare Elektronikgeräte bald allgegenwärtig sein. Sie messen das körperliche Befinden, stimulieren das Gehirn elektrisch und injizieren sogar Medikamente. Doch diese Anwendungen sind nicht ohne datenrechtliches Risiko.

Wearables sammeln über ihre Nutzer eine Unmenge persönlicher Informationen, die auf den Computerservern großer Firmen gespeichert werden. Wie sicher sind die Daten dort? Was geschieht damit, wenn die Firmen ihre Geschäftsbedingungen ändern, verkauft werden oder Bankrott machen?

Die am Handgelenk getragenen »Activity Tracker« der US-Firma Fitbit beobachten Puls, Schrittzahl, Atemfrequenz und Schlaftiefe – woraus unter anderem hervorgeht, wann der Nutzer Geschlechtsverkehr hat. Diese Daten waren öffentlich zugänglich, bis das peinliche Versäumnis 2011 auffiel und korrigiert wurde.

Neuartige Datenschutzprobleme

Als 2013 das Google-Glass-Headset auf den Markt kam, befürchteten manche, Träger dieser intelligenten Datenbrille könnten im Vorbeigehen Passanten ohne deren Wissen filmen. Als Gegenmaßnahme entwickelten Forscher am Center for Cybersecurity die so genannte FaceBlock-App; sie verdeckt die Gesichter von Personen, die nicht von Google Glass fotografiert werden möchten. Aber damit das funktioniert, muss der Google-Glass-Besitzer die App auf seiner Brille installieren. Somit kann der Schutz erst zuverlässig wirken, wenn Google jede seiner Datenbrillen standardmäßig damit ausrüstet.

Zwar sind Maßnahmen gegen Datenklau inzwischen fast Standard, doch billige Wearables sparen sich oft die Verschlüsselung. Wie die kalifornische Softwarefirma Symantec 2014 enthüllte, lässt sich der Standort vieler Gesundheitsprüfgeräte ohne Weiteres verfolgen; manche übertragen Passwörter unverschlüsselt und öffnen damit Hackern Tür und Tor. Auch wenn das intelligente Armband kodiert arbeitet, bleibt das Smartphone, das die Internetverbindung herstellt, ein Schwachpunkt. »Selbst wenn man die Daten verschlüsselt, ist man nicht sicher«, warnt Bogdan Carbutar, ein Datenschutzforscher an der Florida International University in Miami. Er untersuchte mögliche Sicherheitslücken in zwei handelsüblichen und billigen Fitnessmonitoren namens FitBit Ultra und Garmin Forerunner.

Indem sich Carbutar als Webserver des jeweiligen Geräts ausgab, konnte er es dazu verleiten, falsche Daten zu mel-

den – sogar unsinnige Zahlen wie Millionen Schritte an einem Tag. Die mögliche Manipulation der Gesundheitsdaten wird spätestens dann zum Problem, wenn eine Krankenversicherung von diesen Informationen die Höhe der monatlich fälligen Prämie abhängig macht.

Da jede Datenschutzmaßnahme des Herstellers sein Produkt verteuert, versuchen Forscher diese Unkosten möglichst klein zu halten. Carbutars Team entwickelte das speziell für billige Fitnessmessgeräte gedachte Kodierungsprotokoll SensCrypt. Es verwendet eine so genannte

symmetrische Verschlüsselung, um Hackerangriffe abzuwehren und um selbst dann, wenn das Gerät gestohlen und manipuliert wird, eine gewisse Sicherheit zu bieten. Allerdings ließ sich das Verfahren bei FitBit- oder Garmin-Geräten wegen deren firmeneigener Programmiersprache nicht erproben, sondern nur an Open-Source-Geräten.

Aber selbst mit raffinierter Verschlüsselung sind die Geräte nicht unangreifbar, meint Bart Preneel, Kryptografieexperte der Universität Löwen (Belgien) und des belgischen Forschungszentrums iMinds. Preneel ist Spezialist für so genannte Seitenkanalattacken, bei denen Hacker die Daten über Schwankungen des Stromverbrauchs ausspionieren.

Solche Attacken können noch auf 10 bis 20 Meter Entfernung gelingen. Diese Schwachstelle wurde schon vor 20 Jahren bei Bankkarten entdeckt, doch viele Wearables, insbesondere medizinische Digitalimplantate, sind nicht dagegen geschützt.

Einige Firmen versuchen ihre Mobilgeräte mit einem biometrischen Fingerabdruck- oder Iris-Scanner zu sichern. Aber auch das lässt sich umgehen, wenn eine Smartphone-Kamera den Fingerabdruck stiehlt; hochauflösende Kameras können eine Iris sogar aus einiger Entfernung aufnehmen. Darum bevorzugt Preneel komplexere biometrische Verfahren; so gibt es bereits Wearables, die den Besitzer anhand seines Herzschlagmusters identifizieren. Für die fernere Zukunft setzt Preneel auf intimere Signale wie die DNA oder die Darmflora, an denen das Gerät den Körper des legitimen Nutzers erkennen soll. ~

Selbst mit raffinierter Verschlüsselung sind tragbare Geräte nicht unangreifbar

DIE AUTORIN



Kat Austen ist eine britische Publizistin. Derzeit lebt sie in Berlin.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368117

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 525, S. 22–24, 3. September 2015



Bärbel Morstadt

Die Phönizier

Philipp von Zabern, Darmstadt 2015

175 S., € 29,95

GESCHICHTE

Verehrt und abgelehnt

Das Bild von den Phöniziern war schon immer ambivalent.

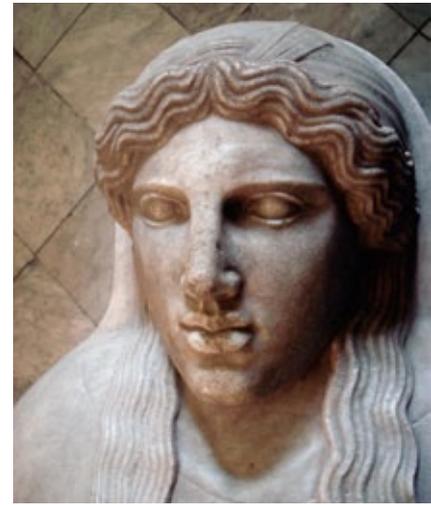
Als der phönizische Händler Epidemais Asterix und Obelix einlädt, sie per Schiff nach Rom zu bringen, ist die gute Geste nur schöner Schein. In Wirklichkeit plant er, sie bei der Ankunft in Rom als Sklaven zu verkaufen. Diese Episode aus dem Comic »Asterix als Gladiator« wurde entlehnt aus Homers »Odyssee« und zeichnet ein verbreitetes Bild der Phönizier: das der hinterlistigen, skrupellosen Händler. Ein anderes Stereotyp, das man mit diesem semitischen Volk des Altertums verbindet, ist das des weltgewandten Kaufmanns, der neben Gütern auch Kultur verbreitet.

Seit der Antike wurden die Phönizier sowohl verehrt als auch zutiefst verachtet. Das Bild dieser Händler und Seefahrer könnte widersprüchlicher kaum sein. Doch wie waren die Phönizier wirklich? Dieser Frage geht Bärbel Mor-

stadt, Juniorprofessorin für die phönizische Diaspora an der Ruhr-Universität Bochum, im vorliegenden Werk wissenschaftlich nach. Ihre gelungenen Texte hat sie mit interessanten und hilfreichen Abbildungen von Ausgrabungsgegenständen und Karten ergänzt.

