

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

LAND-
WIRTSCHAFT
Weinbau in
Zeiten des
Klimawandels

FEBRUAR 2016

BIOPHYSIK

Die schnellsten Bewegungen
von Lebewesen

ÜBERGEWICHT

Wenn die Darmflora
dick macht

INFORMATIK

Wie bringt man
Robotern Gefühle bei?

Die Wahrheit über Schwarze Löcher

Ein neues Super-Teleskop
überprüft die Vorhersagen
der Relativitätstheorie

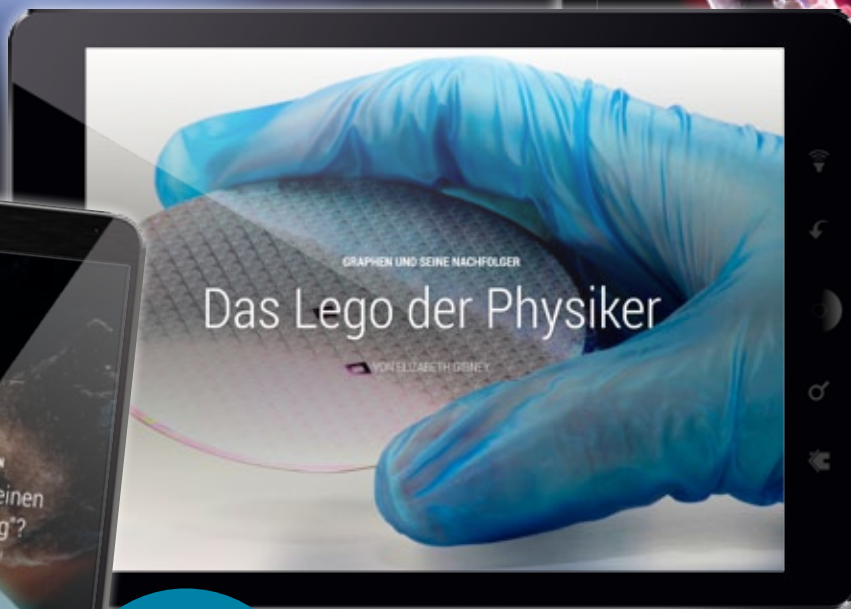


8,20 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E



Jetzt als Kombipaket im Abo: App und PDF

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur € 0,92 pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur € 0,69.



**JETZT
ABONNIEREN!**





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Auf und Ab eines Großprojekts

Man hat nicht oft die Gelegenheit, einen detaillierten Einblick in den Ablauf eines wissenschaftlichen Großprojekts mit all seinen Höhen und Tiefen zu bekommen. Beim Human Brain Project der Europäischen Kommission, das auf zehn Jahre ausgelegt ist und über eine Milliarde Euro verschlingen wird, ist das aber der Fall. Bereits vor fast dreieinhalb Jahren, im Septemberheft 2012, habe ich das Mammutvorhaben an dieser Stelle kurz vorgestellt; damals brachten wir einen ausführlichen Artikel des Projektleiters Henry Markram über seine Idee, ein menschliches Gehirn per Computer zu simulieren, um mehr über die Funktionsweise und Behandlungsmöglichkeiten für Erkrankungen zu lernen.

Im selben Heft stellte der Heidelberger Forscher Karlheinz Meier seine Arbeit an neuromorphen Computern vor: Er entwickelt quasi umgekehrt analoge Rechner nach biologischem Vorbild. Jenseits von »Spektrum« gingen solche alternativen Forschungsrichtungen, die ebenfalls unter dem Dach des Human Brain Project laufen, in der allgemeinen Berichterstattung leider unter. Alles fokussierte sich auf das Selbstvermarktungsgenie Markram, dessen Simulationsansatz fälschlicherweise mit dem Gesamtprojekt gleichgesetzt wurde.

Zwei Jahre darauf, in der Septemбераusgabe 2014, konnten unsere Leser wieder über das Human Brain Project in »Spektrum« lesen, diesmal aber unter wesentlich kritischeren Vorzeichen. In der Zwischenzeit hatte sich nämlich beträchtlicher Unmut unter den Neurowissenschaftlern angesammelt. Dieser war im Juli 2014 in einem offenen Brief von 154 Forschern an die Europäische Kommission kumuliert, den danach noch hunderte weiterer Kollegen unterschrieben. Darin bemängelten sie das Management des Projekts sowie die undurchsichtige Vergabe von Forschungsgeldern und forderten eine grundsätzliche Neuorientierung. Vielen Forschern ging sogar das noch nicht weit genug: In unserem Heft 9/2014 geißelte Max-Planck-Direktor Nils Brose Markrams Vorhaben, das neuronale Netzwerk des Gehirns per Supercomputer nachzubauen, als vollkommen illusorisch.

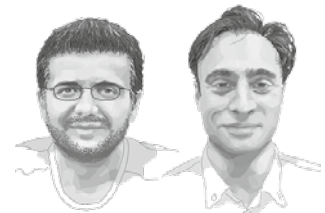
Die breite Kritik zeigte Wirkung: Es begann ein Mediationsverfahren, das im Frühjahr 2015 unter anderem die Führungsstruktur des Projekts umbaute. Damit scheint das Riesenvorhaben inzwischen auf einem besseren Weg zu sein. Doch wie konnte es überhaupt zu den Verirrungen kommen, dass offenbar ein einzelner Forscher mehr oder weniger nach Belieben ein europäisches Milliardenprojekt steuern und für sich vereinnahmen konnte? Um diese Frage zu beantworten, blickt »Spektrum« ab S. 58 hinter die Kulissen und beleuchtet kritisch die hineinspielenden politischen Interessen. Der Vergleich des EU-Megaprojekts mit der US-Konkurrenzinitiative BRAIN zeigt, wie sich solche Probleme vermeiden lassen. Es bleibt nun zu hoffen, dass daraus nicht nur für das Human Brain Project, sondern für sämtliche zukünftige »Big Science«-Unterfangen Lehren gezogen werden. Denn hier geht es nicht nur um den guten Ruf der Wissenschaft, sondern schlicht auch um einen verantwortungsvollen Umgang mit Steuergeldern.

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die Biologin **Sheila Patek** interessiert sich für ultraschnelle Bewegungen von Organismen. Ab S. 20 berichtet sie, wie Krebse, Insekten, Quallen und Pilze hier alle Rekorde brechen.



Der Astrophysiker **Dimitrios Psaltis** (links) untersucht Schwarze Löcher und Neutronensterne und entwickelt Tests für die Relativitätstheorie. **Sheperd Doleman** koordiniert das Team des Teleskopverbunds, mit dem Astronomen ein Schwarzes Loch direkt beobachten wollen (S. 40).



Pascale Fung ist Professorin für Computertechnik an der Hong Kong University of Science and Technology. Dort erforscht sie, wie Mensch und Maschine besser miteinander kommunizieren können (S. 80).

3 Editorial

6 Spektrogramm

Auf der Spur mysteriöser Radioblitze • Weckruf an schlummernde Krebszellen • Blaue Vogelspinnen • Diamantproduktion mit Lasern • Bioelektrische Tarnung bei Tintenfischen • Neue Moleküle für Quantencomputer

9 Bild des Monats

Ein Gerüst für neuen Knochen

10 Forschung aktuell

Verletzte Roboter

Künstliche Käfer lernen wieder laufen

Passkontrolle in der Zelle

Wie das Immunsystem RNA-Viren entdeckt

Ende des lokalen Realismus

Seltsame Gesetze der Quantenmechanik belegt

Erbe vom Neandertaler

Einige Neandertalergene in uns sind von Nachteil

Ein Sieg der Vernunft

Weltklimakonferenz findet gemeinsamen Weg

SPRINGER'S EINWÜRFE

Schnell von Begriff

Abstrahierende Computer

20



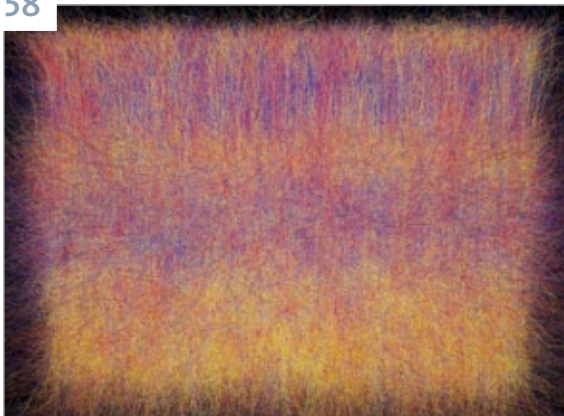
MIT FRDL. GEN. VON ROY CALDWELL

48



H. JOACHIM SCHLICHTING

58



BLUE BRAIN PROJECT (BBP) / EPFL 2015

BIOLOGIE & MEDIZIN

- ▶ 20 **Die schnellsten Bewegungen von Lebewesen**
Fangschreckenkrebs schlagen blitzartig und kraftvoll zu. Auch andere Organismen beherrschen ultraschnelle Bewegungen.
Sheila Patek
- ▶ 28 **Übergewicht durch Darmflora**
Bestimmte Bakterientypen im Darm fördern das Risiko für Adipositas, Diabetes und Arteriosklerose.
Philippe Gérard

34 Zellen in Flammen

Ein jüngst entdecktes Gebilde, das »Inflammasom«, spielt eine Schlüsselrolle bei allen Arten von Entzündungen.
Wajahat Z. Mehal

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

48 **Zwischen weißer Pracht und Schmutzskulptur**

Schnee schmilzt oft ungleichmäßig, und Verunreinigungen sammeln sich an. Beides hängt zusammen.
H. Joachim Schlichting

50 **Die Wirklichkeit der Natur**

Noch immer herrscht Uneinigkeit darüber, ob die von der Quantenmechanik beschriebenen Objekte »real« sind – oder ist die Frage nach deren Wirklichkeit schlicht sinnlos?
Michael Springer

MENSCH & KULTUR

58 **Streit ums simulierte Gehirn**

Ein Großprojekt soll das menschliche Gehirn im Computer nachbilden. Schon kurz nach dem Start äußerte die Forschergemeinde massive Kritik. Was lief schief?
Stefan Theil

40 Wie vermisst man ein Schwarzes Loch?

Dimitrios Psaltis und Sheperd S. Doeleman

Mit einem gigantischen Netzwerk aus Teleskopen wollen Astronomen Schwarze Löcher jetzt erstmals direkt beobachten – und prüfen, ob die Regeln der allgemeinen Relativitätstheorie auch in nächster Nähe der Singularität noch gelten.

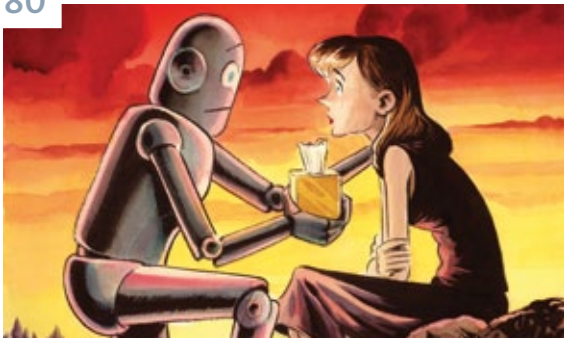


72



ROBERT SINSKEY VINEYARDS

80



ZOHAR LAZAR

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

66 Undigitale Computer

Was wäre, wenn ein Rechner die Eigenschaften der reellen Zahlen in vollem Umfang nutzen könnte?

Jean-Paul Delahaye

ERDE & UMWELT

► 72 Der Pinot noir – ein Auslaufmodell?

Wegen der globalen Klimaerwärmung fürchten Winzer und Kellermeister um die Zukunft der Qualitätsweine. Denn durch die steigenden Temperaturen verändern sich Aroma und Zuckergehalt der Trauben.

Kimberly A. Nicholas

TECHNIK & COMPUTER

► 80 Roboter mit Gefühlen

Um uns den Umgang mit »intelligenten« Maschinen zu erleichtern, bringen Forscher ihnen bei, Emotionen zu verstehen und zu simulieren.

Pascale Fung

85 Wissenschaft im Rückblick

Von der Bedeutung der Schädelnaht zur Rückseite des Mondes

86 Rezensionen

Armin Eich: Die Söhne des Mars • *Adalbert Pauldrach*: Das dunkle Universum • *Martin Kuckenburg*: Eine Welt aus Zeichen • *Andreas Wagner*: Arrival of the Fittest u. a.

94 Leserbrief/Impressum

96 Futur III

H.E. Roulo: Der springende Punkt

98 Vorschau

Titelmotiv: NASA / JPL – Caltech
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

ASTRONOMIE

Auf der Spur mysteriöser Radioblitze

Erstmals haben Astronomen die Herkunft eines »Fast Radio Burst« (FRB) genauer eingegrenzt, eines Radiowellenausbruchs im Kosmos. FRBs gehören zu den stärksten bekannten Radioquellen. Sie dauern wenige tausendstel Sekunden, treten einmalig auf und enthalten ein breites Spektrum von Frequenzen. Woher sie stammen und wie sie entstehen, ist weitgehend unbekannt. Man vermutet, dass ihr Ursprung außerhalb der Milchstraße liegt.

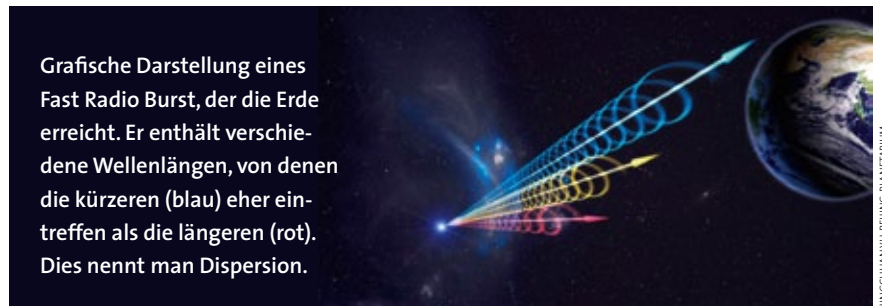
Die Forscher um Kiyoshi Masui von der University of British Columbia (Kanada) haben Messdaten des Green-Bank-Radioteleskops auf Anzeichen von FRBs durchsucht. Tatsächlich stießen sie in den aufgezeichneten Daten auf ein solches Ereignis. In welcher Entfernung es seinen Ursprung hatte, konnten die Astronomen aus der so genannten Dispersion

ermitteln, der frequenzabhängigen Verzögerung des Radiosignals durch freie Elektronen im interstellaren Raum. Die Dispersionswerte lassen darauf schließen, dass der neu entdeckte FRB einer Region entstammt, die etwas weniger als sechs Milliarden Lichtjahre entfernt liegt.

Wie die Daten weiter zeigen, war die Polarisationssebene der Radiowellen stark gedreht. Demzufolge muss der Radiopuls kurz nach seiner Aussendung starke Magnetfelder durchquert

haben. Zusätzliche Analysen ergaben, dass die Wellen auf dem Weg zu uns zwei verschiedene Regionen ionisierten Gases passierten. Eine davon war nach kosmischen Maßstäben nah an der Radioquelle – vermutlich in derselben Galaxie. Der Puls ist somit nahe einem dichten interstellaren Nebel oder unweit des Zentralbereichs der Herkunftsgalaxie entstanden. So detaillierte Angaben über einen Fast Radio Burst waren bisher nicht möglich.

Nature 10.1038/nature15769, 2015



Grafische Darstellung eines Fast Radio Burst, der die Erde erreicht. Er enthält verschiedene Wellenlängen, von denen die kürzeren (blau) eher ein treffen als die längeren (rot). Dies nennt man Dispersion.

JINGCHUAN YU, BEIJING-PLANETARIUM



Mehr Aktualität!

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

ONKOLOGIE

Weckruf an schlummernde Krebszellen

Tumorzellen, die in Knochen eingewandert sind, bleiben dort oft lange Zeit inaktiv. Doch Monate oder Jahre später können sie »aufwachen«, sich teilen und Sekundärtumoren (Metastasen) hervorbringen. Forscher um Peter Croucher vom Garvan Institute of Medical Research (Australien) haben nun herausgefunden, wie es dazu kommt – zumindest bei Mäusen. Demnach werden schlummernde Krebszellen von knochenresorbierenden Zellen geweckt: den Osteoklasten.

Das Team infizierte Mäuse mit Zellen des multiplen Myeloms, einer Krebserkrankung des Knochenmarks. Einige Tumorzellen wanderten in den Schienbeinknochen der Tiere ein. Dort verharrten sie in einem Ruhezustand, solange sie in enger Nachbarschaft zu Osteoblasten blieben – knochenbildenden Zellen. Wurden in ihrer Nähe

jedoch Osteoklasten aktiv, begannen sie Tumoren zu bilden.

Somit wird das Wachstum von Knochenmetastasen unterdrückt oder gefördert, je nachdem, ob jeweils Osteoblasten oder Osteoklasten dominieren. Beide Zelltypen wirken an der Regeneration des Skeletts mit. Daraus ergeben sich zwei mögliche medizinische Ansätze. Zum einen könnte man die Aktivität von Osteoklasten dämpfen, etwa mit Medikamenten gegen Osteoporose (Knochenschwund), um schlummernde Tumorzellen nicht zu wecken. Zum anderen könnte man das genaue Gegenteil tun – die Osteoklasten anregen und so die Krebszellen erst recht aktivieren. Das macht diese verletzlicher gegenüber konventionellen Krebstherapien, die auf sich rasch teilende Zellen abzielen.

Nat. Comm. 6, 8983, 2015

Vogelspinnen machen blau

Der Blauton einer Ornamentvogelspinne (*Poecilotheria metallica*).