Zunächst beschreibt Morstadt die Darstellung der Phönizier in der neueren Geschichte. Hierfür stellt sie verschiedene Strömungen wie den Orientalismus oder den Phönizianismus dar. Danach geht sie auf die problematische Quellenlage ein und erörtert, wie schwer die begriffliche Herleitung des Worts »Phönizier« ist. Ihre übersichtliche und klar strukturierte, methodische Einführung ist nicht nur für Geschichtswissenschaftler lesenswert, sondern gewährt auch Laien einen Einblick in die wissenschaftliche Arbeit von Historikern.

Im Hauptteil des Buchs untersucht Morstadt das Leben und Wirken der Phönizier innerhalb und außerhalb ihres Stammlands. Der Siedlungsraum des semitischen Volks umfasste den heutigen Libanon, den südlichen Teil der syrischen Küste bis Arwad und den nördlichen Teil Israels bis Akko. Jenseits dessen gelangten die Seefahrer beispielsweise auf die italische und die Iberische Halbinsel sowie an die nordwestliche afrikanische Küste und nach Malta. Anhand schriftlicher Quellen und archäologischer Funde befasst sich die Autorin mit wichtigen Wirkstätten dieses Volks, etwa den Städten Tyros, Sidon und Byblos. Zudem skizziert sie die



Detail eines phönizischen Sarkophags aus Palermo.

Entwicklung der Handels- und Machtverhältnisse zu anderen Kulturen und den Austausch mit denselben.

Von der phönizischen Expansion bis zur Eingliederung dieser Städte in die hellenistische Welt gelingt Morstadt ein umfassender Streifzug durch die Geschichte, ohne dass sie dabei den roten Faden verliert. Dabei beleuchtet sie methodische Probleme, die beim Erforschen der Phönizier immer wieder auftreten – etwa hinsichtlich der schwierigen Vereinbarkeit von Schriftquellen und archäologischen Funden.

Wer sich aus wissenschaftlicher Sicht oder als geschichtsinteressierter Laie mit den Phöniziern beschäftigen möchte, dem ist Morstadts Werk zu empfehlen. Die Autorin stellt das komplexe Thema klar strukturiert und verständlich dar und baut bei aller wissenschaftlichen Korrektheit erzählerische Spannung auf. Ihr kritisches Hinterfragen des Forschungsbetriebs liefert zwar keine neuen Antworten, aber durchaus neue Perspektiven. Das Ziel, die Leser ins Thema einzuführen und ihnen einen Überblick über die aktuelle Forschung zu verschaffen, erfüllt das Werk voll und ganz.

Jastine Baumgärtner

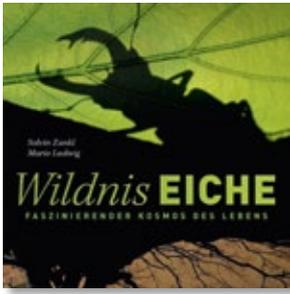
Die Rezensentin studiert Global History in Heidelberg.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Weitere Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen



Solvin Zankl, Mario Ludwig

Wildnis Eiche

Faszinierender Kosmos des Lebens

Frederking & Thaler, München 2015

160 S., € 39,99

BIOLOGIE

Königin der Bäume

Die Eiche liefert nicht nur hervorragendes Holz, sie ist auch Lebensraum für zahlreiche Tierarten.

Stolz, Stärke, Beständigkeit: Mit diesen Merkmalen wird die Eiche assoziiert. Sie gilt als Königin der Bäume und hat Dichter und Denker inspiriert. Nationalisten sahen in ihr ein Sinnbild des »Heldentums« und »deutscher Tugenden« – so galt das »Ritterkreuz mit Eichenlaub« beim NS-Militär als besonders hohe Auszeichnung. Die Eichen selbst scheren sich nicht darum. Sie sind Nährstofflieferanten und Lebensraum für diverse Tierarten, sogar wenn sie tot sind. Jede Eiche bietet ihren Bewohnern ein eigenes Ökosystem.

In dem Bildband »Wildnis Eiche« befassen sich der Naturfotograf Solvin Zankl und der Biologe Mario Ludwig mit dieser Baumgattung, die etwa 400

bis 600 Arten umfasst. Natürlich führen die Autoren nicht alle davon auf; sie fokussieren auf die heimischen Spezies Stiel- und Traubeneiche.

Die Makroaufnahmen Zankls führen den Leser sehr nahe an den »Kosmos Eiche« heran. Man sieht Hirschkäfer auf ihr kämpfen, Eichenwanzen auf ihren Knospen sitzen und staunt darüber, wie sich die stark behaarte Larve des Eulenfalters an ihren Blättern labt. Man bekommt die Fraßgänge der Minierer (Insektenlarven) zu sehen und erblickt die Momentaufnahme eines weiblichen Eichenblattrollers. Diese Käfer schneiden Eichenblätter ein, klappen deren Seiten hoch und rollen sie von der Spitze her zusammen, um ein Ge-

fäß zu schaffen, in das sie ihre Eier legen können.

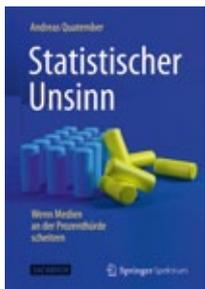
Die Texte von Mario Ludwig erklären das Dargestellte sehr gut und vermitteln dabei botanische ebenso wie ökologische Erkenntnisse. Der Biologe präsentiert faszinierende Fakten, die Laien oft unbekannt sind, und das durchweg gut verständlich. Wussten Sie zum Beispiel, dass Stiel- und Traubeneichen erst nach einem halben Jahrhundert Blüten tragen? Oder dass ein solcher Baum den Sauerstoffbedarf von elf Menschen decken kann?

Auch geht Ludwig auf die zahlreichen Tierarten ein, die das Ökosystem Eiche besiedeln, auf die Wechselwirkungen zwischen diesen und den Bäumen und auf die evolutionären Strategien beider Seiten, sich an das gemeinsame Dasein anzupassen. Ein Beispiel: Jedes Jahr Ende Juni treiben Eichen ein zweites Mal neue Blätter aus – eine Anpassung, mit der die Pflanze den Blattfraß unter anderem des Eichenprozessionsspinners kontert.

140 farbige Abbildungen, einige davon doppelseitig, machen die Lektüre zum optischen Genuss. Ein erhellendes Leseerlebnis mit Erkenntnissen, die den nächsten Waldspaziergang bereichern werden.

Rosana Erhart

Die Rezensentin ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



Andreas Quatember

Statistischer Unsinn

Wenn Medien an der Prozenzhürde scheitern

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2015

223 S., € 14,99

MATHEMATIK

Können diese Statistiken lügen?

Wenn Journalisten mit Prozentangaben, Mittelwerten und Korrelationen argumentieren, ist oft Vorsicht geboten.

Statistiken begegnen uns überall, denn für die Erhebung, Analyse, Interpretation und Darstellung von Daten sind statistische Methoden unverzichtbar. Umso bemerkenswerter ist die verbreitete Skepsis dieser Disziplin gegenüber, die in dem Bonmot »Traue keiner Statistik, die du nicht selbst gefälscht hast« (Winston Churchill) zum Ausdruck kommt. Wo liegt die Ursache für dieses Misstrauen?

Für Andreas Quatember, Professor für Statistik an der Johannes Kepler Universität Linz, liegt das Problem zum Teil in einer einschlägigen Inkompetenz vieler Medienvertreter. Schon seit

geraumer Zeit sammelt er Beispiele für statistischen Unsinn und hat sie im vorliegenden Buch zusammengefasst. In ihm gibt er einen systematischen Überblick über typische Fehler, bespricht sie ausführlich und erklärt die mathematischen Zusammenhänge dahinter. Quatember widmet sich Print- und Onlineartikeln, überwiegend aus österreichischen Medien, wobei seine Analysen stets unterhaltsam sind und kein mathematisches Vorwissen erfordern. Fachbegriffe erläutert der Autor in Infoboxen.

Zunächst präsentiert er diverse Fälle problematischer Prozentangaben. Es ist peinlich, »jeder Vierte« und »40 Prozent« zu verwechseln, als Hotelbuchungsportal »101 Prozent« zufriedene Kunden auszuweisen oder bei statistischen Vergleichen auf falsche Grundgesamtheiten Bezug zu nehmen. Wenn etwa der Anteil der Frauen mit Führerschein ungefähr 40 Prozent beträgt, aber nur 35 Prozent der Personen schädigenden Verkehrsunfälle von Frauen verursacht werden, dann heißt das nicht, dass Frauen sicherer Auto fahren als Männer. Denn die Quote der weiblichen Unfallverursachenden darf nicht mit jener der Führerscheinbesitzerinnen verglichen werden, »sondern natürlich nur mit dem weiblichen Anteil an den [aktiven] Fahrern oder sogar Fahrten«. In vielen Familien sitzt überwiegend der Mann am Steuer, selbst wenn die Frau einen Führerschein besitzt.

Auch grafische Darstellungen, etwa Diagramme, sind oft fehlerhaft. Dafür liefert Quatember eindruckliche Beispiele. Ob sie auf Einzelfehler, statistische Unkenntnis oder bewusste Manipulation zurückgehen, lässt sich oft nicht entscheiden. Jedenfalls lernt der Leser Kriterien kennen, um die Qualität von Darstellungen zu beurteilen. Häufige Manipulationen bestehen darin, die Orientierung der Achsen zu vertauschen oder deren Einteilung nicht bei null beginnen zu lassen, was Unterschiede überbetont. So präsentiert eine Anzeige des Bundesministeriums für Bildung und Forschung Studienanfängerquoten in einem Säulendiagramm.

Europas größtes Monatsmagazin für Geschichte



pm-history.de

Jetzt
im Handel

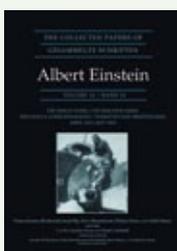


Franz Manfred Wuketits

Außenseiter in der Wissenschaft. Pioniere – Wegweiser – Reformer

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2015. 302 S., € 19,99

Wie geht die etablierte Wissenschaftsszene mit Außenseitern um? Was treibt »querulante« Forscher dazu, trotz Ignoranz und Ablehnung ungewöhnliche Ideen zu verfolgen? In kurzen Texten porträtiert der renommierte Biologe und Autor Franz Wuketits 35 mehr oder weniger bekannte Gelehrte. Zum Beispiel die amerikanische Genetikerin Barbara McClintock, die Ende der 1940er Jahre die Transposonen (»springende Gene«) entdeckte und dafür zunächst verspottet wurde. Sie forschte weiter – und erhielt mehr als 30 Jahre später den Nobelpreis. Der bedeutende Physiker Erwin Schrödinger wiederum wagte sich in fachfremdes Revier und leistete Beiträge zur Molekularbiologie. Die Porträts sind interessant und ermutigen zu unkonventionellem Denken. Allerdings erscheint die Auswahl der Porträtierten nicht immer schlüssig; zudem bleibt McClintock leider die einzige Frau darunter. KATJA MARIA ENGEL



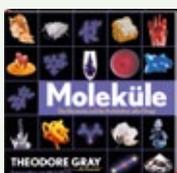
Diana Kormos Buchwald et al. (Hg.)

The Collected Papers of Albert Einstein, Vol. 14

Die Berliner Jahre: Schriften und Briefwechsel April 1923 bis Mai 1925

Princeton University Press, Princeton 2015. 1104 S., \$ 140,-

Im Jahrhundertprojekt der »Collected Papers of Albert Einstein« ist man nun bei Band 14 angekommen. Er umfasst die Zeit von April 1923 bis Mai 1925, in die ausgedehnte Reisen des Physikers fallen. Diese führten ihn etwa im Frühjahr 1925 für zwei Monate nach Südamerika, wobei er sich in typisch selbstironischer Art als »Reisender in Relativität« bezeichnete. Einige Fahrten, beispielsweise zu seinem Freund und Kollegen Paul Ehrenfest ins holländische Leiden, standen in Zusammenhang mit der politischen Entwicklung in Deutschland, insbesondere der zunehmenden antisemitischen Hetze gegen ihn. Wissenschaftlich waren die zwei Jahre von Arbeiten zur einheitlichen Feldtheorie geprägt, aber auch von einer intensiven Beschäftigung mit quantenphysikalischen Problemen – von der Bose-Einstein-Statistik bis zum Compton-Effekt. Aus dem Sammelband geht hervor, dass Einstein kein reiner Theoretiker war, sondern auch ein lebhaftes und innovatives Interesse an Experimenten zeigte. DIETER HOFFMANN

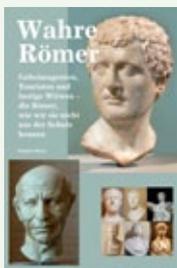


Theodore Gray

Moleküle. Die Elemente und die Architektur aller Dinge

Fackelträger, Köln 2015. 240 S., € 29,99

Ob Arzneien, Edelsteine, Geschmacksstoffe, Seife oder unser Erbgut: Ihre Eigenschaften liegen in der Struktur mehratomiger Teilchen begründet. Der Unternehmer und Wissenschaftsautor Theodore Gray präsentiert in diesem Bildband eine bunt gemischte Auswahl molekularer Verbindungen. Faszinierende Fotos solcher Substanzen bilden den Schwerpunkt des Buchs – von Erzen über Fasern bis zu Tierurinproben. In kurzen Erklärtexten geht Gray auf chemische Grundlagen und unterhaltsame Details ein. So erläutert er, wie Seife funktioniert und warum wir Farben sehen. Dabei pflegt er einen humorvollen, etwas reißerischen und laienverständlichen Stil. Auf fachliche Korrektheit oder gar Vollständigkeit legt der Autor weniger Wert. Sein Buch bietet kurzweilige Lektüre, eignet sich zum Stöbern, Entdecken und Staunen und vermittelt einen Eindruck von der Vielfalt der Chemie. ELENA BERNARD