Nanometergroße Strukturen können einen Farbeindruck erzeugen, wenn sie das Licht wellenlängenabhängig streuen oder reflektieren. Entsprechende Gebilde sind bei verschiedenen Organismen zu finden, etwa bei Vogelspinnen (Theraphosidae). In deren Evolution sind blau schimmernde, nanostrukturierte Haare mindestens achtmal unabhängig voneinander entstanden, wie Bor-Kai Hsiung von der University of Akron (USA) und seine Kollegen herausfanden.

Das Team analysierte Haarfarben und Verwandtschaftsbeziehungen bei zahlreichen Vogelspinnengattungen. Mit elektronenmikroskopischen Untersuchungen und Spektralanalysen zeigten die Forscher, dass die Haare der Tiere einen sehr unterschiedlichen Aufbau im Nanometerbereich besitzen, aber trotzdem durchweg einen ähnlichen Blauton zeigen. Der Grund dafür ist unbekannt, zumal die Spinnen meist nachtaktiv sind und schlecht sehen.

Sci. Adv. 1, e1500709, 2015

Diamantenproduktion mit Lasern

Die Werkstoffwissenschaftler Jagdish Narayan und Anagh Bhaumik von der North Carolina State University (USA) haben ein neues Verfahren entwickelt, um Diamanten zu produzieren. Sie beschießen dünne Kohlenstofffilme auf einer Unterlage aus Glas oder Saphir mit kurzen Laserpulsen und erzeugen so eine stark unterkühlte Kohlenstoffschmelze. Wenn diese anschließend schlagartig wieder Zimmertemperatur annimmt, entsteht laut den Forschern eine bisher unbekannte Kohlenstoffvariante, der so genannte Q-Kohlenstoff. Darin sind die Atome überwiegend tetraedrisch angeordnet wie in Diamant und zum kleineren Teil wabenförmig wie in

Graphit. Das Material besitzt eine hohe Massendichte und ist ferromagnetisch wie Eisen.

Im Q-Kohlenstoff wachsen an winzigen Kristallisationskeimen Diamanten, berichten die Autoren. Je nachdem, welche Bedingungen man vorgebe, entstehe der Diamant als Körnchen mit der Größe von Nano- oder Mikrometern (milliardstel beziehungsweise millionstel Meter), in Form von Nadeln oder als monokristallines Blatt. Welches Produkt herauskommt, hängt davon ab, wie schnell der Kohlenstoff abkühlt und auf welchem Untergrund (Substrat) er platziert wird.

Bisherige Methoden, um Diamant zu erzeugen, erfordern hohe Drücke

und Temperaturen sowie spezielle chemische Umgebungen. Narayan und Bhaumik hingegen können ihren Prozess bei Zimmertemperatur und normalem Umgebungsdruck durchführen und benötigen weder Katalysatoren noch besondere chemische Umgebungen. Die Energie zum Schmelzen des Kohlenstoffs liefern bei ihnen Laserpulse einer Wellenlänge von rund 200 Nanometern und einer Dauer von einigen zehn Nanosekunden (milliardstel Sekunden). Hierfür lassen sich Lasergeräte nutzen, die unter anderem für Augenoperationen eingesetzt werden.

J. Appl. Phys. 118, 215303, 2015

VERHALTENS BIOLOGIE

Bioelektrische Tarnung bei Tintenfischen

Eine Art Erstarren hilft Tintenfischen, sich der Aufmerksamkeit von Haien zu entziehen. Die Tiere hören auf, sich zu bewegen, atmen weniger und bedecken Körperöffnungen und andere Partien mit ihren Armen. Das führt zu einer deutlichen Abschwächung ihres äußeren elektrischen Felds und mindert so das Risiko, von den Raubfischen entdeckt zu werden.



Gewöhnliche Tintenfische (*Sepia officinalis*) jagen Krebstiere und Fische, müssen sich ihrerseits aber vor Haien in Acht nehmen.

Christine Bedore von der Duke University (USA) und ihre Mitarbeiter spielten Gewöhnlichen Tintenfischen (*Sepia officinalis*) verschiedene Videos vor, darunter eines mit einem näher kommenden Hai. Die Kopffüßer reagierten darauf wie beschrieben. Herannahende Krabben hingegen lösten bei ihnen kein solches Verhalten aus.

Bioelektrische Felder entstehen bei Ionenaustauschprozessen, unter anderem bei Muskelkontraktionen im Zuge von Atmung und Herzschlag. Deshalb erzeugen Lebewesen um sich herum ein elektrisches Feld. Haie können es mit speziellen Sinnesorganen wahrnehmen, den Lorenzinischen Ampullen, und so auch versteckte Kopffüßer aufspüren. Durch das »Erstarren« schwächen Tintenfische ihr Feld aber um bis zu 90 Prozent ab, wie Bedores Messungen ergaben.

Dass die Tarnung funktionieren kann, zeigten weitere Experimente mit Kleinen Schwarzspitzenhaien (*Carcharhinus limbatus*) und Schaufelnasen-Hammerhaien (*Sphyrna tiburo*). Diese attackierten im Versuch eine Elektrode, die das elektrische Feld von ruhenden Tintenfischen simulierte. Ging von der Elektrode hingegen das Feld eines »erstarteten« Tintenfischs aus, bisßen die Räuber nur noch halb so oft zu.

Proc. R. Soc. B 10.1098/rspb.2015.1886, 2015

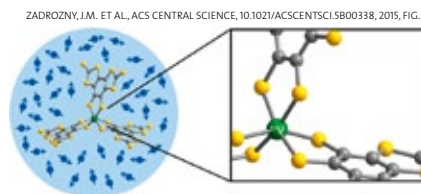
PHYSIK

Neue Moleküle fürs Quantenrechnen

Ein Quantencomputer führt seine Berechnungen mit Hilfe von Quantenobjekten aus, die in einer Überlagerung verschiedener Zustände existieren und zudem verschränkt sein können. Deshalb muss er seine Rechenschritte nicht nacheinander abarbeiten, sondern kann sie parallel durchführen – was seine Leistung immens steigert. Die Quantenobjekte verschlüsseln dabei Informationseinheiten namens Qubit. Wie gut sie sich für praktische Berechnungen eignen, hängt von ihrer Lebensdauer ab, der so genannten Kohärenzzeit. Meist wechselwirken sie schon nach kurzer Zeit mit der Umgebung, wobei sie alle nutzbaren quantenmechanischen Informationen verlieren.

Deshalb versuchen Wissenschaftler, Quantenobjekte zu finden, die sich als Qubits einfach manipulieren und

auslesen, aber auch möglichst lange speichern lassen. Ein Team um Danna Freedman von der Northwestern University (USA) hat nun spezielle chemische Verbindungen untersucht, die hierfür geeignet sein könnten. Es handelt sich um Komplexe aus einem zentralen Vanadiumion und drei Kohlenstoff-Schwefel-Gruppen als Liganden. Diese schirmen den Spin des zentralen Vanadiumions gut ab, so dass seine quantenmechanische



Drei Kohlenstoff-Schwefel-Gruppen (grau und gelb) schirmen ein zentrales Vanadiumion (grün) in Lösung (blau) ab.

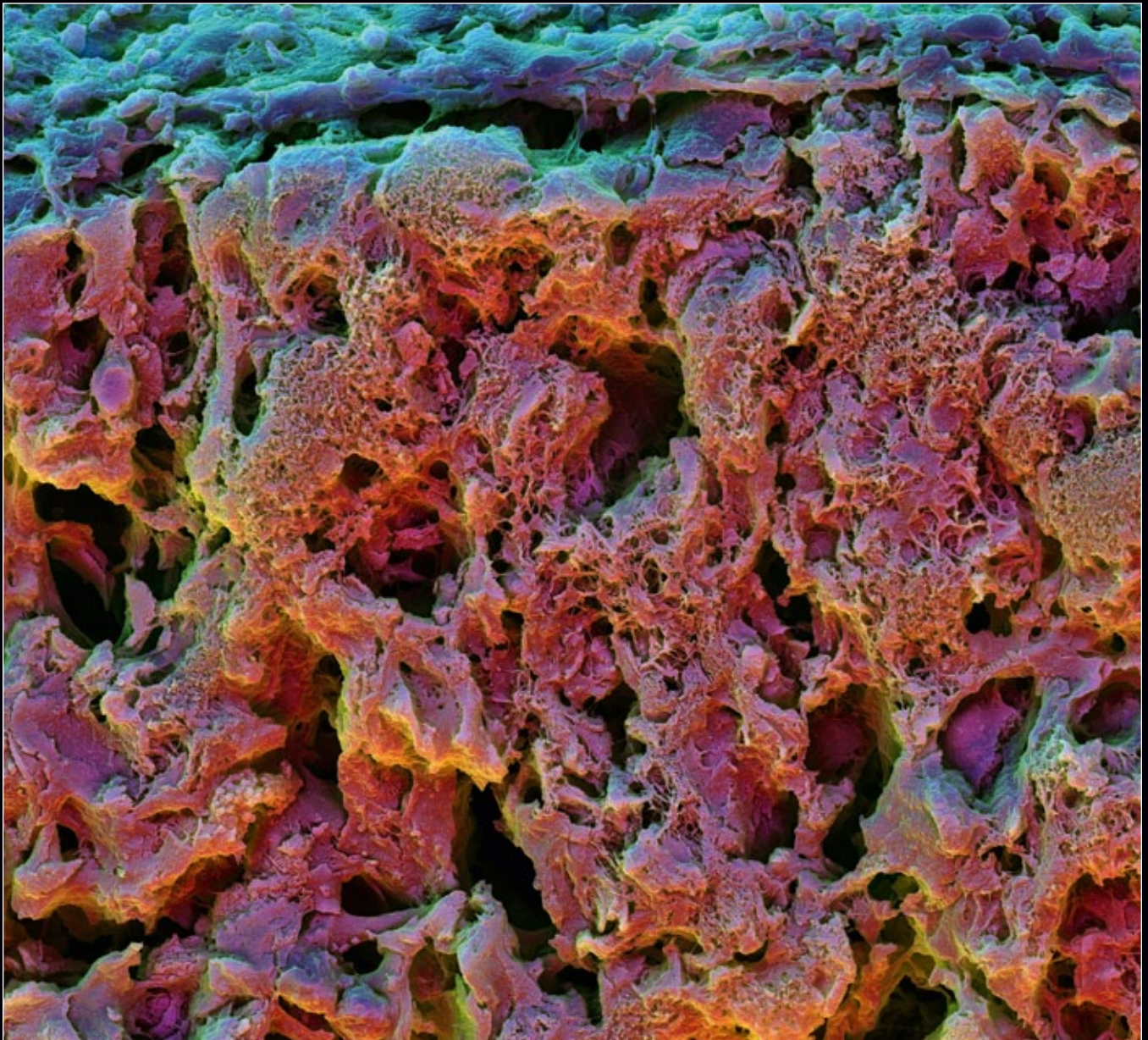
Information lange erhalten bleibt. Durch Modifizieren der Komplexe und Wählen eines geeigneten Lösungsmittels schafften es die Forscher, die Lebensdauer des Vanadium-Qubits bis auf 700 Mikrosekunden (millionstel Sekunden) zu steigern. Das ist das Zehnfache des bisherigen Rekords bei Komplexverbindungen. Die Forscher betonen, damit sei eine Grenze überschritten, ab der Quantencomputing praktisch möglich wird. Zwar erfordern derartige Kohärenzzeiten Temperaturen unterhalb von minus 260 Grad Celsius; zudem sind bei anderen Quantensystemen bereits längere Kohärenzzeiten erreicht worden. Doch zeigt die Arbeit neue Zugangswege zu diesem noch sehr experimentellen Gebiet auf.

ACS Cent. Sci. 10.1021/acscentsci.5b00338, 2015

EIN GERÜST FÜR NEUE KNOCHEN

Gewebe aus Stammzellen züchten Biomediziner gern auf Hydrogel. Oft bietet dieses Netzwerk aus Polymerketten aber nicht die richtigen mechanischen Eigenschaften, so dass in künstlichen Knochen beispielsweise auch Fettzellen entstehen. Forscher von der Harvard University haben nun eine Methode entwickelt, um die Elastizität von Hydrogel optimal einzustellen. Die eingefärbte elektronenmikroskopische Aufnahme zeigt eine solche Matrix, in der sich so genannte mesenchymale Stammzellen angesiedelt haben und dort besonders gut zu Knochen bildenden Osteoblasten differenzieren.

Nat. Mater. 10.1038/nmat4489, 30. November 2015



ROBOTIK

Verletzte Roboter lernen wieder laufen

Künstliche Käfer finden eigenständig Bewegungsformen, die auch nach einer Beschädigung funktionieren.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Gehen lernen ist schwer. Wir alle haben das als kleine Kinder schmerzhaft erfahren müssen. »Trial and error« heißt in diesem Fall, dass man ziemlich häufig auf die Nase fällt, bis man die ersten sicheren Schritte tut.

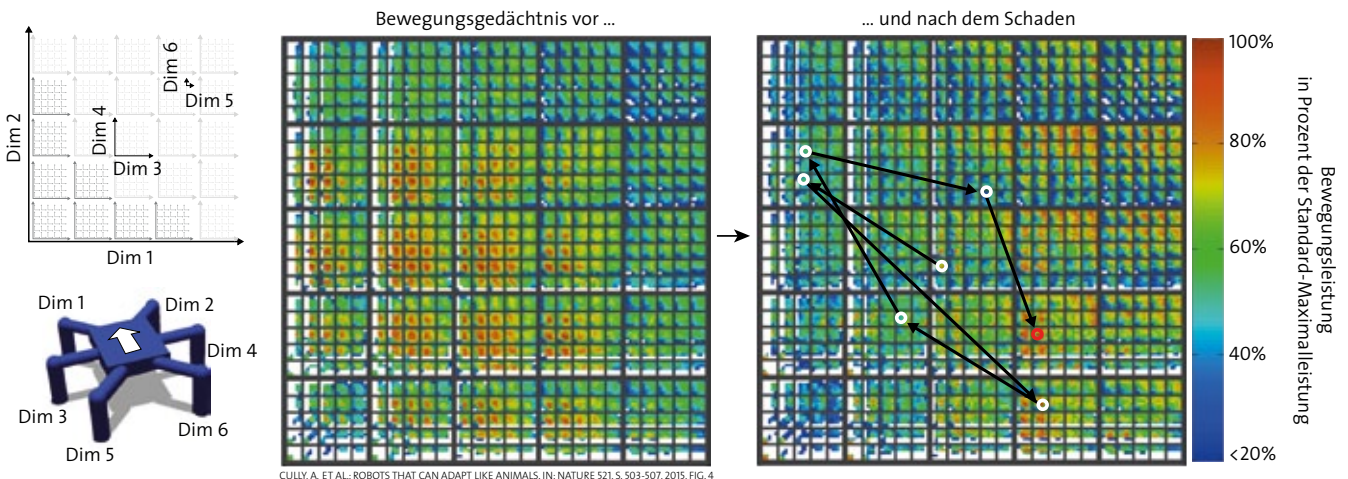
Ein Roboter dagegen kann laufen, sowie er aus der Fabrik kommt. Die zugehörige Folge von Befehlen, mit denen er die Motoren in seinen Beinen ansteuert, ist ihm werksseitig einprogrammiert worden, was ihm die mühsame Lernphase erspart. Wenn jedoch einer seiner zahlreichen Motoren ausfällt oder er in eine neuartige Umgebung gerät, ist er hilflos, es sei denn, sein Programmierer hätte für diese Situation Vorkehrungen getroffen.

Dagegen lernt ein Mensch nach relativ kurzer Zeit einigermaßen geschickt zu humpeln, wenn sein Bewegungsapparat einen Schaden erlitten hat, und findet auf Glatteis nach wenigen Fehlversuchen eine unfallfreie Fortbewegungsweise – jedenfalls weit schneller als damals beim Laufenerlernen. Einem Käfer gelingt es nach dem Verlust eines Beins binnen weniger Sekunden, mit einem neuen Bewegungsmuster davonzulaufen, was für sein Überleben möglicherweise entscheidend ist.

Es wäre also durchaus hilfreich, einem Roboter eine gewisse Lernfähigkeit mitzugeben, vor allem, wenn man ihn in eine Umgebung schicken möchte, in der mit Überraschungen zu rechnen ist und aus der man ihn schlecht zum Reparieren zurückholen kann – Mars zum Beispiel. Nun ist Lernen einem Roboter beziehungsweise dem Computer, der in ihm steckt, nicht grundsätzlich fremd. Das klassische Mittel, um aus vielen Erfahrungen zu lernen, sind die neuronalen Netze, die neuerdings in der »tiefen« Variante spektakuläre Erfolge verzeichnen können (Spektrum der Wissenschaft 9/2014, S. 62–67). Und Laufen mit beispielsweise fünf statt sechs Beinen ist mathematisch ohne Weiteres als Optimierungsaufgabe formulierbar: Finde diejenige Ansteuerung deiner Motoren, die dich in kürzester Zeit von A nach B bringt. Für Optimierungsprobleme aller Art gibt es eine Fülle von Computerprogrammen. Nur arbeiten sowohl neuronale Netze als auch Optimierungsalgorithmen typischerweise mit einer sehr großen Anzahl von Lösungsversuchen. Um die alle durchzuprobieren, hat ein beschädigter oder gestrandeter Roboter im Allgemeinen nicht genug Zeit und Energie zur Verfügung.