Stephan Berry

Wahre Römer

Geheimagenten, Touristen und lustige Witwen – die Römer, wie wir sie nicht aus der Schule kennen

Nünnerich-Asmus, Mainz 2015. 114 S., € 19,90

In ihrem Vielvölker-Imperium waren die Römer mit allen Vorteilen und Problemen interkulturellen Austauschs konfrontiert. Wissenschaftsautor Stephan Berry setzt sich mit Integration und Identität auseinander und zeigt, wie vergleichsweise fortschrittlich man im Imperium Romanum damit umging. Er möchte Klischees des Schulstoffs hinterfragen und fokussiert daher nicht auf die bekannten historischen Persönlichkeiten. Vielmehr fesseln ihn die »typischen Römer«, etwa Ausländer, die den sozialen Aufstieg schafften. Die Buchkapitel folgen chronologisch sortiert, immer mit Blick auf die Themen Integration und Zugehörigkeit. Berrys Darstellung der etwas anderen Art bietet interessierten Laien eine unterhaltsame Lektüre, ist aber ziemlich weitschweifig geschrieben. MAIKE KOMOREK

Diese lagen im Zeitraum von 2005 bis 2010 zwischen 35,7 und 46,1 Prozent. Die Einteilung der vertikalen Achse beginnt bei 30 Prozent, wodurch der Eindruck entsteht, die Quote habe sich verdreifacht; tatsächlich ist sie auf das 1,3-Fache gestiegen.

Fehler beim Umgang mit Mittelwerten, schreibt der Autor, entstehen meist durch unzutreffende Interpretation. So kam eine Studie zu dem Schluss, Frührentner würden früher sterben: »Wer sich mit 55 Jahren aus der Firma verabschiedete, wurde demnach durchschnittlich 72 Jahre alt. Die bis zum Alter von 60 Jahren Beschäftigten starben dagegen erst mit 76. Und wer bis 65 im Unternehmen blieb, wurde sogar 80 Jahre alt.« Auf den ersten Blick wirkt das wie eine belastbare Aussage. Doch nach einigem Nachdenken wird klar: Wer mit 65 in Rente geht, kann nicht vorher gestorben sein. In die mittlere Lebenszeit der mit 65 Berenteten fließen also nur Zahlen ab 65 aufwärts ein, während es

bei den Frührentnern Zahlen ab 55 sind. Daraus ergibt sich der möglicherweise völlig unzutreffende Eindruck, Menschen, die länger als bis 55 arbeiten, erreichten im Durchschnitt ein höheres Alter als Frührentner.

Oft interessiert der statistische Zusammenhang zweier Merkmale, die so genannte Korrelation, wobei man durch Kenntnis des einen Merkmals, etwa des Geschlechts, auch Informationen über das andere erhält, beispielsweise die Parteipräferenz. Dabei ist es wichtig zu verstehen, dass zwischen den Merkmalen keine kausale Beziehung bestehen muss. Wenn sich etwa der Pro-Kopf-Schokoladenverbrauch eines Landes angeblich direkt auf die Zahl seiner Nobelpreisträger auswirkt, dann hat jemand unzulässig von einem statistischen auf einen kausalen Zusammenhang geschlossen. Manchmal ist es in solchen Fällen sinnvoll, nach einem zu Grunde liegenden, gemeinsamen Einflussfaktor zu suchen. Bei der Schokola-

de und den Nobelpreisträgern könnte das der Wohlstand eines Landes sein.

Das Buch sensibilisiert gegenüber statistischen Zusammenhängen und Manipulationsversuchen und macht die Leser damit zu mündigeren Mediennutzern. Trotz aller Aufklärung gelingt es dem Autor, nicht belehrend oder überheblich zu wirken. Allerdings werden sich Leser mit statistischen Vorkenntnissen angesichts seiner vielen Beispiele und ausführlichen Erklärungen wohl irgendwann langweilen. Man kann in diesem Fall problemlos einige Seiten überspringen. Zudem kommen tiefer Interessierte ab Kapitel 5 mehr auf ihre Kosten. Dort geht der Autor unter anderem auf die Logik des statistischen Signifikanztests und Konfidenzintervalle ein.

Roland Pilous

Der Rezensent arbeitet als Dozent für Mathematik und ihre Didaktik an der Fachhochschule Nordwestschweiz.



Lutz Jäncke

Ist das Hirn vernünftig?

Erkenntnisse eines Neuropsychologen

Hans Huber, Bern 2015

328 S., € 24,95

NEUROPSYCHOLOGIE

Das irrationale Gehirn

Warum unlogisches Denken und Verhalten typisch menschlich sind.

Vernunft ist eine Eigenschaft, mit der wir uns gern schmücken. Sie erlaubt, logische Schlussfolgerungen zu ziehen, unser Verhalten zu steuern und uns an soziale Gegebenheiten anzupassen. Dementsprechend postulierte der französische Philosoph René Descartes (1596–1650), der vernünftige Geist kontrolliere einen (bewusstlosen) Körper. Seine fast 400 Jahre alte These vom

Leib-Seele-Dualismus beherrscht noch immer unsere Kultur.

Mit dem Aufschwung der Neurowissenschaft wird es Zeit, das Wechselspiel von Körper und Geist neu zu hinterfragen. Denn je genauer wir die Funktionen unseres Gehirns verstehen, desto mehr scheinen seine Aktivitäten und das, was man meist »Seele« nennt, miteinander verwoben zu sein. Wenn die

Vernunft also einen wesentlichen Teil des Menschen ausmacht, müsste dann nicht auch sein Gehirn nach »vernünftigen Regeln« arbeiten?

Kaum – oder zumindest weniger, als die meisten annehmen. Das belegt Lutz Jäncke, Professor für Neuropsychologie an der Universität Zürich, in seinem neuen Buch. Auf mehr als 300 Seiten hat er Erkenntnisse über Hirnfunktionen und Denkmechanismen zusammengetragen, mit dem Ziel, unser Verständnis menschlicher Urteile, Ansichten, Neigungen und Wünsche zu vertiefen.

Der Neuropsychologe steigt tief in die wissenschaftliche Literatur ein. Als Leser lernt man klassische Experimente und kognitionspsychologische Theorien kennen, ebenso wie funktionell bedeutsame Hirnareale und neuropsychologische Störungen. Dabei wird klar, dass das Unterbewusstsein manchmal bessere Entscheidungen trifft als das Bewusstsein. Unterschwellige Erfahrungen, latentes Vorwissen, Emotionen, unwillkürliche Aufmerksamkeitsmechanismen sowie die Umweltbedin-

gungen beeinflussen unser Denken, Handeln und Erinnern sehr viel stärker, als es wirkt.

Das Gehirn scheint sich die Welt, die es wahrnehmen möchte, selbst zusammenzuzimmern. »Vernünftig« zu agieren, bedeutet für ein neuronales System, sich sozial angepasst zu verhalten – nach erlernten Regeln, die wir uns meist unbewusst über Erfahrungen und Gefühlserlebnisse angeeignet haben. Der Autor macht deutlich: Das, was Menschen im Vollbesitz ihrer Vernunft zu sehen, zu fühlen oder sich ins Gedächtnis zu rufen glauben, sind tatsächlich Interpretationen. Alles unterliegt offenbar der Deutungshoheit des Gehirns – Denkmuster, Erinnerungen, visuelle Eindrücke ebenso wie die Wahrnehmung des eigenen Körpers.