Hier lohnt es, von der Natur zu lernen. Antoine Cully, Danesh Tarapore und Jean-Baptiste Mouret vom Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) an der Université Pierre et Marie Curie in Paris sowie Jeff Clune vom Fachbereich Computer Science der University of Wyoming in Laramie haben das mit zwei verschiedenen Robotertypen durchexerziert, mit bemerkenswertem Erfolg (*Nature* 521, S. 503–507, 2015).

Was die Lösung des Optimierungsproblems so quälend langsam macht, heißt unter Fachleuten »der Fluch der Dimensionen«. Es gibt einfach zu viele Zahlenwerte, an denen man drehen kann. Dabei sind die insektenartigen Laufroboter des Pariser Instituts nicht übermäßig kompliziert gebaut. An jedem der sechs Beine sitzen drei Stellmotoren, und derjenige, der das »Kniegelenk« bewegt, führt gar kein Eigenleben, sondern dient nur dazu, das letzte Beinglied (den »Unterschenkel«) senkrecht zu halten. Aber zu bestimmen, in welchen Zeitintervallen die anderen zwölf Motoren wie aktiv sein sollen, erfordert insgesamt 36 Zahlenwerte, selbst wenn man den Roboter auf ein Sortiment relativ einfacher Bewegun-





ANTOINE CULLY / ISIR, UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Ein intakter sechsbeiniger Roboter läuft dank seiner Stereokamera und dem eingebauten Computer mühelos auch über unebenes Gelände.

gen einschränkt. Wollte man dem künstlichen Käfer jede technisch mögliche Bewegungsform freistellen, würde das Optimierungsproblem über jede handhabbare Größe hinauswachsen.

In die Beschränkung auf diese 36 Werte ist das eingeflossen, was Fachleute »Weltwissen« nennen: Die Designer sind zu der Überzeugung gekommen, dass es der Mühe nicht wert sei, jenseits der Funktionenklasse, die durch die 36 Parameter beschrieben wird, nach Bewegungsformen zu suchen. Aber selbst bei dieser relativ bescheidenen Anzahl schlägt der Fluch der Dimensionen zu.

Üben mit albernem Gangarten

Es geht darum, in einem 36-dimensionalen Raum (dem »Lösungsraum«) einen Punkt zu finden, an dem die Zielfunktion, zum Beispiel die Laufzeit von A nach B, einen minimalen Wert an-

nimmt. Wenn es nicht die optimale, sondern nur eine hinreichend schnelle Bewegung sein soll, gibt es vielleicht ganze Regionen im Lösungsraum, in denen die Zielfunktion unterhalb einer vorgegebenen Schranke liegt. Leider sind diese immer noch äußerst mühsam zu finden, denn je höher die Dimension des Raums, desto eher verläuft man sich darin, und an eine erschöpfende Durchmusterung ist überhaupt nicht zu denken.

Wie bewältigt dann ein Mensch oder Käfer eine Situation, in der ein Roboter lange optimieren müsste oder sogar scheitern würde? Er verfügt über Vorerfahrung über ein werksseitig eingebautes Laufprogramm hinaus. Beim Gehen lernen durch Versuch und Irrtum hat er sich, mehr oder weniger spielerisch, eine große Vielfalt von Gangarten angeeignet. Die allermeisten davon

Ein künstlicher Käfer, der ein Bein verliert, muss seine Erinnerungen über die Brauchbarkeit gewisser Gangarten revidieren. Sein »Gedächtnis« ist durch ein quadratisches Schema dargestellt. Jeder der sechs Parameter, die eine Gangart beschreiben, kann nur fünf verschiedene Werte annehmen. Die 5 mal 5 Kästchen des Schemas stehen für Wertepaare der ersten zwei Parameter, die kleinen Kästchen innerhalb der größeren für die Parameter 3 und 4 und die Pixel innerhalb jedes Kleinkästchens für die Parameter 5 und 6. So werden sechs Dimensionen – sehr grob – auf einem Quadrat untergebracht. Während des Lernprozesses verfärben sich viele Pixel in Richtung Blau, weil einst erfolgreiche Bewegungsweisen nicht mehr gut funktionieren. Nach etlichem Herumprobieren (Pfeile) findet der Roboter eine unter Schadensbedingungen optimale Bewegungsweise.



ANTOINE CULLY / ISIR, UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

sind nicht optimal oder sogar albern, aber eine von ihnen mag in einer neuen Situation sogar hilfreich sein. Wer sich als Kind einen Spaß daraus gemacht hat, auf einem Bein zu hüpfen, kommt im Bedarfsfall mit einem Gehgips besser zurecht.

Um ihren Robotern so etwas wie diese Kindheitserlebnisse zu verschaffen, hätten die Forscher aus Paris und Wyoming sie also auf die verschiedensten Weisen herumhampeln lassen müssen. Dabei hätten die Geräte sich zu jeder Bewegungsform gemerkt, wie schnell sie damit vorankommen, und vor allem, ob sie damit auf der Nase (Zweiheber) oder dem Rücken (Sechsbeiner) landen. An die Stelle der echten Übung setzten Cully und seine Kollegen die Zeit sparende und Material schonende Computersimulation.

Selbst auf diese Weise hätte sich ein künstlicher Käfer allerdings keinen repräsentativen Überblick über den 36-dimensionalen Parameterraum verschaffen können. Man begnügte sich mit einem sechsdimensionalen Teilraum, indem man den Käfer anwies, sich zu jeder Bewegungsform nur zu merken, für welchen Teil des Bewegungszyklus jeder Fuß im Kontakt mit dem Boden war.

Damit verläuft die »Kindheit« des künstlichen Sechsbeiners ungefähr so: Er probiert nach dem Zufallsprinzip eine Gangart aus – oder lässt sich dabei vom Simulationsprogramm vertreten –; dabei notiert er einerseits die Zeiten, die seine Füße im Kontakt mit dem Boden zubrachten, und andererseits, wie erfolgreich dieser Gehversuch war. In eine sechsdimensionale Tabelle (Schema links) trägt er an der Stelle, die den gemessenen Bodenkontaktzeiten entspricht, die Details der Gangart sowie eine Maßzahl für deren Erfolg ein. Steht an derselben Stelle der Tabelle schon ein Eintrag, so bleibt nur der erfolgreichere erhalten. Nach 40 Millionen Versuchen ist die Tabelle im Wesentlichen gefüllt, und das Käferkind verfügt über ein buntes Sortiment an zumindest irgendwie gangbaren Bewegungsweisen.

Wird der Roboter nun als »Erwachsener« mit einer neuen Situation, zum Beispiel dem Ausfall eines Beins, kon-

frontiert, so beginnt eine neue Lernphase. Aber die verläuft anders und vor allem wesentlich schneller, denn – so die entscheidende Grundvoraussetzung – die neue Situation ist nicht völlig verschieden von der alten. Also werden zumindest einige Bewegungsweisen aus der Kindheit noch irgendwie funktionieren. Diese sind als Ausgangspunkt für Optimierungsversuche brauchbar.

Wieder probiert der Käfer nach dem Zufallsprinzip herum, aber diesmal ist es ein gelenkter Zufall. Bemerkenswerterweise findet die Lenkung nach Prinzipien statt, die auch ein Mensch befolgen würde, der sich in einer neuen Situation wiederfindet, zu deren Bewältigung er nicht viel Zeit hat und die er kaum oder gar nicht durchschauen kann.

Es gilt, in dem sehr unübersichtlichen Lösungsraum – mit 36 Dimensionen, von denen man sich nur einen sechsdimensionalen Abklatsch gemerkt hat – einen Punkt zu finden, in dem die Zielfunktion einen minimalen oder wenigstens erträglich kleinen Wert an-

nimmt. Die Funktionswerte bilden ein verallgemeinertes Gebirge; aber immer nur abwärts zu gehen, um an einen tiefsten Punkt zu kommen, ist eine schlechte Idee. Dazu ist das Gebirge viel zu zerklüftet. Einige Punkte des Gebirges kennt man, das sind die bisherigen Versuche. Von anderen hat man aus den Kindheitserfahrungen eine vage Vorstellung, die wahrscheinlich inzwischen nur noch sehr ungefähr zutrifft. Was tun?

Der Algorithmus von Cully und seinen Kollegen bastelt sich aus den wenigen Informationen, die er hat, ein Bild des Gebirges zurecht. Dieses Bild ist einigermaßen deutlich da, wo er sich bereits auskennt, und umso unschärfer, je weniger er über die Umgebung weiß. Für den nächsten Versuch wählt er einen Punkt, der in diesem gedachten Gebirge möglichst tief liegt – soweit erkennbar.

Zwei Vorgehensweisen bieten sich an. Man sucht entweder die Umgebung bereits bekannter günstiger Punkte im abstrakten Lösungsraum ab, in der Erwar-

tung, in der Nähe guter Lösungen würden sich noch bessere finden lassen. Oder man erforscht gänzlich unbekannte Regionen des Raums, mit der Aussicht, dort vollkommen neue Lösungen des Problems zu entdecken. Es stellte sich heraus, dass es entscheidend auf den Kompromiss zwischen diesen beiden einander widersprechenden Prinzipien ankommt, also auf die richtige Mischung aus konservativ und risikofreudig.

Am Ende ist es wichtig, rechtzeitig mit Probieren aufzuhören. Dabei kann man sich entweder eine Zeit setzen, nach der man sich mit dem bisher Erreichten zufriedengibt, oder ein Ziel, zum Beispiel 90 Prozent der Geschwindigkeit aus gesunden Zeiten zu erreichen. Das klingt anspruchsvoll, aber den nur noch fünfbeinigen Robotern gelang es in Einzelfällen sogar, ihren intakten, mit einem Standardprogramm ausgestatteten Kollegen davonzulaufen.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

MOLEKULARBIOLOGIE

Passkontrolle in der Zelle

Ein chemisches Anhängsel hilft der angeborenen Immunantwort, körpereigene RNA vom Erbgut feindlicher Viren zu unterscheiden.

VON STEFANIE REINBERGER

Egal ob Parasiten, Pilze, Bakterien oder Viren – die angeborene Immunabwehr erkennt Krankheitserreger als fremde Eindringlinge und reagiert binnen weniger Minuten auf den feindlichen Angriff. Teilweise können die Komponenten dieser ersten Abwehrfront Erreger direkt beseitigen und so eine Infektion vereiteln. Daneben alarmiert die angeborene Immunantwort durch Botenstoffe auch Nachbarzellen, die noch nicht befallen sind. Außerdem ruft sie die Abwehrzellen der adaptiven Immunantwort auf den Plan, die den Erreger dann ganz gezielt bekämpfen sowie ein Immungedächtnis ausbilden, das später vor einer erneuten Infektion

mit dem gleichen Keim schützen kann. Diesem Gedächtnis ist es zu verdanken, dass man sich meist kein zweites Mal mit Masern oder Windpocken ansteckt. Auch bei Impfungen macht man es sich zu Nutze.

Den Feind erkennt das angeborene Immunsystem meist daran, dass er Moleküle besitzt, die im Körper in dieser Form nicht existieren, etwa anders aufgebaute Eiweißstoffe oder Zuckerketten. Bei Viren hingegen besteht ein besonders wichtiger Weg darin, deren genetisches Material als »unpassend« zu identifizieren. Das gelingt mal mehr und mal weniger: Viren mit einem Erbgut aus DNA wie etwa Herpesviren

bauen dieses einfach in das des Wirts ein, und schon können sie dort viele Jahre überdauern. Retroviren wie HIV besitzen zwar ein RNA-Genom, übersetzen dieses aber zwecks Vermehrung in DNA und schmuggeln sich so ebenfalls ins Erbgut des Wirts.

RNA-Viren, zu denen viele Erkältungsviren, aber auch gefährlichere Vertreter wie Influenza-, Ebola-, Dengue- oder Gelbfiebersviren zählen, können sich dagegen nicht im Wirtsgenom verstecken. Die angeborene Abwehr erkennt sie daher meist gut. Entsprechend lösen sie oft heftige Immunreaktionen und in der Folge schwere Krankheitssymptome aus. »Das gelingt etwa, weil

RNA-Moleküle an Orten in der Zelle auftreten, wo RNA im Normalfall nichts zu suchen hat«, sagt Martin Schlee, Biochemiker am Uniklinikum Bonn. »Oder weil sie in einer untypischen Form vorliegen, wie bei der doppelsträngigen RNA von Rotaviren, die gravierende Durchfallerkrankungen verursachen.«

In den meisten Fällen befindet sich virale RNA allerdings im Zellplasma. Da hier laufend neue Proteine entstehen, tummeln sich im Zytosol auch große Mengen unterschiedlichster körpereigener RNA-Moleküle. Jetzt hat Schlee zusammen mit Kollegen aus Bonn und Hamburg den genauen Mechanismus aufgedeckt, wie die Zellen RNA-Moleküle als »fremd« oder »eigen« identifizieren (*Immunity* 43, S. 41–51, 2015).

Schon 2004 hatten japanische Forscher zwei Rezeptormoleküle im Zytosol ausgemacht, die zentral sind für das Unterscheiden fremder und körpereigener RNA-Moleküle. Schlee und seine Kollegen begannen bald darauf, die Rolle eines dieser Rezeptoren, RIG-I (kurz für »Retinsäure-induzierbares Gen 1«), unter die Lupe zu nehmen. Dabei stellte sich heraus, dass RIG-I die Struktur jenes Endes des RNA-Strangs abtastet, an dem seine Produktion begann; Fachleute sprechen hier vom 5'-Ende.

Der erste Baustein (Nukleotid) neu gebildeter RNA weist eine so genannte Triphosphatgruppe auf – egal ob bei Virus, Pflanze oder Mensch. Diese kurze Kette aus drei Phosphatresten liefert

ein Erkennungssignal für RIG-I. Bei Eukaryoten, zu denen alle höheren Lebewesen gehören, heftet sich aber eine so genannte 5'-Cap-Struktur in Form eines Methylguanosins vorn an die Triphosphatgruppe. Sie verleiht dem wachsenden RNA-Strang Stabilität und wird zudem benötigt, damit neu gebildete RNA aus dem Zellkern ins Zytosol transportiert und in Proteine übersetzt werden kann. Lange Zeit war man außerdem davon ausgegangen, dass diese Struktur auch als Tarnkappe dient, damit RIG-I sie nicht erkennt.

Wettrüsten mit chemischen Modifikationen

Im Verlauf ihrer Evolution haben Viren jedoch verschiedenste Mechanismen entwickelt, um dem Immunsystem zu entkommen. So bauen einige Vertreter, etwa Reoviren, die Cap-Struktur von Eukaryoten nach. Manchmal erkennt das Immunsystem sie trotzdem, etwa weil sie die Kappe über biochemische Zwischenstufen aufbauen, die RIG-I ebenfalls als fremdartig identifiziert.

Die Wissenschaftler um Martin Schlee haben jetzt aber ein Merkmal entdeckt, mit dem RIG-I die Virus-RNA erkennt, selbst wenn diese eine Cap-Struktur nachahmt. Bei höheren Eukaryoten trägt das erste Nukleotid am Kopfende der RNA nämlich zusätzlich zu der »Kappe« ein weiteres chemisches Anhängsel an einer anderen Stelle: eine Methylgruppe. Diese verhin-

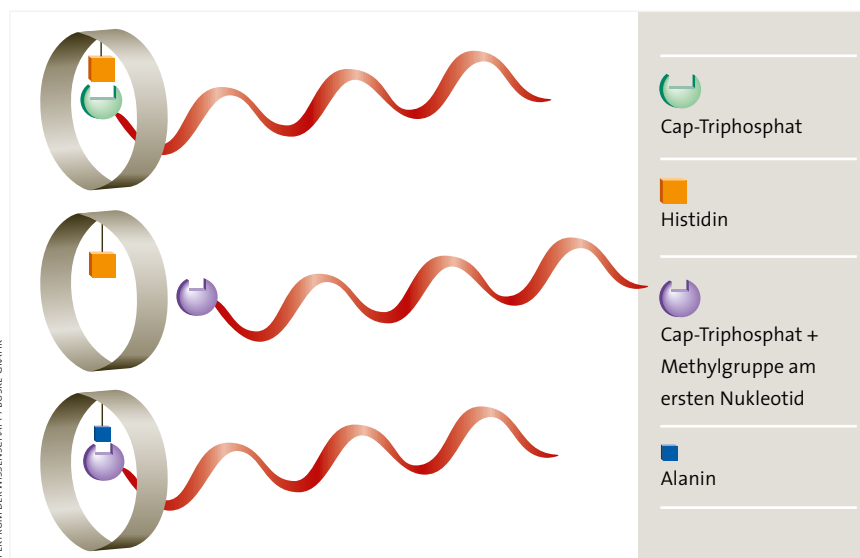
dert, dass sich RIG-I an den Anfang der RNA heftet. Denn daraufhin würde das Molekül Abwehrmaßnahmen einleiten, etwa die Ausschüttung von Botenstoffen wie Interferonen ankurbeln.

Als Beweis stellten die Forscher genetisch veränderte RIG-I-Moleküle her, bei denen die RNA-Kappe trotz Methylanhängsel in die entscheidende Bindungstasche passt. Hierfür änderten sie ein bestimmtes Histidin in RIG-I zu einem Alanin, das weniger Platz einnimmt und damit der Methylgruppe an der RNA den nötigen Raum gibt. Prompt waren die veränderten Rezeptormoleküle nicht mehr in der Lage, zwischen RNA von Eukaryoten und Viren zu unterscheiden – sie wurden nun auch von der RNA der Wirtszelle scharf gestellt (siehe Grafik).