Das wirft die Frage auf, ob wir tatsächlich über einen freien Willen verfügen. Dies bejaht der Neuropsychologe mit Blick auf bewusste und vorbereitete neuronale Prozesse. Der Stolz auf die Vernunft als angeblich herausragende Eigenschaft des Menschen gerät bei der Lektüre allerdings mächtig ins Wanken.

Jänckes Buch ist vollgepackt mit vielfältigen Erkenntnissen aus der Kognitions- und Neurowissenschaft. Leider verliert sich der Autor bei dem Versuch, ein umfassendes Bild des Forschungsstands zu präsentieren, mehrmals in langatmigen und redundanten Erklärungen. Auch wird nicht ganz klar, wer angesprochen wird: Sprachlich scheint er eher für Kollegen als für die breite Öffentlichkeit zu schreiben. Jedoch erörtert er zahlreiche Experimente und

Theorien, die Neurowissenschaftlern weithin bekannt sein dürften.

Trotzdem bleiben Ausgangsfrage und Schlussfolgerung hochinteressant. Es erstaunt, auf welch wackligen Beinen unser Begriff von Vernunft steht. Und wie viele »Denkfehler« unser Hirn ständig produziert, ohne dass wir es merken. Mit dem Wissen um solche Phänomene lassen sich merkwürdig anmutende Verhaltensweisen oder vermeintlich unlogische Denkmuster anderer besser nachvollziehen. Sein Ziel, zu einem besseren Verständnis der Mitmenschen beizutragen, hat Jäncke erreicht.

Nele Langosch

Die Rezensentin ist Psychologin und Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.



Brian Clegg

Eine kleine Geschichte der Unendlichkeit

Aus dem Englischen von Monika Niehaus

und Bernd Schuh

Rowohlt, Reinbek 2015

348 S., € 9,99

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Die Idee vom Unermesslichen

Dem Begriff »Unendlichkeit« näherten sich Menschen im Lauf der Geschichte auf recht unterschiedliche Weise.

Der Buchtitel ist durchaus wörtlich zu nehmen. Naturwissenschaftsdozent Brian Clegg beschreibt das mathematische Werden des Konzepts »Unendlichkeit« von der Antike bis zur Gegenwart. Dabei geht er auf die Paradoxa des Zenon von Elea (5. Jahrhundert v. Chr.) ebenso ein wie auf den antiken Philosophen Aristoteles, der mit seinem »potenziell Unendlichen« eine Notlösung schuf, um sich nicht mit dem wirklich Unendlichen beschäftigen zu müssen. Außerdem befasst sich der Autor mit den Pythagoreern, die Zahlen

als mit der Schöpfung verbunden ansahen, sowie mit dem griechischen Mathematiker Archimedes, der die damals gängige Vorstellung vom Unendlichen veränderte. In seinem Werk »Die Sandrechnung« hatte Archimedes geschätzt, wie viele Sandkörner das Universum füllen, das man sich zu dieser Zeit viel kleiner vorstellte als heute. Er erhielt eine große, aber konkrete Zahl – was gegen die Ansicht sprach, die Zahl der Sandkörner sei unendlich groß.

Mit der Ausbreitung des Christentums verbanden die Menschen das Un-

endliche zunächst mit Gott. Clegg zeigt allerdings auf, dass diese Assoziation nach und nach schwächer wurde. Während frühe Kirchenlehrer wie Augustinus von Hippo (354–430) noch davon ausgingen, Gott und das Unendliche seien wesensgleich (was die Allmacht Gottes einbezog), relativierte Thomas von Aquin (1225–1274) diese Vorstellung später in seinem Buch »Summa theologiae«.

Als einen weiteren Zugang zum Konzept der Unendlichkeit stellt der Autor die irrationalen Zahlen vor, die, sozusagen im Dickicht der Mathematik lauernd, es »unmöglich machten, die Unendlichkeit völlig zu ignorieren [...]«. Doch Mathematiker machten lange Zeit einen Bogen darum, wie der Autor belegt. Carl Friedrich Gauß (1777–1855) habe die irrealen Natur des Unendlichen betont und damit gewissermaßen die Haltung Aristoteles' bestätigt – eine Ansicht, die bis ins 19. Jahrhundert hinein dominierte. Gelegentliche Abweichler gab es allerdings, etwa Galileo Galilei (1564–1642), der seine Gedanken zur Unendlichkeit 1638 in seinem Werk »Discorsi e dimostrazioni matematiche« veröffentlichte. Ausgehend von der Annahme, die Materie werde durch so genannte Vakua zusammengehalten,

untersuchte er, »ob man nicht irgendwie versuchen könnte, wie in einer kontinuierlich endlichen Strecke vielleicht nicht unendlich viele Hohlräume [Vakua] sein könnten« (aus der deutschen Übersetzung, Leipzig 1890). Am Ende seiner Betrachtungen stand die Erkenntnis, dass es möglicherweise verschieden große Unendlichkeiten gebe.

Zielsicher führt Clegg seine Leser durch die immer mehr an Fahrt gewinnende Geschichte der Mathematik, vorbei an ganz Großen wie Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) und Isaac Newton (1643–1727) und deren Prioritätsstreit über die Erfindung der Infinitesimalrechnung. Schließlich schildert er seinen Lesern gewissermaßen die erste formale Zähmung der Unendlichkeit in Form des Grenzwertbegriffs, verbunden mit den Namen Augustin-Louis Cauchy (1789–1857) und Karl Weierstraß (1815–1897).

Eine erste Lanze dafür, dass die Unendlichkeit eine reale und nicht virtu-

elle mathematische Größe sei, habe der Priester und Mathematiker Bernardus Bolzano (1781–1848) gebrochen, schreibt Clegg. Auf ihn stützte sich der deutsche Mathematiker Georg Cantor (1845–1918), als er sein Bild der »wahren Unendlichkeit« entwickelte, das heute noch in Gebrauch ist. Um Cantors Gedanken nachvollziehen zu können, vermittelt der Autor einige Grundbegriffe der Mengenlehre, wobei er einen guten Kompromiss zwischen Tiefe und Verständlichkeit findet. Damit ausgerüstet kann man Cantors Kontinuumshypothese in Grundzügen begreifen, wonach die reellen Zahlen überabzählbar unendlich sind und damit eine größere Unendlichkeit darstellen als die natürlichen Zahlen.

In der Gegenwart angekommen, ordnet Clegg den Begriff der Unendlichkeit in das moderne physikalische Weltbild ein. Wo liegen nach heutiger Auffassung Anfang und Ende von Raum und Zeit? Wie weit lassen sich Raum und Zeit un-

terteilen? Und welche Antworten können Fraktale auf diese Fragen geben?

»Eine kurze Geschichte der Unendlichkeit« beschreibt nicht nur die historische Entwicklung eines mathematischen und philosophischen Konzepts, sondern gibt auch den Menschen dahinter eine Bühne und beleuchtet ihre Leidenschaft für das Thema. Das nimmt den Mathematikern und Philosophen ein Stück von ihrer vermeintlichen Weltfremdheit. Clegg wendet sich an Laien wie an Fachleute, bedient sich einer leicht zugänglichen Sprache, überfordert seine Leser an keiner Stelle und bringt dennoch alles Wesentliche auf den Punkt. Er scheint von der Unendlichkeit genauso fasziniert wie die Protagonisten seines Werks – und der Leser nach der Lektüre.

Markus Neurohr

Der Rezensent hat Physik und Geologie studiert und arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Karlsruhe.

 **STERNE UND
WELTRAUM**



DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2016

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2016 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte.

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

MOTIVE
JETZT SCHON
ONLINE
ANSCHAUEN!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.sterne-und-weltraum.de/kalender

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!



Hethiter und Hattier

Für die Hethiter konnte das Jenseits Ort des Schreckens, aber auch Spiegelbild der Erde sein, meint die Altorientalistin und Hethitologin Susanne Görke (»Das Weltbild der Hethiter«, August 2015, S. 62).

Walter Weiss, Kassel: Übernahmen die Hethiter Kultur, Religion und sogar den Namen ihrer Hauptstadt Hattuscha von den Hattiern – oder waren sie mit den Hattiern identisch? Die zunächst ganz abstrus erscheinende zweite Version wird sehr überzeugend, wenn man die besonders (im Vergleich zu den anderen altindoeuropäischen Sprachen) formenarme und das in den Strukturen erkennbare hohe Alter des Hethitischen berücksichtigt sowie den ältesten sehr merkwürdigen hethitischen Entstehungsmythos der »Königin von Neshu mit ihren 30 Söhnen und 30 Töchtern«: Danach hat es den Anschein, als sei ein Stamm der Hattier (deren Sprache übrigens völlig isoliert ist und bis heute nicht verstanden wird) von altindoeuropäischen Einwanderern unterdrückt und versklavt worden, die den

Unterdrückten ihre (indoeuropäische) Sprache als Kreolsprache aufkrotyierten. So wurden die Sprecher des Hattischen zu Kreolsprecher des Hethitischen. Und als sie sich dann befreien konnten, behielten sie dieses Kreol-Hethitische bei, waren aber ethnisch Hattier. Und eroberten einen großen Teil der damaligen Welt.

Antwort der Autorin Susanne Görke: Meines Wissens wird heutzutage immer noch davon ausgegangen, dass die Hethiter wohl um die Mitte oder in der zweiten Hälfte des 3. Jahrtausends v. Chr. nach Anatolien einwanderten und dort auf einheimische Bevölkerung, unter anderem die Hattier, stießen; ab zirka 1600 v. Chr. formierte sich der hethitische Staat, dessen Name Hattuša auf die bereits zu Beginn des 2. Jahrtausends dort lebenden Hattier zurückgeht. Hattisch als Sprache, die bislang nur in Grundzügen verständlich ist, dürfte spätestens im Lauf des 15. Jahrhunderts v. Chr. ausgestorben sein.

Das hethitische Reich lässt sich vorrangig als politisch-geografische Einheit verstehen, in der ethnische und sprachliche Elemente unterschiedli-



Ein Relief aus einer in Yazilikaya bei Hattuscha entdeckten Kammer repräsentiert vermutlich Unterweltgötter.

cher Herkunft verschmolzen. Diese Akkulturation der indogermanischen Hethiter dürfte also weit gehend friedlich verlaufen sein. Da es wohl keine militärische Unterwerfung der ursprüngli-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser
Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Dr. Gerhard Trageser,
E-Mail: redaktion@spektrum.de

Ständige Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer
Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

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

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

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,
Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht: Mannheim, HRB 33814

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

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

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit:
Dr. Markus Fischer, Dr. Ingrid Horn, Dr. Rainer Kayser,
Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,
c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80,
70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366,
E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

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, Gesamtanzeigenleitung: Michael Zehentmeier, 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. 36 vom 1.1. 2015.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung,

Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichkeit, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2015 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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



chen Bevölkerung gegeben hat, waren vermutlich unter anderem zahlreiche Hattier unter den hethitischen Staatsbürgern (ohne dass die Quellen darauf Hinweise lieferten; nicht zu vernachlässigen ist auch das luwische Element). Hethitisch war, zumindest in der Großreichszeit, vorrangig eine Verwaltungssprache, wobei es meines Wissens nicht als Kreolsprache gelten kann. Die Interpretation der Erzählung um die Stadt Neša mit ihrer Königin und den 30 Söhnen und Töchtern als Gründungsmythos oder Rechtfertigung für die Zerstörung von Zalpa wird heute diskutiert.

Am Ziel vorbei

Drei französische Experten dachten darüber nach, wie die Straßen der Zukunft beschaffen sein müssen (»Die Straßen der 5. Generation«, Juli 2015, S. 78).

Fabian Cundano Maltez, Erfurt: Für mich geht die Diskussion um Straßen 5.0 am eigentlichen Ziel vollkommen vorbei. Vielmehr sollten endlich Möglichkeiten zur Verkehrsreduktion erarbeitet und vor allem umgesetzt werden. Wenn man heutzutage Jogurt made in China aus originaler Alpenmilch weltweit kaufen kann, beim Bäcker um die Ecke vorgebackene Brötchen aus Vietnam in die Tüte bekommt, wenn immer mehr »Gigaliner« auf die Straßen entsandt werden und die Berufspendelei stetig zunimmt (von 2004 bis 2012 um elf Prozent laut Bundesamt für Statistik), dann erscheint eine Erörterung von »Straßenbau aus regional verfügbaren Ressourcen zur Vermeidung langer Transportwege« wie im Artikel als Lösungsansatz völlig fehlerhaft.

Es gibt Alternativen

»Spektrum«-Redakteur Michael Springer diskutiert die möglichen Folgen von TTIP für die europäische Forschungslandschaft (»Bedroht freier Handel die freie Forschung?«, Juli 2015, S. 16).

Rainer M. Bachmann, Kevelaer: Der Artikel von Herrn Springer hat mich be-

eindruckt, da er dort das höchst problematische Thema TTIP anspricht. Seine Befürchtungen und die der amerikanischen Wissenschaftler bestehen völlig zu Recht.

Das US-amerikanische System räumt der Wirtschaft höchste Priorität ein. Insofern ist es nur konsequent, dass dem dortigen Finanz- und Wirtschaftssystem sich auch die Wissenschaft unterordnet. Ein weiterer Ausbau dieser Dominanz der Wirtschaft in den USA ist durch die sehr national orientierten Republikaner zu erwarten.

Um unsere soziale Marktwirtschaft, die das Wohl der Menschen mit in den Vordergrund stellt, beneiden uns die aufgeklärten Amerikaner, die unabhängigen Wissenschaftler wie auch Vertreter der hohen politischen Eliten der Demokraten. Der Nutzen eines TTIP für Europa oder Deutschland konnte bislang nicht dargestellt werden. Der BDI musste einen Rückzieher machen und einräumen, falsche Vorteile publiziert zu haben.

Ein guter Entwurf eines unseren Grundideen entsprechenden Vertrags, der die europäischen Errungenschaften in Bezug auf Demokratie und Entscheidungsfreiheit, die demokratischen Gremien, persönliche Freiheit, Daten- und Verbraucherschutz transportieren soll, liegt seit Langem vor: das »Alternative Trade Mandate«. Dessen Umsetzung würde das in den vergangenen Jahrzehnten entwickelte europäische Modell zum Wohl der Menschen auf die andere Seite des Atlantiks »exportieren«.