»Interessanterweise ist dieser Mechanismus der Immuntoleranz der eigenen RNA hoch konserviert«, sagt Schlee. »Wir finden ihn bei Seeanemonen bis hin zum Menschen.« Die Art und Weise, mit der RIG-I Eindringlinge erkennt, entstand also bereits sehr früh in der Evolution. Das gab allerdings auch Viren die Zeit, neue Strategien zu entwickeln, um diese Kontrollinstanz an der Nase herumzuführen. So können etwa Flaviviren, zu denen beispielsweise die Erreger von Dengue- und Gelbfieber, aber auch das Hepatitis-C-Virus zählen, selbst Methylgruppen einbauen und tragen sogar den Bauplan für die notwendigen Enzyme im eigenen Genom. »Und Influenza ›klaubt‹ sich die schützende Methylgruppe regelrecht von zellulärer RNA«, fügt Schlee hinzu.

Die meisten Vertreter sind mit dieser Tarnung allerdings nur mäßig erfolgreich. Das heißt, ein Teil der Viren trägt die Methylgruppe, ein anderer nicht. »Sich vollständig vor dem Immunsystem zu verstecken, wäre für die

RIG-I erkennt das Kopf-(5')-Ende von RNA im Zellplasma – außer das erste Nukleotid der RNA trägt neben der Cap-Triphosphatstruktur auch eine Methylgruppe. Diese passt nur in die Bindungstasche, wenn dort statt Histidin ein Alanin sitzt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

meisten Viren auch nicht sinnvoll«, erklärt Schlee. »Es geht immer um die Balance: Das Virus will sich zwar möglichst gut vermehren, darf dabei aber den Wirt nicht so sehr schwächen, dass dieser stirbt, bevor es sich weiter ausbreiten konnte.«

Vorrangig wollen die Bonner Wissenschaftler die Prinzipien verstehen, nach denen das angeborene Immunsystem Viren im Zytosol möglichst effizient erkennt und dabei die eigene RNA ignoriert. Doch die Entdeckung könnte auch von medizinischer Relevanz sein. So

wäre es denkbar, bei einer bestehenden gefährlichen Infektion mit RNA-Viren so genannte Methyltransferase-Hemmer einzusetzen. Sie verhindern den Einbau der Methylgruppe in die virale RNA und vereiteln so den Tarnungsversuch der Eindringlinge. Die angeborene Immunantwort kann dann die feindliche RNA wiedererkennen und die adaptive Abwehr auf den Plan rufen.

Eine andere Anwendungsmöglichkeit wäre, gezielt und schnell Impfviren zu konstruieren, indem man sie so verändert, dass sie ihre RNA nicht mehr

tarnen können. Das angeborene Immunsystem würde diese dann besonders gut erkennen, was eine starke Virusabwehr nach sich zöge: Der Körper wäre gegen künftige Angriffe sicher gewappnet. Bislang erfolgt die Entwicklung von Impfviren über langwierige Verfahren, in denen die Erreger Schritt für Schritt abgeschwächt werden. Hier bräuchte der neue Ansatz einen klaren Vorteil.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Köln.

QUANTENPHYSIK

Das Ende des lokalen Realismus

Die Welt der Quantenmechanik passt oft nicht zu unserem Alltagsverständnis. Neue Experimente belegen erstmals ohne mögliche Schlupflöcher: Die seltsamen Effekte gibt es wirklich.

VON HOWARD WISEMAN

Die Vorhersagen der Quantenmechanik widersprechen den klassischen Naturgesetzen. Doch zunächst einmal ist sie nur eine Theorie. Wissenschaftler untersuchen seit Jahrzehnten, ob sich die Realität tatsächlich so seltsam verhält, wie einige der Gleichungen vorgeben.

Ein Team um Bas Hensen von der Technischen Universität Delft hat diese Frage jetzt eindeutig bejaht und bei seinem Experiment erstmals alle möglichen alternativen Erklärungen ausgeschlossen (*Nature* 526, S. 682–686, 2015). Die Forscher haben eine Ungleichung untersucht, die der nordirische Physiker John Bell (1928–1990) bereits 1964 veröffentlichte. Sie zeigt mathematisch die Unvereinbarkeit der Quantenmechanik mit den anschaulichen klassischen Naturgesetzen. Ein zentraler Begriff dabei ist der »lokale Realismus«. Bells Argumentation zufolge lässt sich eine Theorie anhand von zwei Konzepten einordnen. Einerseits kann sie »realistisch« sein: Ein Experiment enthüllt nur Eigenschaften der Welt, die zuvor schon existiert haben. Das trifft in der

Quantenmechanik nicht zu, da zunächst nur die Wahrscheinlichkeit berechnet werden kann, mit der ein Ereignis eintritt, und sich das System erst bei der Messung auf einen Wert festlegt.

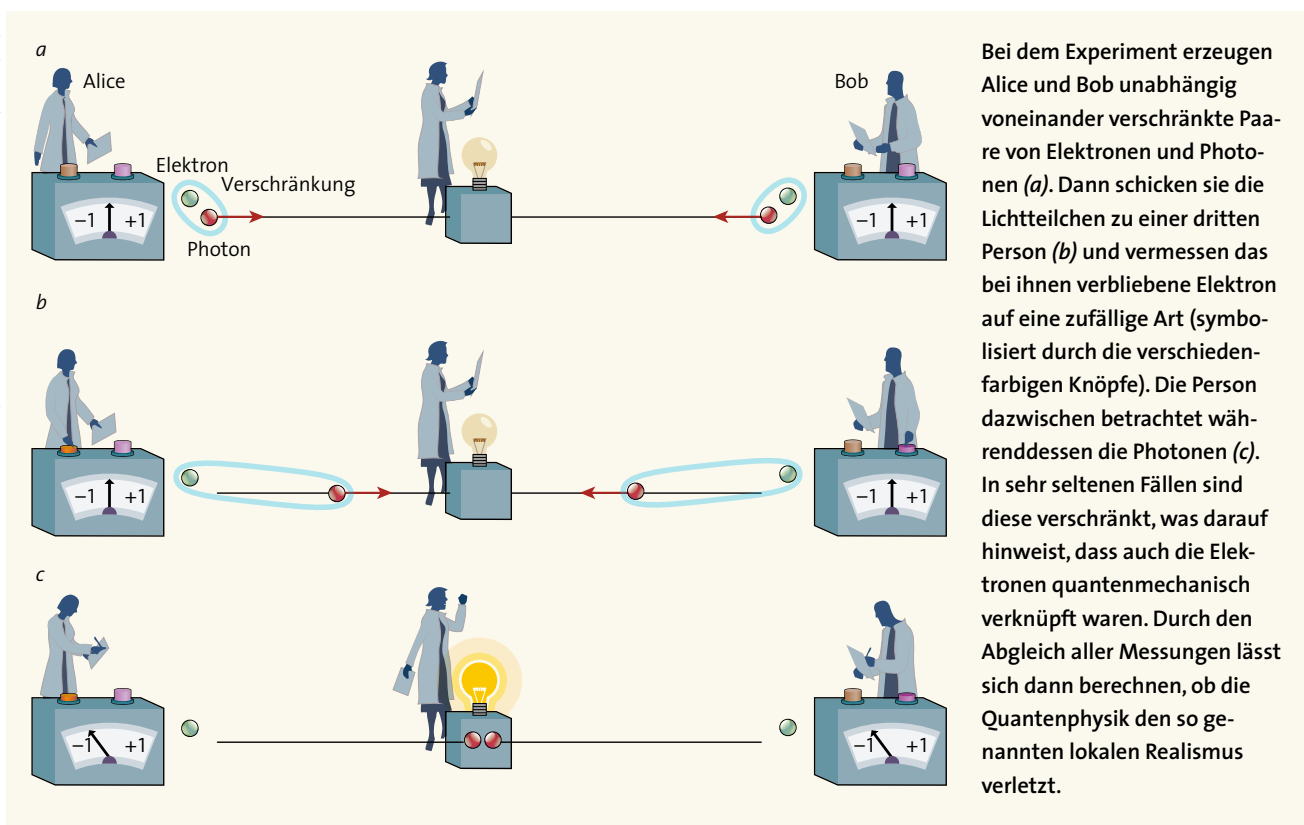
Gibt es die spukhafte Fernwirkung?

Als zweites Prinzip beschreibt die »Lokalität«, wann Veränderungen an einem Ort einen anderen beeinflussen können. Laut Einsteins Relativitätstheorie breitet sich Information nie schneller als das Licht aus. Zwei Dinge können nur dann kausal wechselwirken, wenn genügend Zeit ist, zwischen ihnen ein Signal auszutauschen. Doch in der Quantenphysik kann sich auch bei weit voneinander entfernten Teilchen die Messung des einen unmittelbar auf das andere auswirken – die Theorie ist nicht lokal.

Seit den 1960er Jahren studieren Physiker entsprechende Phänomene. So besteht eine mögliche Versuchsanordnung aus zwei Laboren in großer Distanz zueinander. In beiden befinden sich Instrumente, mit denen eine physikalische Größe gemessen wird, beispielsweise der Drehimpuls eines Teil-

chens, das an einem anderen Punkt entsteht. Die hypothetischen Forscher Alice und Bob bedienen die Geräte und wählen zufällig eine bestimmte Einstellung am Apparat aus, um den Spin zu messen. Diese Vorjustierung muss in der kurzen Zeitspanne geschehen, in der die Teilchen auf dem Weg zu Alice und Bob sind. Nur so können die beiden vollkommen ausschließen, dass ein Beobachter das Resultat des anderen beeinflusst. Die beiden notieren ihre Einstellungen und Versuchsergebnisse und berechnen daraus bestimmte mathematische Werte. Die Bell-Ungleichung liefert einen Zusammenhang zwischen den ermittelten Größen und gibt eine Grenze vor, die lokal-realistische Theorien nicht überschreiten dürfen. Sonst ist für das Experiment entweder die Annahme der Lokalität oder die des Realismus falsch.

Die Quantenmechanik sagt nun voraus, dass spezielle »verschränkte« Zustände die Bell-Ungleichung verletzen. Sie bestehen aus zwei verknüpften Teilchen, die sich nur als Einheit beschreiben lassen und diese Eigenschaft sogar



Bei dem Experiment erzeugen Alice und Bob unabhängig voneinander verschränkte Paare von Elektronen und Photonen (a). Dann schicken sie die Lichtteilchen zu einer dritten Person (b) und vermessen das bei ihnen verbliebene Elektron auf eine zufällige Art (symbolisiert durch die verschiedenfarbigen Knöpfe). Die Person dazwischen betrachtet währenddessen die Photonen (c). In sehr seltenen Fällen sind diese verschränkt, was darauf hinweist, dass auch die Elektronen quantenmechanisch verknüpft waren. Durch den Abgleich aller Messungen lässt sich dann berechnen, ob die Quantenphysik den so genannten lokalen Realismus verletzt.

dann beibehalten, wenn ein großer Abstand zwischen ihnen liegt.

Schon mehrfach haben Physiker mit solchen Objekten Versuche durchgeführt, in denen die Bell-Ungleichung nicht erfüllt war. Allerdings gab es immer Schlupflöcher – experimentelle Unsicherheiten, wegen derer sich nicht jede lokal-realistische Erklärung ausschließen lässt. Sind die beiden Labore etwa nicht weit genug voneinander entfernt, können die Orte Signale austauschen, bevor das Experiment beendet ist («Lokalitätsschlupfloch»). Die Detektoren registrieren auch nicht alle eintreffenden Teilchen. Einige lokal-realistische Theorien könnten dieses »Detektionsschlupfloch« nutzen und fälschlicherweise quantenmechanisch erscheinen (selbst wenn sie dafür reichlich exotisch sein müssten).

Mehrere Forschergruppen weltweit versuchten in letzter Zeit, mit einem Experiment alle denkbaren Schlupflöcher zu schließen. Hensen und seine Kollegen haben das Rennen dank eines trickreichen, erweiterten Versuchsaufbaus nun gewonnen. Bisher wurde

meist ein verschränkter Zustand erzeugt, und die Teilchen liefen an zwei weit entfernte Messstationen. Das niederländische Team fügte jetzt noch eine dritte Station hinzu (siehe Bild oben). Bei diesem Aufbau sind Alice und Bob 1,3 Kilometer voneinander entfernt. Jeder von ihnen erzeugt einen verschränkten Zustand aus einem Photon und einem Elektron. Sie fangen das Elektron in einem Diamantgitter ein und senden das Photon an eine dritte hypothetische Person. Diese arbeitet in einem Labor zwischen Alice und Bob, ungefähr 500 beziehungsweise 800 Meter von ihnen entfernt. Alice und Bob vermessen unabhängig voneinander auf zufällige, eindeutige Weise ihr Elektron. Durch diese spezielle Art der Messung konnte das Team aus Delft das Detektionsschlupfloch schließen. Die übernahm im Experiment eine Maschine. Die dritte Station untersuchte währenddessen die beiden Photonen. Alle Vorgänge mussten sich innerhalb weniger Mikrosekunden abspielen – schneller, als Alice und Bob direkt miteinander kommunizieren könnten.

Die Resultate von Alice und Bob sind prinzipiell voneinander unabhängig. In seltenen Fällen sind die beiden Photonen aber verschränkt – und somit auch die zugehörigen Elektronen. Nur solche Ereignisse wurden ausgewertet. Dann kann die zusätzliche Person die Bell-Ungleichung anhand der aufgezeichneten Werte von Alice und Bob prüfen. Wie sich bei den Experimenten von Hensens Team zeigte, ist der lokale Realismus deutlich verletzt.

Aufwändige Messungen mit klarem Ergebnis

Die Forscher verbanden dazu modernste Quantentechnologien, unter anderem schnelle Zufallszahlengeneratoren, die rasch genug die Messeinstellungen festlegen konnten. Eine große Herausforderung bestand darin, dass alle Geräte während der gesamten Laufzeit von 18 Tagen optimal funktionieren mussten. Die Anzahl der erfolgreichen Messungen – also die, bei der es zur Verschränkung kam – ist gering. Das passierte etwa einmal pro Stunde, insgesamt traten 245 solcher Ereignisse

auf. Die statistische Sicherheit reicht damit zwar aus, lässt sich aber durch weitere Versuche noch verbessern, wie die Autoren selbst anmerken. Das Team legte zwei unterschiedliche Analysen ihrer Daten vor. Beide kommen zum selben Resultat: Die Hypothese des lokalen Realismus gilt nicht für die Quantenmechanik.

Diese Erkenntnis hat inzwischen eine Gruppe um Lynden Shalm vom US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology in einem Experiment mit Photonen bestätigt (*arXiv:1511.03189, 2015*). In einem ebenfalls schlupflochfreien Aufbau konnten sie den lokalen Realismus so-

gar mit noch größerer Wahrscheinlichkeit ausschließen als die Physiker in Delft.

Der neue Zugang von Hensen mit Hilfe einer dritten, überwachenden Stelle könnte auch zu neuen Wegen führen, Quanteninformation abhörsicher zu übertragen – selbst wenn die Anwender ihren eigenen Geräten nicht vertrauen. Um das in die Praxis umzusetzen, müsste die Ereignisrate allerdings noch deutlich höher ausfallen.

Die große Bedeutung beider Versuche liegt in der Theorie: Sie schlagen den letzten Nagel in den Sarg des lokalen Realismus. Ein – fast metaphysisches – Schlupfloch bleibt zwar immer

noch: Im Grunde müssten die Resultate von Menschen statt von Maschinen reproduziert werden. Nur diese können die Messeinstellungen wirklich frei wählen und die Ergebnisse bewusst registrieren (»Freier-Wille-Schlupfloch«). Erst dann dürfte der Sarg auch endgültig begraben sein. So ein Experiment liegt allerdings noch in weiter Ferne.

Howard Wiseman ist Physikprofessor am Centre for Quantum Dynamics der Griffith University in Brisbane, Australien.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 526, S. 649–650, 29. Oktober 2015

PALÄOGENETIK

Zweischneidiges Neandertalererbe

Die Techtelmechtel unserer Vorfahren mit archaischen Menschen haben für den heutigen *Homo sapiens* Spätfolgen. Nicht alle davon sind von Vorteil.

VON EWEN CALLAWAY

Unsere Vorfahren hatten offensichtlich ein umtriebigeres Sexualleben: Sie bekamen gemeinsame Kinder mit Neandertalern, mit Denisovanern (auf deren Spuren Paläogenetiker in Fossilien aus dem Altai stießen) und anscheinend auch mit anderen archaischen Menschen. Erbgutuntersuchungen der vergangenen Jahre belegten zweifelsfrei die weit zurückliegenden Kontakte. Dabei erweist sich die uns eigene Neandertaler-DNA als höchst divers: Jeder Einzelne besitzt zwar nur sehr wenig davon, doch zusammengenommen könnten die Anteile verschiedener Menschen mehr oder weniger das halbe Erbgut unserer urzeitlichen Vettern ergeben (siehe SdW 10/2015, S. 28–35).

Um die Bedeutung der übernommenen DNA-Stücke aufzudecken, ziehen Forscher die umfangreichen Daten zu Genomanalysen von vielen Individuen heran. Dabei entpuppen sich manche der fremden Erbgutsequenzen als segensreich, andere als weniger wünschenswert. Die Auswirkungen reichen

von der Anpassungsfähigkeit an außer-afrikanische Umwelten bis hin zur Anfälligkeit für Krankheiten wie Asthma, bestimmte Hautleiden und vielleicht sogar Schwermut.