Nach den Enthüllungen der vergangenen Jahre etwa zur Ausspähung von Politikern, hohen EU-Behörden und relevanten Industrieunternehmen kann selbst bei ausgeprägter Naivität nicht übersehen werden, dass die Gefahren durch das TTIP sehr konkret sind. Vage sind allenfalls die Vorteile, die von den Lobbyisten genannt werden.

Wichtiger Austausch

Zur Rubrik *Leserbriefe*

Christian Amling, Quedlinburg: Die Artikel von »Spektrum der Wissen-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

schaft« sind vielfältig und interessant. Wenn Spezialisten zu Themen wie Kosmologie, Hirnforschung, Teilchenforschung oder alter Geschichte schreiben, dann entsteht damit beim Leser nicht selten ein hoher Bedarf an Fragen oder auch Widerspruch.

Das ist normal in einer immer stärker vernetzten Welt der Informationsfülle. Manche Leser möchten daher mit den Autoren oder mit der Redaktion wechselwirken – sie schreiben Leserbriefe.

Ich finde diesen Austausch zwischen Medium und Leser sehr wichtig und inspirierend. Sonst käme man auf die Idee, dass hier irgendwelche Wahrheiten verkündet würden. Gerade von diesen »Wahrheiten« wimmelt es aber in unserer Zeit allorten.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

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

ALTERN IST NICHTS FÜR FEIGLINGE

VON KYLE L. WILSON UND ANDREW B. BARBOUR

»In meinem ganzen Leben habe ich das noch nie ...« Die Finger des Arztes zitterten ein wenig, als er die Instrumente ablas. »Ihr Sohn wird sterben.«

Tränen strömten über das Gesicht der Mutter. Sie hielt ihr Neugeborenes fest. »Was soll das heißen, er wird sterben? Wie... wie lange dauert das?«

Der Arzt zögerte. »Vielleicht 100 Jahre. Aus irgendeinem Grund haben die genetischen Implantate nicht gewirkt.« Er rief ein mehr als 1000 Jahre altes Dokument aus der Datenbank der Craig-Venter-Labors auf und fand schließlich die gesuchte Stelle. »Kontinuierlich schrumpfende Telomere. Er wird altern und schließlich Krebs bekommen. Sein Körper wird versagen. Wir haben so etwas seit dem Ende der Sterblichkeitsära nicht mehr gesehen.«

Mit zusammengebissenen Zähnen stieß sie hervor: »Wissen Sie eigentlich, wie viele Jahrhunderte es gedauert hat, die Genehmigung für ein Kind zu bekommen? Und jetzt das... Er ist wie... wie einer unserer Hunde!«

Rosalind war dem Sterblichen gefolgt, seit er vor sechs Monaten die Stadtmaschine verlassen hatte. Während Michaels Reise waren die beiden allerdings nicht wirklich allein: Die Welt sah zu, fasziniert von seiner Entscheidung, das sichere Zuhause zu verlassen. Rosalind filmte Michaels Aben-

teuer, denn sie erhoffte sich davon einen Karriereschub auf dem stagnierenden Arbeitsmarkt.

»Michael hat ein einzelnes graues Haar bekommen. Er ist so anders! Die Fans werden durchdrehen, wenn sie das sehen. Unser aktualisierter ›Zeitplan‹, wie er es nennt, zeigt, dass wir wochenlang völlig von der Welt abgeschnitten sein werden. Er möchte irgendeinen Berg im so genannten Himalaja besteigen. Und anschließend geht es nach Europa!«

Ihr Chef fragte verblüfft: »Europa? Ach so, natürlich, er möchte den Jupitermond besuchen...«

»Nein, den Kontinent! Ich verstehe das auch nicht.«

»Was zieht ihn zu diesem schrecklichen Ort? Seit den Überschwemmungen ist es dort menschenleer. Rosy, das ist eine einmalige Story. Können Sie sich in den letzten Menschen versetzen, der jemals sterben wird?«

»Er sagt, er will damit zu seinen Wurzeln zurückkehren, Geschichte erleben. Aber ich glaube, er ist verrückt. Das wird mir zu viel, ich möchte versetzt werden.«

»Ausgeschlossen, Rosy. Niemand sonst würde es wagen, die Stadtmaschine zu verlassen. Wir brauchen Ihre Reportage für unsere Einschaltquote. Bleiben Sie dran, und ich befördere Sie schon in einem Jahrhundert.«

Trotz ihres Alters sah die Reporterin mädchenhaft aus, mit rosigen Wangen und blondem Haar – vor allem neben dem grauhaarigen, von der Sonne geerbten Mann. Das attraktive 400 Jahre alte Mädchen und der greise 90-jährige stapften durch den Wüstensand der Alten Welt.

Er grinste wie ein Irrer beim Anblick der Dünen. »Die Arabische Wüste. Hier hat Lawrence gekämpft, vor langer Zeit.«

Ein warmes Lächeln erfüllte ihre Züge mit jugendlichem Glanz; daraus sprach Vertrautheit durch jahrzehntelange Gemeinsamkeit. »Ich hatte keine Ahnung, dass es diesen Ort gibt. Michael, das ist atemberaubend!« Sie schwitzte und war durstig. In einiger Entfernung sah sie eine Schlange fortgleiten. Unmöglich, dachte sie, hier kann doch nichts überleben.

Sie kampierten unter dem Glanz der Milchstraße. Rosalind machte Feuer, wie sie es vor Jahren von Michael gelernt hatte. »Jahrhunderte«, dachte sie, »ohne dass ich je ein Feuer gemacht habe...«

Plötzlich fing Michael an zu husten. Seine einst kräftigen Beine zitterten, während er versuchte, aufrecht zu sitzen. »Rose, ich fühle mich schwach. So schwach wie nie.« Trotz seiner Selbstsicherheit klang er besorgt.

Auch Rosalind machte sich Sorgen. Sie wusste nicht, wie sie mit einem Sterbenden umgehen sollte. Niemand

wusste das mehr. »Michael, warum kehren wir nicht in die Stadt zurück...«

Eine körperlose Stimme unterbrach sie: »Rosy, wo sind Sie? Kein Bericht seit drei Monaten! Wir brauchen eine neue Reportage, wir können nicht weiter nur altes Material zeigen! Uns laufen die Zuschauer davon!«

Sie beherrschte sich aus Rücksicht auf ihren sterbenden Freund. »Das ist jetzt nicht wichtig, Chef. Ich zeichne unsere Beobachtungen auf und werde sie vorlegen, wenn wir zur Stadt zurückkehren.« Brusk unterbrach sie die Verbindung.

»Michael, wir müssen zurück. Wir sind jahrzehntelang nur immer weitergegangen. Du bist erschöpft.« Die Notlüge machte sie traurig. Was konnte sie sagen? Nur er wusste, wie es ihm ergehen würde – schließlich hatte er jahrelang verstaubte Bücher über Religion und Tod gelesen.