Höchstens zwei bis vier Prozent des Erbguts der meisten Europäer und Asiaten stammen von Neandertalern. Denisovaner-DNA macht bei Melanesiern und Australiern etwa fünf Prozent aus. Hinzu dürften Spuren weiterer früherer Menschenformen kommen, die Biologen in modernen Genomen zu erkennen meinen.

Wichtige Erbgutchnipsel

Einige der fremden Sequenzen unterscheiden sich ausgesprochen stark von den ureigenen des *Homo sapiens*, erläutert der Genetiker David Reich von der Harvard University in Boston (Massachusetts). Solche Abschnitte könnten daher trotz ihres geringen Anteils am Erbgut ins Gewicht fallen und durchaus vorteilhafte Merkmale bedingen. Reich gehörte zu der zweiten der beiden For-

scherguppen, die im Frühjahr 2014 kurz nacheinander je eine große Studie hierzu veröffentlicht haben (*Science* 343, S. 1017–1021; *Nature* 507, S. 354–357). Eines der Ergebnisse war, dass die Neandertalerversion bestimmter Gene die modernen Eurasier möglicherweise besser vor Wärmeverlust schützte und ihnen eine stärkere Behaarung beschert haben könnte als die, die sie aus Afrika mitgebracht hatten. Allerdings konnten die Forscher nicht ermitteln, inwieweit diese Gene dem *Homo sapiens* tatsächlich wesentlich nützten.

Um solche Unsicherheiten auszuräumen, nahmen sich die Evolutionsgenetiker Corinne Simonti und Tony Capra von der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee) Daten so genannter genomweiter Assoziationsstudien vor. Diese versuchen im Erbgut vieler Menschen Unterschiede zu finden, die mit bestimmten Merkmalen, insbesondere Krankheitsbildern oder risikoreichen Gesundheitszuständen, zusammenhängen könnten. Tausende von

DNA-Varianten wurden dafür bereits verglichen.

Simonti und Capra verwendeten anonymisierte Genomdaten und medizinische Befunde von 28000 Klinikpatienten. Sie achteten dabei speziell auf spezifische Neandertaler-Genvarianten und prüften, ob eine »fremde« Genversion mit Erkrankungen oder bestimmten medizinischen Diagnosen korrelierte, nicht aber die entsprechende *H. sapiens*-Version. Und tatsächlich sah es so aus, als bestünde bei bestimmten Neandertaler-Varianten ein leicht erhöhtes Risiko zum Beispiel für Osteoporose, Störungen der Blutgerinnung oder auch Nikotinsucht.

Außerdem suchten die Forscher nach Auswirkungen des Zusammenspiels vieler Genvarianten. Dabei stießen sie auf Beziehungen von Neandertaler-Sequenzen zu Depression, Übergewicht und einigen Hautleiden. Interessanterweise waren manche der fremden Varianten mit einem erhöhten, andere dagegen

mit einem verminderten Risiko für eine entsprechende Diagnose verknüpft. Im Juli 2015 stellte Simonti diese Ergebnisse auf einer wissenschaftlichen Tagung in Wien vor.

Stammt empfindliche Haut von Neandertalern?

Die betreffenden Neandertaler-Varianten würden sich allerdings nur ganz geringfügig auf die jeweiligen Erkrankungsrisiken auswirken, betont Capra – nicht anders also, als man es auch von den meisten *H. sapiens*-Varianten kennt. Der Befund, dass Neandertalergene an Hautkrankheiten beteiligt sein dürften – einschließlich sonnenbedingter Hautschäden –, passt immerhin zu einer früheren Beobachtung: Ihr zufolge könnten bestimmte Eigenschaften unserer Haut durchaus auf genetische Merkmale unserer Vorfahren zurückgehen.

Manchmal mag sich sogar die Bedeutung der fremden Gene mit der Zeit gewandelt haben. Im Zusammenhang

mit bestimmten Blutgerinnungsstörungen äußerten Simonti und Capra in Wien den Verdacht, womöglich seien diese Krankheiten auf Immungene von den Neandertalern zurückzuführen. Bei früheren Untersuchungen hatten Forscher dagegen spekuliert, dass der *Homo sapiens* dank Neandertalergenen leichter mit Krankheiten fertigwurde, auf die er fern von Afrika traf.

Auf derselben Tagung berichteten Michael Dannemann und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, die Gene für die so genannten Toll-ähnlichen-Rezeptoren (toll-like-receptors, TLR) vieler heutiger Menschen stammten von Neandertalern oder Denisovauern. Diese Moleküle des angeborenen Immunsystems erkennen Krankheitserreger und führen rasch eine gezielte, also erlernte Immunreaktion herbei. Die Forscher hatten zudem herausgefunden, dass kultivierte menschliche Zellen mit den archaischen genetischen

THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT: Spektrum KOMPAKT

€ 4,99
je Ausgabe

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



ISTOCK / ALEXSANDRIVELASEVIC

Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/kompakt

Hier QR-Code per
Smartphone scannen!



Computer mit rascher Auffassungsgabe

Ein neuer Algorithmus erkennt vielleicht sogar bald Sprachnuancen.

Schon Kinder sehen auf einen Blick, dass ein vierrädriges Spielzeug ein Auto darstellt, während etwas mit zwei Rädern wohl ein Fahr- oder Motorrad ist – und dass beides Menschen befördert. Ein noch so leistungsstarker Computer tut sich damit ungleich schwerer. Bis er eine bestimmte Klasse von Objekten halbwegs richtig erkennt, müssen menschliche Lehrer ihn lange trainieren, indem sie ihm Hunderte von Beispielen vorführen. Mit der Spontaneität und Flexibilität menschlicher Begriffsbildung kann bislang keine Maschine auch nur entfernt mithalten.

Wie schaffen wir es, Dinge augenblicklich zu identifizieren? Lässt sich ein Computer ähnlich schlau machen? Die Informatiker Brenden M. Lake von der New York University und Ruslan Salakhutdinov von der University of Toronto (Kanada) sowie der Kognitionsforscher Joshua B. Tenenbaum vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge präsentieren nun eine neue Methode dazu: bayessches Programmieren, kurz BPL (*Science* 350, S. 1332–1338, 2015).

Der von den drei Forschern entwickelte Algorithmus ermittelt bedingte Wahrscheinlichkeiten, wie sie der englische Mathematiker Thomas Bayes (1701–1761) erstmals vorschlug, um in die Abschätzung eines mutmaßlichen Resultats bereits gewonnenes Vorwissen einfließen zu lassen. Das Programm probiert mögliche Begriffe aus, indem es schon bekannte Informationen nutzt – etwa: Das Runde da ist wahrscheinlich ein Rad, ein Wagen hat meist vier Stück davon, also ist das Ganze vermutlich ein Auto.

Lake, Salakhutdinov und Tenenbaum prüften die Fähigkeiten des BPL anhand von knapp 2000 handgeschriebenen, kompliziert verschnörkelten und scheinbar beliebigen Fantasieschriftzeichen. Das Programm verfügte anfangs nur über eine kleine Datei von kurzen Linien und Kurven, konstruierte daraus aber im Alleingang – ohne menschliche Unterweisung – komplexe Symbole, verglich diese mit den Testbuchstaben und erlernte so blitzschnell das Schreiben der Fantasieschrift.

Das bayessche Lernprogramm erwies sich als derart effektiv, dass seine Schöpfer auf die Idee kamen, es in einer Art visuellem Turing-Test gegen menschliche Versuchspersonen antreten zu lassen. Wie sich dabei herausstellte, gelingt es dem Algorithmus beeindruckend schnell, vorliegende Zeichen zu gruppieren und auf diese Weise auch solche rasch zu entziffern, die undeutlich geschrieben sind. Vor allem jedoch vermag er selbst ein völlig unbekanntes Symbol abwechslungsreich, aber wiedererkennbar zu variieren. Bei solchen Aufgaben, die ein gutes Stück über die gängige Mustererkennung hinausgehen, schlug sich BPL nicht schlechter als menschliche Konkurrenten.

Nach Überzeugung der Forscher lässt sich ihr Algorithmus auch auf gesprochene Sätze anwenden. Derzeit macht die digitale Spracherkennung zwar Fortschritte – doch es bleibt enorm aufwändig, einer Maschine durch das geduldige Vorsprechen tausender Sätze ein Gespür für Gefühle beizubringen (siehe den Artikel ab S. 80). Ein Programm vom BPL-Typ könnte eine Datei von Phonemen und Silben nutzen, um daraus ganze Worte und Sätze zu bilden, und aus deren Varianten blitzschnell auf Stimmungsnuancen schließen.

Wäre ein solcher BPL-Roboter auch ohne monatelanges Training fähig, wie ein Mensch am Tonfall einer Aussage sofort zu erkennen, ob sie ernsthaft, witzig oder sarkastisch gemeint ist? Könnte er spontan einfühlsam antworten? Würde er den Turing-Test bestehen? Man mag diese Perspektive faszinierend oder gruselig finden – utopisch mutet sie nicht mehr an.



Michael Springer

schen Versionen dazu tendieren, mehr von den Rezeptoren zu bilden als Zellen mit *H. sapiens*-Versionen (<http://dx.doi.org/10.1101/022699>, 2015).

Frühere genomweite Assoziationsstudien hatten den vom Neandertaler stammenden Varianten der TLR-Gene die Eigenschaft zugesprochen, die Gefährdung durch eine Infektion mit dem Bakterium *Helicobacter pylori* zu vermindern, das Magengeschwüre verursachen kann. Anscheinend verstärken diese Immunproteine aber auch die Neigung zu Allergien. Viele Merkmale mögen noch vor 10 000 Jahren günstig gewesen sein und sind es heute nicht mehr, fasst der Populationsgenetiker Rasmus Nielsen von der University of California in Berkeley den Erkenntnisstand zusammen. Denn unsere Lebensführung und Ernährungsweise wie auch vieles andere hätten sich inzwischen gravierend verändert.

Aber zumindest eine Eigenschaft von archaischen Menschen kommt einer heutigen Bevölkerung immer noch zugute. Wie Niensens Team entdeckte, besitzen Tibeter eine für sie wichtige Genvariante von Denisovanern. Jene Version, *EPAS1* genannt, erleichtert das Leben in großer Höhe, weil sich damit das Blut in der dünnen Luft nicht so leicht verdickt (*Nature* 512, S. 194–197, 2014).

Viele Forscher halten diesen Befund nachgerade für bezeichnend, denn er verdeutliche, wie wichtig einige der fremden, alten Erbfaktoren für uns waren und teils noch immer sind. Man dürfe allerdings nicht vergessen, betont Reich, wie viel mühselige Forschungsarbeit in jeder einzelnen solchen Einsicht steckt. In der Regel muss man ein rekonstruiertes archaisches Gen erst einmal auf Mäuse übertragen und dann akribisch seine Auswirkungen untersuchen. Jede kleinste neue Erkenntnis auf diesem Gebiet beruht auf harter Arbeit.

Ewen Callaway ist Redakteur bei »Nature«.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 523, S. 512–513, 30. Juli 2015

Ein Sieg von Vernunft und Diplomatie

Fast alle Staaten der Erde einigten sich in Paris auf ein verbindliches Klimaabkommen, das es in sich hat: Es bedeutet nichts weniger als einen Konsens über das absehbare Ende der fossilen Energie.

VON STEFAN RAHMSTORF



FREDERIC BÄTTER, MIT FROLOGEN VON STEFAN RAHMSTORF

In Paris ist wahr geworden, was viele für unmöglich hielten. Bei der UN-Klimakonferenz im Dezember 2015 vereinbarten die Regierungen der Welt, den globalen Temperaturanstieg seit der Industrialisierung deutlich unter zwei Grad Celsius zu halten und sich sogar um eine Begrenzung auf 1,5 Grad zu bemühen. Damit folgten sie wissenschaftlichen Erkenntnissen: Zuvor wurden mehr als 70 Experten konsultiert, die eine solche striktere Begrenzung empfahlen und viele Vorteile dokumentierten, etwa deutlich reduzierte Risiken für die Ernährungssicherheit, für die Stabilität von Eisschilden und für das Überleben von empfindlichen Ökosystemen wie den Korallenriffen. Das Ziel ist mit sehr raschen und konsequenten Maßnahmen noch erreichbar.

Dafür soll der Ausstoß an klimawirksamen Gasen so bald wie möglich sinken und zu Netto-Nullmissionen nach der Jahrhundertmitte führen. Dieses Ziel ist im Abkommen explizit festgeschrieben. In der Praxis müsste dann nicht nur fast komplett auf fossile Energieträger verzichtet werden – zudem wären auch entsprechende Senken nötig, um schwer vermeidbare Emissionen aus Landwirtschaft und industriellen Prozessen auszugleichen.

Das Kyoto-Protokoll aus dem Jahr 1997 hatte von den Industriestaaten eine Emissionsreduktion um fünf Prozent gefordert, erreicht wurden sogar zehn Prozent. Die globalen Ausstöße nahmen dennoch zu, weil nur die In-

dustriationen in der Pflicht waren. Das ist nun überwunden: Fast alle Staaten hatten schon vor der Konferenz konkrete Selbstverpflichtungen vorgelegt. Sie bilden das Herz des Vertrags, bringen in der Summe aber nur etwa die Hälfte dessen, was nötig wäre. Das Abkommen etabliert deshalb Mechanismen, um in fünfjährigen Abständen die Verpflichtungen zu verschärfen und ihre Einhaltung zu kontrollieren.

Die Umsetzung fordert nun alle

Ich bin optimistisch, dass die Transformation rechtzeitig gelingen kann. Erstens wird die in Paris vereinbarte Transparenz und Berichtspflicht einen erheblichen politischen und moralischen Druck aufbauen, der durch die fortschreitende globale Erwärmung und die Opfer und Schäden durch Extremwetter noch wachsen wird. Zweitens findet diese Entwicklung hin zu nachhaltigen Systemen bereits statt und hat zahlreiche unmittelbare Vorteile, von sauberer Luft bis zu weniger Abhängigkeit von Lieferländern der fossilen Brennstoffe.

Über die Hälfte der weltweiten Energieinvestitionen floss 2015 in die »modernen« Erneuerbaren (ohne Wasserkraft und traditionelle Biomassennutzung zum Kochen und Heizen). Die von diesen erzeugte Energiemenge verdoppelt sich etwa alle fünf Jahre. Sollte die Wachstumsrate anhalten, könnten solche Technologien vor Mitte des Jahrhunderts den kompletten Bedarf der Menschheit decken. Nach Paris werden

Investitionen in fossile Versorgung kurzfristig ausfallen; Chinas Kohleverbrauch sinkt bereits jetzt.

Das Abkommen hat allerdings auch Schwächen. Vor allem kommt es sehr spät – 50 Jahre nachdem der erste offizielle Expertenbericht in den USA vor der globalen Erwärmung warnte. Das ist nicht zuletzt den von Lobbyisten geschürten Zweifeln an der Wissenschaft zu verdanken, denen viele Verantwortliche allzu gern Gehör schenken. Zudem sind die Emissionen von Luft- und Schifffahrt wieder außen vor geblieben. Diese Lücke sollte noch im Jahr 2016 geschlossen werden.

Der Vertrag ist aber deutlich besser als weithin erwartet. Allein löst er die Klimakrise nicht, aber das Abkommen schafft den Rahmen und orientiert sich klar am aktuellen Stand der Forschung – ein großer Sieg der Vernunft. Dass sich fast 200 Delegationen auf einen gemeinsamen Wortlaut einigen konnten, ist auch ein Triumph der Diplomatie. Das Resultat gibt mir den Glauben zurück, dass die Menschheit trotz aller Differenzen mit Hilfe der Wissenschaft eine Gefahr erkennen und geeint und rational darauf reagieren kann. Die kommenden Jahrzehnte werden nun zeigen, ob die Dezentertage 2015 in Paris als Wendepunkt in die Geschichte eingehen.

Stefan Rahmstorf ist Klimatologe und Abteilungsleiter am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. Er bloggt unter: scilogs.de/klimalounge

Die schnellsten Bewegungen von Lebewesen

Fangschreckenkrebse schlagen blitzartig und kraftvoll zu – rascher, als es ihre Muskeln eigentlich erlauben. Doch auch andere Organismen beherrschen ultraschnelle Bewegungen.

Von Sheila Patek

Clown-Fangschreckenkrebse nutzen keulenförmige Extremitäten, um die Gehäuse von Schnecken zu zertrümmern. Dabei führen sie eine der schnellsten Bewegungen aller Organismen aus.



MIT FOLGEN VON ROY CALDWELL

Als ich erstmals damit begann, Clown-Fangschreckenkrebs (*Odontodactylus scyllarus*) zu beobachten, arbeitete ich noch als Postdoc an der University of California in Berkeley, USA. Diese farbenprächtigen Krebstiere (Crustacea) leben räuberisch. Sie besitzen zwei keulenförmige Extremitäten, die so genannten Fangbeine, mit denen sie Schneckengehäuse zertrümmern, um an die Tiere darin zu kommen. Es hat mich von Anfang an fasziniert, ihnen dabei zuzusehen.

Ein Clown-Fangschreckenkrebs untersucht die Schnecke zunächst und bringt sie durch Anstupsen in die richtige Position. Dann berührt er sie mit seinen Antennen, möglicherweise um die Distanz abzuschätzen und ein Gefühl für die Oberfläche ihres Gehäuses zu bekommen. Nun hält er kurz inne, als hole er tief Luft – und schlägt zu. Der Hieb selbst ist nicht sichtbar, da zu schnell für das bloße Auge. Aber es ertönt ein Knall, und anschließend liegen Gehäusebruchstücke herum, die eben noch nicht da waren. Sodann geht es von vorn los: untersuchen, positionieren, befühlen, »Atemholen« und schließlich das Knallgeräusch. Ruhe kehrt im Aquarium erst ein, wenn der Fangschreckenkrebs die Schnecke ihres Schutzes beraubt hat und sich daran macht, sie zu verspeisen.

Während der ersten Male, als ich das mit ansah, ahnte ich bereits, dass hier enorme Kräfte und Beschleunigungen walten – auch wenn mir nicht bewusst war, Zeuge einer der weltweit schnellsten Bewegungen von Lebewesen zu sein. Um die Schläge der Fangschreckenkrebs sichtbar zu machen und zu vermessen, trieb ich nach mühsamer Suche ein bildgebendes System auf, das mit höchster Geschwindigkeit arbeitet und Bewegungen in extrem hoher Zeitauflösung abbildet. Damit filmte ich die Tiere, während sie Schneckengehäuse aufbrachen, und sah mir die Videos anschließend in Zeitlupe an. Die Aufnahmen waren so verblüffend, dass mir sofort klar wurde, hier auf etwas Bemerkenswertes gestoßen zu sein. Selbst wenn das System 5000 Bilder pro Sekunde machte, war der Schlag immer nur auf

wenigen davon zu sehen. Das deutete auf extreme Geschwindigkeiten und Beschleunigungen hin – ebenso wie der Umstand, dass zwischen Fangbein und Schneckengehäuse stets eine hell leuchtende Blase erschien.

Bald wurde mir klar, dass nicht Geparden oder fliehende Fische die schnellsten Bewegungen der Biosphäre hinglegen, und auch der Lidschlag nicht in diese Kategorie gehört. Stattdessen sind es merkwürdig aussehende kleine Lebewesen, meist nicht größer als eine Hand, die am Grund tropischer Meere leben.

Erstaunliche Blitzaktionen

In all den Jahren, in denen ich mich mit motorischen Extremleistungen beschäftigte, brachte dieses Forschungsgebiet immer wieder überraschende Erkenntnisse hervor. Sie stellen unsere üblichen Vorstellungen davon in Frage, was in der Biologie »schnell« ist, liefern aber auch wertvolle Anregungen für Physiker und Ingenieure. Im Reich des ultraschnellen Lebens treffen wir auf Organismen wie Schnappkieferrameisen, geschossähnliche Pilzsporen, Termiten mit vorschnellenden Mundwerkzeugen (Mandibeln) und stechende Quallen. Am intensivsten sind Fangschreckenkrebs untersucht (siehe auch SdW 1/2000, S. 13). Sie eignen sich sehr gut dazu, die Evolution extremer Bewegungsmerkmale zu erforschen, einschließlich der damit verbundenen Besonderheiten in Körperbau und Stoffwechsel, und mögliche technische Anwendungen biologischer Phänomene auszuloten.

Als wir die ersten zeitlich hochauflösenden Aufnahmen von Fangschreckenkrebs analysierten, stellten wir fest, dass die Bewegungen weit rascher erfolgen, als irgendjemand vermutet hatte. Sie nehmen nur etwa ein 50stel der Dauer eines Lidschlags in Anspruch. Die keulenförmigen Fangbeine der Tiere beschleunigen dabei ähnlich stark wie ein Projektil im Gewehrlauf, nämlich mit rund 100 000 Meter pro Quadratsekunde, und erreichen eine Geschwindigkeit von bis zu 31 Meter pro Sekunde (zirka 110 Kilometer pro Stunde). Obwohl die Keulen kleiner sind als der kleine Finger eines Kinds, brechen die Tiere damit Schneckengehäuse auf, wofür Menschen einen kräftigen Hammerschlag brauchen.

Tierische Bewegungen beruhen auf Muskeltätigkeit, so auch bei Fangschreckenkrebsen. Deren außerordentlich kräftigen Schläge sind aber nur möglich, indem die Tiere die Beschränkungen der Muskelkontraktion überwinden. Das klingt nach einem Widerspruch, ist aber keiner, wie die folgende Analogie verdeutlicht. Stellen Sie sich vor, einen Pfeil mit bloßen Händen auf ein Ziel zu werfen. Wie Sie sich leicht ausmalen können, wird er weder besonders schnell noch sehr weit fliegen, auch wenn Sie sich wirklich anstrengen. Legen Sie den Pfeil jedoch in einen Bogen ein, spannen die Sehne und lassen ihn los, fliegt das Geschoss plötzlich viel weiter und entwickelt viel mehr Wucht.

AUF EINEN BLICK

50-MAL KÜRZER ALS EIN LIDSCHLAG

1 Clown-Fangschreckenkrebs zertrümmern die Gehäuse von Schnecken. Dabei schlagen sie mit dem bis zu **10 000-Fachen der Erdbeschleunigung** zu. Ein solcher Hieb dauert nur wenige tausendstel Sekunden.

2 Die Tiere erreichen diese Rekordleistung, indem sie Teile ihres **Exoskeletts** wie eine Feder spannen und verhaken. Beim Lösen des Mechanismus entspannt sich die Struktur schlagartig.

3 Mit dem Prinzip, **potenzielle Energie** langsam anzusammeln und **plötzlich freizusetzen**, erbringen auch andere Organismen extreme Leistungen – etwa Schnappkieferrameisen, Quallen und Pilze.

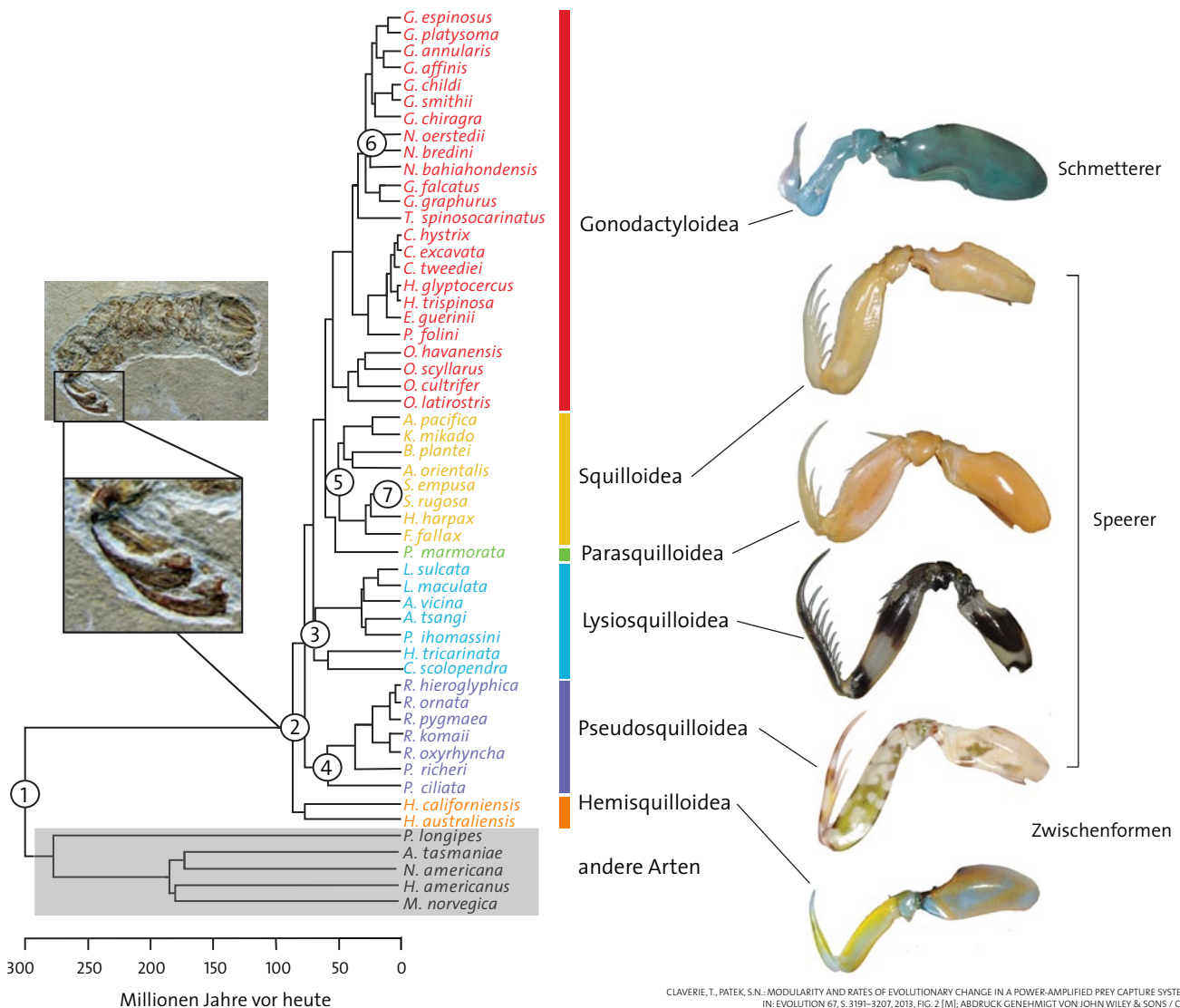
Der Grund: Wenn Sie den Pfeil werfen, hängt seine Geschwindigkeit direkt davon ab, wie schnell sich Ihre Muskeln zusammenziehen. Benutzen Sie aber einen Bogen, hat das Tempo der Muskelkontraktion keine Bedeutung mehr. Denn nun ist es die Sehne, die den Pfeil beschleunigt, und die bewegt sich viel schneller als Ihre Hand. Beim Bogenschießen geht deshalb pro Zeiteinheit mehr Energie auf das Geschoss über als beim Werfen, und die dabei erreichten Leistungen sind höher (Leistung ist Arbeit beziehungsweise übertragene Energie pro Zeit). Die Leistung zu steigern, ist der entscheidende Punkt bei allen ultraschnellen Bewegungen.

Vergleichbar einem Schützen mit Bogen und Pfeil, verfügen die Fangschreckenkrebe über eine Art Sprungfeder, um ihre Fangbeine zu spannen. Ein Verschlussmechanismus arretiert die Feder und sorgt dafür, dass sie schlagartig gelöst

werden kann, wobei sie in sehr kurzer Zeit entspannt und ihre Energie auf die Fangbeine überträgt. Damit lässt sich eine enorme Leistungssteigerung erzielen.

Ähnlich wie wir besitzen auch die Krebstiere Extensoren (Muskeln, die Gelenke strecken) und Flexoren (Muskeln, die Gelenke beugen). Die Extensoren im Fangbein eines *Odontodactylus scyllarus* bewegen den keulenförmigen Teil nach außen; die Flexoren ziehen ihn wieder an den Körper heran (siehe Bild S. 25 unten). Wenn die Krebse einen kräftigen Schlag ausführen wollen, kontrahieren sie Flexoren und Extensoren gleichzeitig. Der große Extensor drückt dabei eine biegsame und elastische, sattelähnliche Struktur des Exosklets zusammen. Der kleinere Flexor zieht eine Verdickung seiner Sehne über einen kleinen Höcker innerhalb des Fangbeins, so dass die Sehne hinter diesem einhakt. Weil der Fle-

Dieser vereinfachte Stammbaum von mehr als 450 Arten der Fangschreckenkrebe zeigt, dass sich die Schmetterer aus den Speerern entwickelt haben. Waffenähnliche Extremitäten (Fangbeine) finden sich schon bei älteren Fossilien dieser Tiere. Die Vielfalt und Evolution der Fangbeine zu erforschen, hilft zu verstehen, mit welchen Vor- und Nachteilen die Fähigkeit zu ultraschnellen Bewegungen einhergeht.

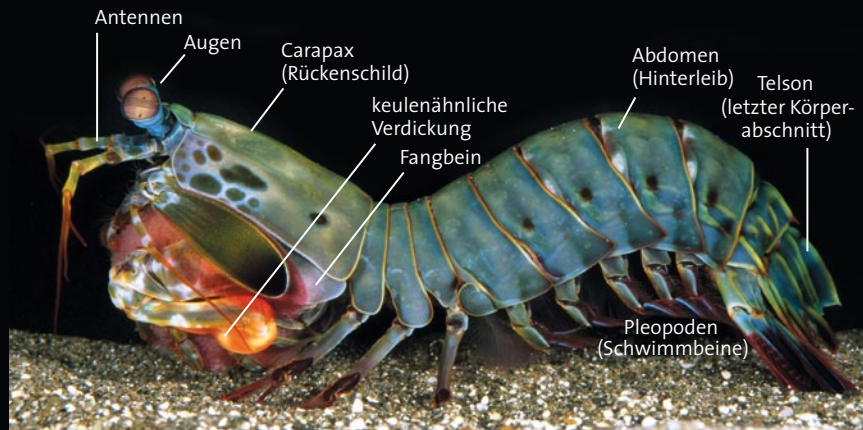


CLAVERIE, T., PATEK, S.N.: MODULARITY AND RATES OF EVOLUTIONARY CHANGE IN A POWER-AMPLIFIED PREY CAPTURE SYSTEM. IN: EVOLUTION 67, S. 3191-3207, 2013, FIG. 2 [M]; ABDRUCK GENEHMIGT VON JOHN WILEY & SONS / CCC



Fangschreckenkrebsse vom Typ Speerer, etwa der hier abgebildete *Lysiosquilla sulcata*, sind Räuber, die schnell bewegliche Tiere aufspießen. Obgleich ihre Beute sehr flink ist, bewegen Speerer ihre Fangbeine deutlich langsamer und mit viel geringeren Beschleunigungen als ihre Verwandten aus der Gruppe der Schmetterer. Das liegt vermutlich daran, dass sie sonst zu viel Zeit dafür aufwenden müssten, ihren Fangmechanismus jeweils scharf zu machen.

Die keulenähnlichen Fangbeine des Clown-Fangschreckenkrebses (*Odontodactylus scyllarus*) sind recht auffällig. Das Tier schlägt damit so schnell zu, dass die Bewegung für das bloße Auge nicht sichtbar ist.



xor auf diese Weise eingerastet ist, kann er die großen, entgegengerichteten Extensorkräfte kompensieren. Das Ergebnis ist ein äußerst angespannter Ruhezustand. Wenn der Flexor jetzt entspannt, löst sich die Sehne, was den Verschlussmechanismus entriegelt und die gespeicherte elastische Energie schlagartig freisetzt. Das keulenförmige Ende des Fangbeins wird nun sehr kraftvoll nach vorn geschleudert.

Langfristig sparen, kurzfristig ausgeben

In Abwandlungen beruhen alle ultraschnellen Bewegungen im Tierreich auf diesem Prinzip. Stets wird ein System langsam mit Energie beladen, um diese später sehr schnell und mit hoher Leistung abzugeben. Schnappkieferameisen entriegeln Sperren, die ihre vorgespannten Mundwerkzeuge (Mandibeln) festhalten. Einige Pilze schleudern Sporen, so genannte Ballistosporien; hierbei schwellen zwei Flüssigkeitströpfchen langsam an, bis sie schlagartig verschmelzen, was die Energie für den Sporenstart liefert. Quallen besitzen oft Nesselkapseln mit stachelbesetzten Nesselfäden darin, in denen sich langsam hoher Druck aufbaut. Auf einen auslösenden Reiz hin entlädt er sich explosionsartig und katapultiert die Nesselfäden heraus.

Als wir die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von den Fangschreckenkrebsen betrachteten, fiel uns eine weitere

spektakuläre Sache auf: Wenn der Krebs ein Schneckengehäuse zertrümmert, bildet sich kurzzeitig eine große Blase zwischen der keulenähnlichen Verdickung seines Fangbeins und dem Ziel. Mir war sofort klar, dass von diesem Hohlraum das Knallgeräusch herrührt, das zusammen mit dem Schlag ertönt. Es handelt sich um eine Begleiterscheinung der »Kavitation«, der Entstehung und des Kollapses von Dampfblasen in einer Flüssigkeit. Enorm schnelle Bewegungen im Wasser erzeugen an manchen Stellen einen starken Unterdruck, der dampfgefüllte Hohlräume hervorbringt. Diese kollabieren sofort wieder, was viel Energie freisetzt – in Form von Wärme, Licht und Schall. Ingenieure kennen diesen Effekt sehr gut, denn er sorgt dafür, dass schnell drehende Schiffschrauben sich allmählich selbst zerstören. Und Hochgeschwindigkeits-U-Boote sind bei Unterwasserfahrten sehr laut, da sie zahllose Kavitationsblasen erzeugen, die unter großem Lärm in sich zusammenfallen.

Biologen wissen schon seit Längerem, dass biologische Bewegungen mit Kavitationseffekten einhergehen können, denn die »Pistolenschüsse« der Knallkrebse (Alpheidae, entfernten Verwandten der Fangschreckenkrebsse) sind berühmt. Durch blitzartiges Schließen einer ihrer Scheren erzeugen diese Tiere eine Kavitationsblase, die sehr laut implodiert, wo-

bei ein Lichtblitz entsteht und Temperaturen von einigen tausend Grad Celsius auftreten. Dies dient zum Warnen von Feinden, zum Beutefang, zum Kampf mit Artgenossen oder auch zur Kommunikation. Welche Kräfte dabei wirken, hat lange Zeit niemand gemessen.

Weil uns das aber im Hinblick auf die Clown-Fangschreckenkrebs interessiert, entwickelten wir ein Messverfahren auf der Grundlage piezoelektrischer Sensoren. Damit können wir die auftretenden Kräfte ermitteln – und zwar zeitlich so hoch aufgelöst, dass wir den Aufprall des Fangbeins (auf das Schneckengehäuse) vom Kollaps der Kavitationsblase unterscheiden können. Wir stellten fest, dass jeder superschnelle Keulenschlag eines Clown-Fangschreckenkrebses zweimal wirkt: das erste Mal, wenn das Fangbein auf das Gehäuse kracht, und das zweite Mal, wenn die Druckwelle der implodierenden Kavitationsblase eintrifft.