Nach der Rückkehr starb Michael im Krankenhaus, während Rosalind verzweifelt seine Hand hielt. In seiner letzten Stunde war die Welt bei ihm. Sein Tod wurde im ganzen System live übertragen, von der Erde bis zum Jupitermond Ganymed.

Die Zuschauer beobachteten seinen letzten Atemzug. Sie wussten nicht, was sie davon halten sollten, fragten sich, wohin er gehen würde. Verstört und

mit dem schleichenden Gefühl existenzieller Bedrohung wechselten sie den Sender.

»Willkommen im Amt für Aufnahmen und Bewerbungen, womit können wir dienen ... Oh! Rosalind! Mir hat Ihre Arbeit über Michael so sehr gefallen.«

Nach ein bisschen freundlichem Geplauder fragte Rose nach den nötigen Formularen. »Ich möchte mich um ein Kind bewerben.«

Mit leichter Hand ließ sie den Schreibstift über die Seiten tanzen. Sie hörte den Sachbearbeiter zustimmend murmeln, während er prüfend in ihrem Antrag blätterte.

»Ein Mädchen also? Großartig, sie wird sicher so abenteuerlustig wie ihre Mutter!«

Er las weiter. »Oh, hm ... Wie ich hier sehe, haben Sie die Verzichtserklärung ausgefüllt, mit der Sie genetische Implantate ablehnen. Komisch, das erlebe ich jetzt schon zum vierten Mal in dieser Woche.«

Sein Stift kitzelte eine Anmerkung. »Nun, der Antrag ist in Ordnung, aber ich bin gesetzlich verpflichtet, Sie vor dieser Entscheidung zu warnen. Sie wissen wohl am allerbesten, welche schwere Behinderung Ihr Kind erwartet.«

Rosalind dachte mit warmen Gefühlen an die letzten Tage mit Michael und nickte zustimmend. 🪐

DIE AUTOREN

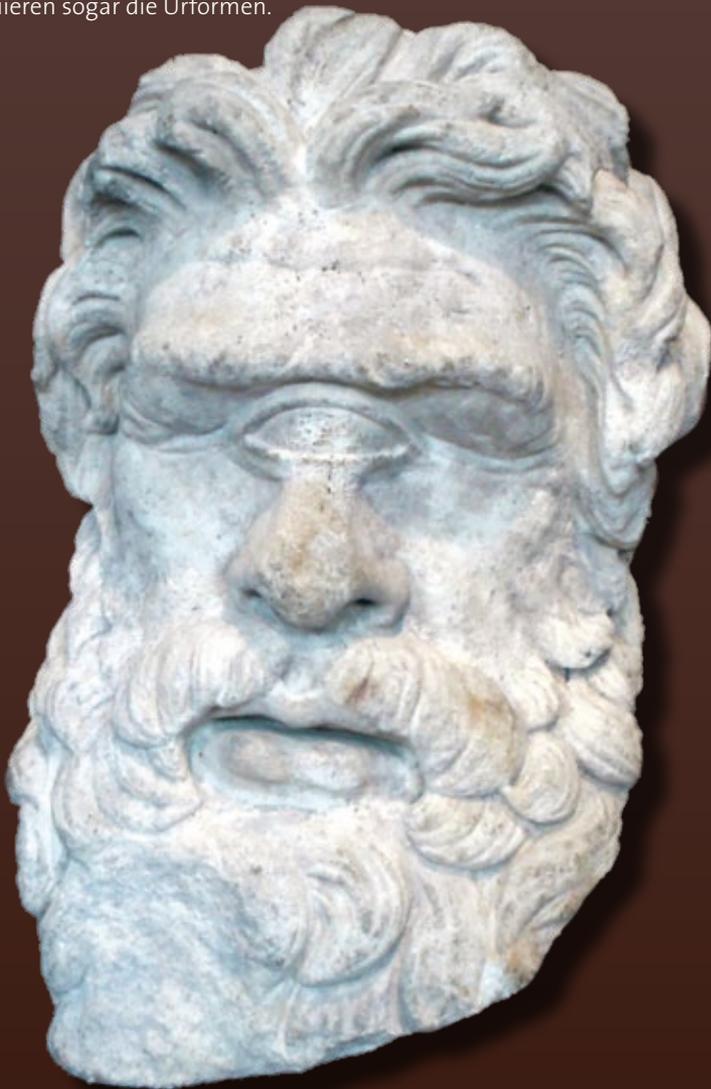
Kyle L. Wilson studiert Ökologie und Evolutionsbiologie an der University of Calgary (Kanada). **Andrew B. Barbour** promovierte in Fischereiwissenschaft an der University of Florida in Gainesville und arbeitet jetzt als wissenschaftlicher Mitarbeiter für Geburtshilfe an der Medical University of South Carolina in Charleston.

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 512, S. 226, 14. August 2014

Der Stammbaum der Mythen

Anthropologen und Ethnologen analysieren Märchen, Mythen und Sagen – und stoßen auf erstaunliche Entwicklungslinien. Mit Algorithmen aus der Genetik verfolgen sie die Evolution der »Mythenfamilien« (etwa jene des einäugigen Zyklopen »Polyphem«) bis in vorgeschichtliche Zeit und rekonstruieren sogar die Urformen.



CAPTMONDO / PUBLICDOMAIN (MARMORKOPF LUM. ISO VORCHR.)

Raffinierte Grippeviren

Gegen viele Viren, die uns infizieren, bilden wir eine lang anhaltende Immunität aus. Bei Grippeviren allerdings erweist sich dieser Mechanismus als wenig nachhaltig. Sie treten in ständig wechselnden Varianten auf – die der Körper oft mit vormals bewährten, jetzt aber weit gehend wirkungslosen Antikörpern bekämpft.

Chemie mit Synthesemotivat

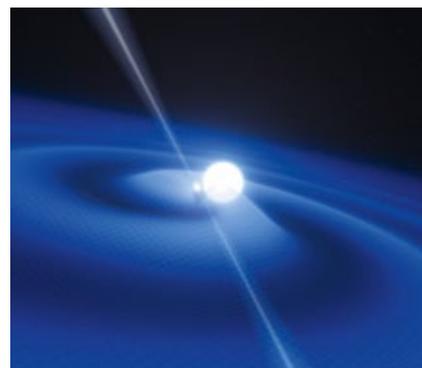
Eine Maschine, die selbsttätig kleine organische Moleküle zusammenbaut, verspricht Chemikern lästige Routinearbeit abzunehmen und könnte so unter anderem die Entwicklung neuer Medikamente drastisch beschleunigen.



ISTOCK / GALINA VELESEVA

Pflanzenzucht ohne Gentechnik

Modernste molekulare Analysen ermöglichen es, bereits anhand der Samen von Kulturpflanzen ihre späteren Eigenschaften zu bestimmen. Auf diese Weise lassen sich recht schnell schmackhafte und dennoch haltbare Früchte züchten.



ESO / LUIS GALÇADA

Gravitationswellenjäger auf heißer Spur

Laut Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie können Raum und Zeit schwingen. Noch gelang es zwar nicht, diese Gravitationswellen direkt nachzuweisen, doch die Experimente dafür werden immer empfindlicher.

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

Quer&Denker

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



NEU

Gehirn&Geist

Wissen ist Kopfsache.

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

www.gehirn-und-geist.de/psyche



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