Draufhauen ohne Selbstschädigung

Um künstliche Rotationsbewegungen zu erzeugen, die den Schlägen der Clown-Fangschreckenkrebs vergleichbar sind, baute meine damalige Doktorandin Suzanne Cox (heute an der University of Massachusetts Amherst) ein solches Tier als physisches Modell nach. Mit der »Ninjabot« genannten Konstruktion untersuchte sie Aufprallereignisse und Kavitationsphänomene während ultraschneller Rotationen. Dabei

stellte sie die Ergebnisse der Maschine denen der lebenden Tieren gegenüber. Es zeigte sich, dass ein noch unbekannter Faktor die rotationsbedingte Kavitation bei lebenden Fangschreckenkrebs zu dämpfen scheint. Vielleicht verbergen sich hier wertvolle Hinweise darauf, wie man Schiffsschrauben so konstruieren kann, dass sie weniger verschleifen.

Die enorm kraftvollen Schläge der Clown-Fangschreckenkrebs auf Schneckengehäuse gehen mit dem erheblichen Risiko einher, dass die Fangbeine selbst Schaden nehmen. Tatsächlich zählen Schneckenpanzer zu den bruchstärksten Materialien, die man von lebenden Organismen kennt. Trotzdem schaffen es die Krebs, sie zu zertrümmern, ohne ihre eigenen Extremitäten zu ruinieren. Fasziniert davon, haben Wissenschaftler um David Kisailus von der University of California Riverside die Materialien und den Aufbau der keulenförmigen Verdickung der Fangbeine untersucht. Ihren Ergebnissen zufolge ist die äußerste Schicht der Keule sehr hart und stark mineralisiert; sie besteht vorwiegend aus Phosphorverbindungen wie Kalziumphosphat sowie aus Kalziumkarbonat. Im Innern der Keule herrscht eine starke Schichtung vor. Sie hat den Vorteil, die Energie des Aufpralls effektiv zu zerstreuen (zu dissipieren) und etwaige Mikrorisse bevorzugt im Innern der Extremität statt an ihrer Oberfläche entstehen zu lassen.

Diese Erkenntnisse haben bereits die Entwicklung neuer stoßresistenter Werkstoffe ausgelöst. Forscher aus Kisailus'

Dauer (millionstel Sekunden)	Geschwindigkeit (Meter pro Sekunde)	Beschleunigung (Meter pro Quadratsekunde)
0,7 Nesselzellen	67 Mandibeln von Schnappkieferameisen	10^7 Nesselzellen
10 Pilzsporen	Termitenmandibeln	10^6 Mandibeln von Schnappkieferameisen
25 Termitenmandibeln	58 Sturzflug eines Falken	10^5 Schmetterschlag eines Fangschreckenkrebses
100 – 300 Mandibeln von Schnappkieferameisen	37 Nesselzellen	Ballistospore
1000 – 6000 Schlag eines Fangschreckenkrebses	31 Schmetterschlag eines Fangschreckenkrebses	10^3 Speerstoß eines Fangschreckenkrebses
10000 Sprung eines Grashüpfers	25 – 26 Sprint eines Geparden	10^2 fliehende Fische
100000 Froschhüpfer	Wasserstrahl eines Knallkrebses	Sprung eines Grashüpfers
300 000 Lidschlag	2 – 3 Ballistospore	10 Sprint eines Geparden
	Froschhüpfer	Froschhüpfer
	Grashüpfersprung	
	~ 10 menschlicher Weltklassesprinter	

Organismen mit superschnellen Extremitäten, etwa Fangschreckenkrebs und Schnappkieferameisen, bewegen ihre Körperteile weit rascher als wir die Lider unserer Augen. Auch Quallen mit Nesselzellen, die explosionsartig einen Nessel-faden mit Stacheln freisetzen, erzeugen rekordschnelle Bewegungen.

Team ordneten Proben eines Kohlenstofffaser-Epoxidharz-Verbundwerkstoffs in einer Struktur an, die jener in den Keulen der Fangschreckenkrebsse ähnelt. Das dabei gewonnene Material erwies sich in Tests als stoß- und verschleißbeständig und zeichnete sich durch niedriges Gewicht aus.

Wie beschrieben sind Clown-Fangschreckenkrebsse bei Weitem nicht die einzigen Lebewesen, die superschnelle Bewegungen mit hochschlagfesten Waffen ausführen. Auch bei den Schnappkieferrameisen, Knallkrebse oder Quallen mit herauschießenden Stachelfäden kommen die Prinzipien der ultraschnellen Rotation, der Kavitation und der Schlagresistenz zum Tragen. Und wahrscheinlich gibt es noch viel mehr Organismen mit solchen Fähigkeiten. Bei etlichen dürften wir das noch gar nicht bemerkt haben, weil die entsprechenden Vorgänge mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen sind.

Die verblüffenden Bilder, die uns Hochgeschwindigkeitskameras von Fangschreckenkrebsen lieferten, veranlassten uns dazu, auch bei anderen Tieren nach ähnlichen Phänomenen zu suchen. Wenn wir die Beobachtungen dort mit jenen an Fangschreckenkrebsen vergleichen, stellen wir fest, dass ultraschnelle Organismen ihre überragenden Fähigkeiten mit einigen erheblichen Einschränkungen erkaufen müssen.

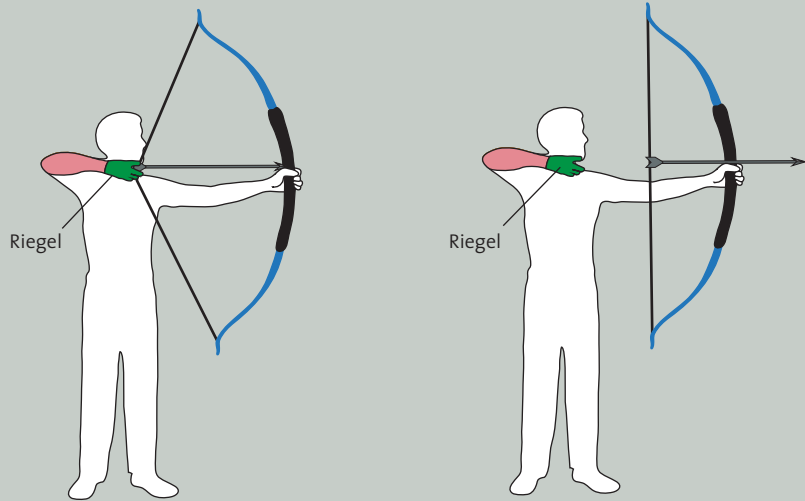
Clown-Fangschreckenkrebsse gehören zur Gruppe der Schmetterer, weil sie ihre Extremitäten wie Keulen einsetzen. Die meisten Arten innerhalb der Ordnung der Fang-

schreckenkrebsse sind aber Speerer, die flinke Beutetiere mit spitzen Extremitäten durchbohren (die ersten sind aus den letzten vor rund 50 Millionen Jahren hervorgegangen, siehe Bild S. 22 unten). Meine Mitarbeiter und ich vermuteten ursprünglich, dass wir bei Speerern auf noch schnellere Bewegungen stoßen würden als bei Schmetterern. Das bestätigte sich nicht: Die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, mit denen Speerer ihre Fangbeine bewegen, erreichen nur einen Bruchteil derjenigen der Schmetterer.

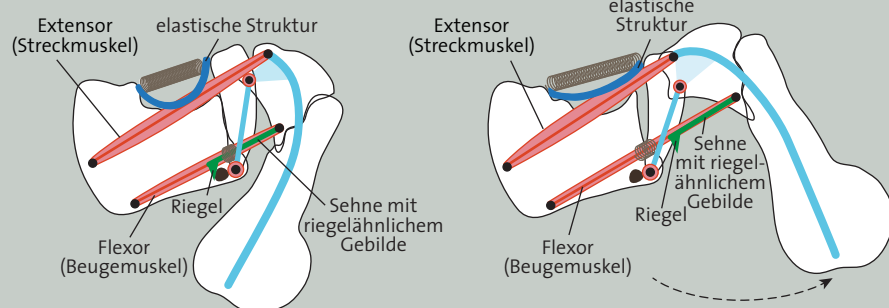
Je mehr Tempo, desto weniger Kontrolle

Dieser Befund verblüffte uns, denn wir waren davon ausgegangen, dass die Tiere mit den schnellsten Waffen auch die flinkste Beute ins Visier nehmen. Stattdessen trifft das Gegenteil zu: Schmetternde Krebse, die am raschesten zuschlagen, jagen überwiegend träge, unbewegliche und gepanzerte Ziele. Wie kann das sein? Ein Grund liegt darin, dass Lebewesen, die zu rekordschnellen Bewegungen in der Lage sind, diese mit einem Kontrollverlust bezahlen – wenn die Waffe in Aktion tritt, lässt sie sich nicht mehr beeinflussen. Ein Bogenschütze, der einen Pfeil löst, kann dessen Flugbahn nicht mehr anpassen. Analog dazu geschehen superschnelle Bewegungen im Tierreich in so kurzer Zeit, dass sie nicht mehr verändert werden können. Ob Schnappkieferrameise oder Fangschreckenkrebs: Sobald sie ihre Extremitäten entriegelt

Ultraschnelle Bewegungen wie der Schmetterschlag eines Fangschreckenkrebses funktionieren mit Hilfe eines Feder-Klinken-Prinzips, ähnlich dem Schießen mit Pfeil und Bogen. Ein federähnlicher Mechanismus speichert potenzielle Energie, die eine Entriegelung explosionsartig freisetzt.



Fangbein eines Fangschreckenkrebses



haben, könne ihre Neurone nicht rasch genug feuern, um die Bewegung in Echtzeit zu modifizieren.

Eine weitere Einschränkung ultraschneller Systeme klingt im ersten Moment widersinnig: Es kostet viel Zeit, schnell zu sein. Doch erinnern wir uns – mechanische Leistungen im Tierreich lassen sich extrem steigern, indem der Organismus potenzielle Energie anhäuft und diese anschließend möglichst rasch freisetzt. Geschieht das über Muskelkraft, dann ist hierfür ein Kompromiss auf Kosten der Zeit erforderlich. Muskeln können sich nicht gleichzeitig kraftvoll und schnell zusammenziehen. Ihre Grundeinheit, das Sarkomer, besteht aus den Proteinen Myosin und Aktin. Diese gehen Bindungen miteinander ein, gleiten aneinander entlang und bewirken so die Kontraktion. Je länger das Sarkomer ist, desto mehr Aktin-Myosin-Bindungen bilden sich und umso höher ist die Muskelkraft. Es nimmt dann aber mehr Zeit in Anspruch, all diese Bindungen zu lösen und umzuverteilen, um eine Muskelkontraktion in Gang zu setzen. Längere Sarkomere bedeuten also kraftvollere, aber auch langsamere Muskeln.

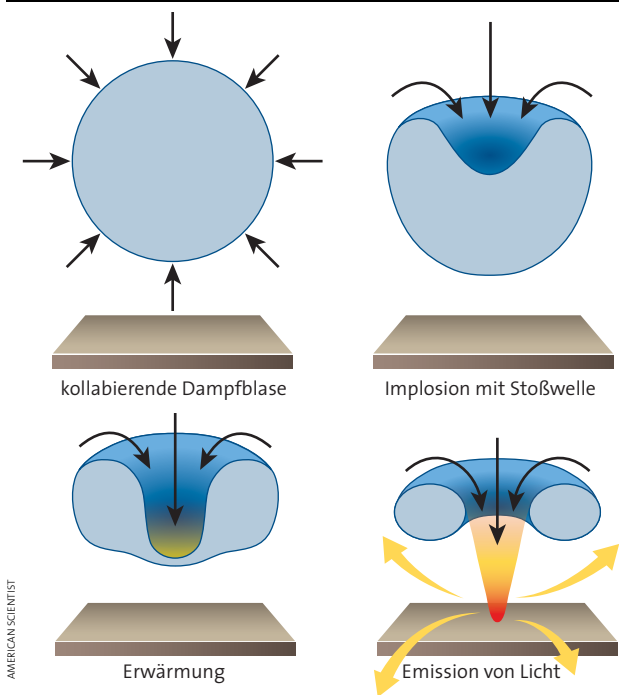
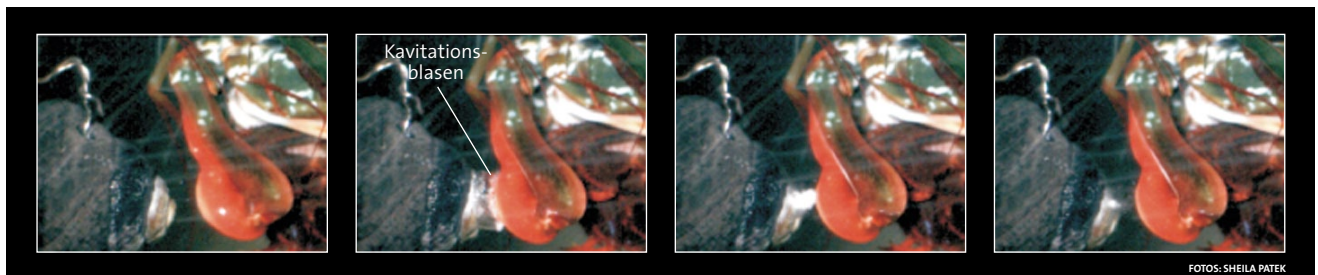
Meine Mitarbeiter und ich haben festgestellt, dass Fangschreckenkrebs, egal ob Speerer oder Schmetterer, relativ lange Sarkomere in den Muskeln besitzen, die die jeweilige Extremität unter Spannung setzen. Ihr Bewegungsapparat ist also auf langsame, kraftvolle Kontraktion spezialisiert. Interessanterweise haben aber Speerer dabei deutlich kürzere

Sarkomere als Schmetterer – der Längenunterschied kann Faktor 2 betragen. Anscheinend hat der Selektionsdruck bei den Schmetterern darauf hingewirkt, mit höherer Kraft mehr potenzielle Energie aufzubauen und kräftiger zuzuschlagen, was auf Kosten der »Nachladezeit« ging. Die am schnellsten schlagenden Krebse können ihre Waffen daher nicht rasch genug scharf machen, um besonders behände Beute zu jagen.

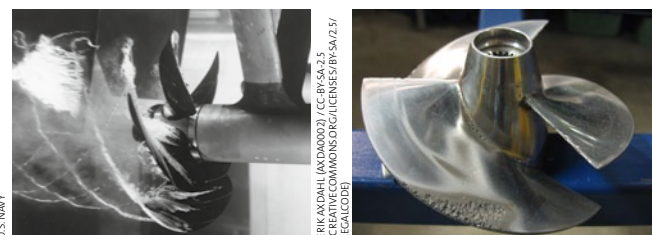
Stammesgeschichtlich festgefahren

Die Fähigkeit zu extrem raschen Bewegungen verursacht noch weitere Kosten, wie mein Team und ich herausgefunden haben. Der Körperbau bei den Schmetterern verändert sich im Zuge der Evolution langsamer als bei anderen Fangschreckenkrebsen. Das hat offenbar damit zu tun, dass die mechanischen Komponenten des Schmetterapparats besonders gut aufeinander abgestimmt sein müssen. Sie zeigen sich weniger tolerant gegenüber Veränderungen, was die Wahrscheinlichkeit für günstige evolutionäre Neuerungen vermindert. Die betroffenen Tiere haben somit weniger Chance, genetisch zu diversifizieren – ein hoher Preis.

Und dann ist da noch ein Nachteil, der sicher besonders schwer wiegt: Ultraschnelle Waffen sind oft tödlich. Wollen ihre Träger langfristig überleben, müssen sie Strategien entwickeln, um den Einsatz dieser Waffen untereinander zu vermei-



Der Schmetterschlag eines Fangschreckenkrebses (Bildabfolge oben) bewegt das umgebende Wasser so schnell, dass der örtlich entstehende Unterdruck Dampfblasen hervorbringt, die sofort kollabieren und dabei Licht und Wärme freisetzen – ein Prozess namens Kavitation. Er tritt auch an rotierenden Schiffsschrauben und Turbinen auf und verursacht dort Materialverschleiß (unten). Die Kavitation erlaubt den Fangschreckenkrebsen, mit einem Hieb quasi zweimal zuzuschlagen: einmal, wenn das Fangbein aufs Ziel prallt, und das zweite Mal, wenn die Druckwelle eintrifft, die beim Kollabieren der Kavitationsblasen entsteht.





MIT FRIEDRICH VON ROY GÄLDWEL



MIT FRIEDRICH VON ROY GÄLDWEL

Die Schläge der Fangschreckenkrebe sind so kraftvoll, dass ihr Einsatz gegen Artgenossen lebensgefährlich für diese wäre. Wenn die Tiere um Nahrung oder Territorium kämpfen, schlagen sie auf den gepanzerten letzten Körperabschnitt des Konkurrenten, das Telson. Diese ritualisierte Auseinandersetzung erlaubt es, tödliche Verletzungen zu vermeiden und zugleich die Größe des Rivalen abzuschätzen.

den. Clown-Fangschreckenkrebe bestehen im Wesentlichen aus Weichgewebe, abgesehen von den Fangbeinen und dem gepanzerten letzten Körperabschnitt (Telson), so dass ein gut sitzender Schlag eines Rivalen sie mit sehr großer Wahrscheinlichkeit tötet. Das ist wohl der Grund dafür, dass die Tiere ihre Konflikte über ritualisiertes Verhalten austragen, indem sie auf das Telson des Konkurrenten schlagen. Die Energie, die dabei auf das Fangbein zurückwirkt, spiegelt die Größe des angegriffenen Individuums wieder. Vielleicht schätzen die Krebe auf diese Weise ein, mit wem sie es zu tun haben und welches Verhalten ihm gegenüber angebracht ist. Noch wissen wir sehr wenig darüber, wie Tiere mit superschnellen Schlag- oder Stichwaffen ihre Konflikte bereinigen.

Die Erforschung ultraschneller Bewegungen in der Biologie hat sich zu einem hochgradig multidisziplinären Ansatz entwickelt, mit großer Relevanz für die Ingenieurwissenschaften. Fangschreckenkrebe haben eine Jahrmillionen währende Evolution hinter sich, die in zahlreichen Fossilien dokumentiert ist. Aus diesen können wir direkt ablesen, wie sich die Extremitäten der Tiere im Lauf der Zeit differenziert haben – und schauen dabei der Natur über die Schulter, wie sie auf veränderte Bedingungen mit unterschiedlichen »Konstruktionen« antwortet. Sowohl die Fossilien als auch die aktuellen Beobachtungen zeigen uns ein atemberaubendes Spektrum waffenähnlicher Extremitäten, Federmechanismen und Anpassungen der Muskelanatomie – umgesetzt in unterschiedlichsten Lebensräumen, von Schlamm über Sand bis hin zu Korallenriffen.

Schnappkieferrameisen zeigen ebenfalls eine außerordentlich große Artenfülle. Ultraschnelle Mandibeln sind während der Evolution mindestens viermal unabhängig voneinander entstanden, was den Schluss erlaubt, dass superschnelle Extremitäten viele Vorteile mit sich bringen müssen. Auch Pilzballistosporen findet man bei enorm vielen Arten mit sehr unterschiedlichen Formen und Lebensräumen, ebenso wie Knallkrebse und Quallen mit Stacheln

durch morphologische und funktionelle Vielfalt faszinieren. Von der Verhaltensbiologie über die Entwicklung des Lebens bis zu den Möglichkeiten, Kavitation an technischen Systemen zu vermeiden, können wir von Lebewesen mit superschnellen Extremitäten noch viel lernen. Dabei profitieren so unterschiedliche Gebiete wie Evolutionstheorie, Physik, Ingenieurwesen und Ökologie. ~

DIE AUTORIN



Sheila Patek arbeitet als außerordentliche Professorin im Fachbereich Biologie an der Duke University in Durham (USA). Sie interessiert sich für die Schnittstelle zwischen Physik und Evolution, insbesondere im Hinblick auf ultraschnelle Bewegungen von Organismen sowie auf die Akustik von Wirbellosen.

QUELLEN

- Claverie, T., Patek, S.N.:** Modularity and Rates of Evolutionary Change in a Power-Amplified Prey Capture System. In: *Evolution* 67, S. 3191–3207, 2013
- Cox, S. M. et al.:** A Physical Model of the Extreme Mantis Shrimp Strike: Kinematics and Cavitation of Ninjabot. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 9, 016014, 2014
- Grunenfelder, L. K. et al.:** Bio-Inspired Impact-Resistant Composites. In: *Acta Biomaterialia* 10, S. 3997–4008, 2014
- Patek, S.N.:** Materials Science. Biomimetics and Evolution. In: *Science* 345, S. 1448–1449, 2014
- Patek, S.N., Dudek, D.M., Rosario, M.V.:** From Bouncy Legs to Poisoned Arrows: Elastic Movements in Invertebrates. In: *Journal of Experimental Biology* 214, S. 1973–1980, 2011

WEBLINKS

<https://youtu.be/7ft603ozSW8>
Die Autorin stellt ihre Forschungen über Fangschreckenkrebe vor (englisch).

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382041

Übergewicht durch Darmflora

Die Mikroben im Verdauungstrakt wirken sich auf unseren Taillenumfang aus. Bestimmte Typen fördern zudem das Erkrankungsrisiko für Arteriosklerose und Diabetes. Die gute Nachricht: Zumindest bei Tieren lässt sich Adipositas durch Bakterientransplantationen rückgängig machen.

Von Philippe Gérard

Wie kommt es zu Übergewicht und Fettleibigkeit? Sind es die Gene? Der Lebensstil? Sicher spielen beide Faktoren hier eine wichtige Rolle. Daneben rückt jedoch die Zusammensetzung der Darmflora zunehmend in den Fokus der Aufmerksamkeit. Forscher bezeichnen diese als intestinale Mikrobiota und die Gesamtheit ihrer Gene beziehungsweise Genome als Mikrobiom.

Weltweit waren im Jahr 2005 rund 1,6 Milliarden Erwachsene übergewichtig und von ihnen mindestens 400 Millionen adipös – mit steigender Tendenz. Für Deutschland ermittelte das Robert-Koch-Institut vor fünf Jahren bei 67 Prozent der Männer und 53 Prozent der Frauen Übergewicht und bei über 23 Prozent beider Geschlechter Fettleibigkeit. Diese Entwicklung ist insbesondere deshalb bedenklich, weil Adipositas ein gesteigertes Risiko für viele Erkrankungen birgt, von Diabetes mellitus und Arteriosklerose bis hin zu Leberleiden und verschiedenen Krebsarten.

Die Rolle der Darmflora für unsere Gesundheit geriet erst Ende des 20. Jahrhunderts verstärkt ins Blickfeld der Medizin. Der Verdacht, dass die unzähligen Mikroorganismen, die den Verdauungstrakt besiedeln, auch bei Übergewicht ein Wörtchen mitreden könnten, kam vor etwa einem Jahrzehnt auf. Mittlerweile bestärken ihn zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen. Die meisten erfolgten an Labortieren – meistens Mäusen –, die von Geburt an keimfrei gehalten wurden und somit bis zum Beginn der Studien keine Mikrobiota besaßen. Wie sich zeigte, lässt sich das Gewicht der Nager tatsächlich über Darmbakterien manipulieren. Zudem weisen fettleibige Menschen eine Mikrogenmischung auf, die aus dem Gleichgewicht geraten zu sein scheint.

Auch die Mikrowelt im Darm beeinflusst unser Körpergewicht.

Normalerweise kommt ein Kind erstmals während der Geburt mit Darmbakterien in Kontakt, die dann rasch seinen Verdauungstrakt besiedeln. Hauptlieferant dafür ist die fäkale Mikrobiota der Mutter. Bei Kaiserschnittkindern setzt sich die Darmbesiedlung daher anders zusammen – was nach bisherigem Wissen aber keinen Einfluss auf späteres Übergewicht hat. Das Neugeborene erhält von seinen Eltern, mit der Nahrung und aus der sonstigen Umwelt bald weitere Bakterien. Dadurch entwickelt sich in ihm nach und nach eine zunehmend komplexere Darmflora. Doch erst beim Zweijährigen ähnelt sie annähernd der von Erwachsenen. Insgesamt gesehen tragen zu ihr rund 1000 verschiedene Arten bei.

Die Bezeichnung »Darmflora« ist, obwohl gebräuchlich, streng genommen nicht korrekt, da es sich bei ihr nicht um pflanzliche Organismen handelt. In unserem Verdauungstrakt leben über 10^{14} Bakterien, wobei die Besiedelung im Enddarm mit 10^{11} Mikroben pro Gramm Stuhl am dichtesten ist. Somit beherbergen wir zehnmal so viele Bakterien, wie wir Körperzellen haben. Zusammen ergeben diese inneren Bewohner annähernd ein Kilogramm. Hinzu kommen so genannte Einzeller, also Organismen mit echtem Zellkern, darunter Hefepilze und Protozoen. Über deren Menge und Funktionen wissen wir allerdings noch sehr wenig.

Jedem seine persönliche Ausstattung

Bis in die 1980er Jahre ließen sich Darmbakterien nur bestimmen, wenn man sie im Labor züchtete. Damit vermochte man allerdings nur etwa 30 Prozent von ihnen zu erfassen, weil viele dieser Mikroben außerhalb ihrer besonderen Umwelt schwer kultivierbar sind. Heute kann man sie stattdessen mit molekulargenetischen Methoden anhand charakteristischer Erbsequenzen nachweisen. Wie wir dadurch wissen, gehören die im Darm vorherrschenden Bakterien zu drei großen Gruppen oder »Abteilungen«: den Firmicutes, den Bacteroidetes und den Actinobacteria.

Von diesen bilden anscheinend einige Dutzend Arten – zumindest im Enddarm – einen den meisten Menschen gemeinsamen Grundstock, was für eine weit zurückliegende gemeinsame Herkunft dieser Besiedlung spricht. Doch die übrigen Arten der genannten drei Großgruppen, also die weit überwiegende Mehrzahl, sind von Mensch zu Mensch verschieden zusammengesetzt. Außerdem besitzt offenbar jeder sein individuelles Spektrum an dominierenden Arten, und dieses persönliche Bakterienprofil scheint sich jahrelang zu halten.

Für uns hat die intestinale Mikrobiota zahlreiche, zum Großteil nützliche Funktionen. Zu den Hauptaufgaben der Darmbakterien gehört: den Nahrungsbrei im Dickdarm aufschließen; eine Barriere gegen Krankheitserreger bilden, die über den Darm in den Körper eindringen könnten; bestimmte Vitamine herstellen, die wir aufnehmen; Entwicklung und Reifung des Darmimmunsystems fördern; die Zellen der Darmschleimhaut in ihrer Funktion unterstützen, uns gesund zu erhalten.

Seit über 50 Jahren erzeugen Züchter für verschiedenste medizinische Studien Labortiere – in der Regel Ratten oder



ISTOCK/ERAXON

WENN BAKTERIEN DICK MACHEN

1 Das **Mikrobiom des Darms** – das Erbgut der Darmflora – stellt quasi unser »zweites Genom« dar. Es stammt von Bakterien und anderen Mikroorganismen, zusammen als **intestinale Mikrobiota** bezeichnet.

2 Die Darmflora jedes Menschen ist einzigartig. Dennoch weist sie bei **Fettleibigkeit** grundsätzlich andere Charakteristika auf als bei **Normalgewicht**. Studien an Mäusen zufolge begünstigen bestimmte **Zusammensetzungen von Bakterien** Adipositas, andere schützen davor.

3 Die neuen Erkenntnisse lassen auf effektivere **Therapien gegen Übergewicht** hoffen. Möglicherweise ließe sich Adipositas mit Hilfe von **Präbiotika** entgegensteuern: Nahrungsinhaltsstoffe, die Wachstum oder Aktivität bestimmter Bakterien fördern.

Mäuse – ohne Darmbakterien. Die Nager werden, zumindest in der ersten Generation, per Kaiserschnitt zur Welt gebracht und völlig steril gehalten. Physiologisch sind einige Auswirkungen des Defizits an ihnen deutlich erkennbar. So ist ihre Darmwand dünner, und ihr Kot ist weicher. Manches davon normalisiert sich aber binnen weniger Wochen, wenn man ihnen eine komplexe Darmflora überträgt, und mitunter genügt dazu schon eine einzige Bakterienart.

Bereits 1983 hatten Bernard Wostmann und seine Kollegen von der University of Notre Dame (Indiana) beobachtet, dass Nagetiere ohne Darmflora 30 Prozent mehr Kalorien als normal gehaltene Artgenossen fressen müssen, um ihr Körpergewicht zu halten. Allerdings blieben diese Ergebnisse unbeachtet, bis die Arbeitsgruppe um Jeffrey Gordon von der Washington University in St. Louis (Missouri) 2004 erstmals einen Einfluss der Darmbesiedlung auf die Entstehung von Adipositas postulierte.

Die Forscher wiesen damals nach, dass Mäuse mit normaler Mikrobiota 42 Prozent mehr Körperfett haben als gleich alte Mäuse desselben Stamms ohne Darmflora. Überimpften sie den bislang keimfreien Tiere jedoch eine Darmmikrobiota, so nahm ihr Körperfett binnen zwei Wochen um 60 Prozent zu – und das sogar bei weniger Futter als vorher (siehe Kasten rechts: »Die Macht der Darmflora«). Wie erklärt sich dieser drastische Effekt?

Offenbar hat die Darmflora eine Schlüsselfunktion für die Fetteinlagerung inne. Hierfür sprach auch ein weiterer Befund von Gordons Team: Keimfreie Mäuse blieben sogar bei fettreichem Futter mager – obwohl sie es tüchtig fraßen. Eine ähnliche Beobachtung machte unsere eigene Gruppe bei INRA (dem Institut National de la Recherche Agronomique) in Jouy-en-Josas südlich von Paris: Bei fetthaltiger Ernährung nahmen die steril lebenden Mäuse nur ein Drittel so viel zu wie Mäuse mit Darmflora.

Interessanterweise wich zugleich ihr Zucker- und Fettstoffwechsel ab. Zum Beispiel wiesen sie einen niedrigeren Blutzucker- und Insulinspiegel auf. Sie konnten außerdem ihren Blutzuckerspiegel bei Zufuhr von Kohlenhydraten bes-

ser steuern. Und trotz fettreicher Nahrung waren ihre Blutfettwerte niedriger als bei mit Bakterien besiedelten Artgenossen, aber der Cholesteringehalt in der Leber lag höher.

Um die Rolle von Darmbakterien bei diesen Phänomenen zu erkennen, untersuchten wir die Darmflora von Mäusen, die wegen eines Gendefekts fettleibig sind. Diesen Tieren fehlt das Hormon Leptin, das gefüllte Fettspeicher anzeigt und den Appetit reguliert. (Bei übergewichtigen Menschen funktioniert diese Rückkopplung allerdings oft nicht gut, weil die für das Signal eigentlich empfindlichen Hirnzellen darauf nicht mehr stark genug ansprechen.) Wie sich herausstellte, besitzen diese dicken Tiere tatsächlich ungewöhnlich viele Firmicutes-Bakterien und weniger Bacteroidetes als normal. Hinzu kommt eine auffallend große Anzahl von Methan bildenden Archaeobakterien oder Archaea, die zu einer eigenen Domäne der Lebewesen zählen.

Verhilft diese andere Darmflora womöglich zu einer besseren Nahrungsverwertung? Können solche Mäuse deswegen die Energie im Futter intensiver verwerten und leichter als Fett speichern? Unsere Studien bestätigten den Verdacht. Zum einen fanden sich im Mikrobiom der fettleibigen Leptinmangel-Mäuse im Verhältnis mehr Gene, deren Proteine komplexe Zuckerverbindungen (Polysaccharide) aufschließen – was für eine gründlichere Ausnutzung der Nahrung spricht. Zum anderen enthielt ihr Kot tatsächlich weniger Restkalorien als der von schlanken Artgenossen. Als wir dann sterilen Mäusen Darmflora entweder von solchen fetten Artgenossen oder von »normalen«, schlanken Tieren übertrugen, bestätigte sich der vermutete Zusammenhang: Im ersten Fall setzten die bisher keimfreien Mäuse mehr Fett an als im zweiten. Mit den Mikroben der dicken Mäuse hatten sie offensichtlich auch deren Eigenschaften übernommen, die einer gesteigerten Fettspeicherung Vorschub leisten.

Die Macht der Darmflora

Von Geburt an steril gehaltene Mäuse – die folglich auch keine Darmflora besitzen – wiegen weniger als normal gehaltene Artgenossen und haben vor allem weniger Speck. Überträgt man ihnen Kot einschließlich Darmbakterien von anderen Tieren, nehmen sie danach selbst bei knapper Kost zu (obere Bilder).

Mehrere Prozesse könnten dabei mitwirken: Darmbakterien zerlegen ansonsten unverdauliche komplexe Kohlenhydrate in einfache Zucker, die der Organismus aufnehmen kann. Daraufhin steigt die Synthese von Fetten, unter anderem von Triglyzeriden, in der Leber. Auch die Darmflora selbst liefert kurzkettige Fettsäuren. Allesfresser bekommen darüber etwa zehn Prozent ihres Kalorienbedarfs, Wiederkäuer bis zu 70 Prozent.

Bei den Mäusen hemmt die neue Darmflora zudem die Produktion eines Proteins – Angptl4 – von Schleimhautzellen des unteren Dünndarms. Dieses Protein hemmt seinerseits das Enzym Lipoproteinlipase, das für die Einlagerung von Lipiden im Fettgewebe notwendig ist.

Wie wir später feststellten, entwickelten jene Tiere auch die damit verbundenen Stoffwechselstörungen. Erhalten genetisch »normale« Mäuse eine fettreiche Kost, bekommt ein Teil von ihnen – nicht alle – Insulinresistenz (also »Altersdiabetes«), Leberverfettung (wobei die Leberzellen zu viel Fett einlagern) oder andere typische Erkrankungen bei Übergewicht. Um den Zusammenhang genauer zu erfassen, verwendeten wir als Kotpender zwei gleich dicke Mäuse, die zuvor beide 16 Wochen lang fettes Futter gefressen hatten. Eines dieser beiden Tiere war dadurch insulinresistent geworden und hatte eine Fettleber entwickelt, das andere war gesund geblieben. Und tatsächlich: Mit der Darmflora der kranken Maus wurden bis dahin keimfreie Mäuse ebenfalls krank. Ihr Blut wies erhöhte Zucker- und Insulinwerte auf, typische Anzeichen eines gestörten Zuckerstoffwechsels. Zugleich war ihre Leber verfettet. Mäuse mit der Darmflora des gesund gebliebenen, wenn auch dicken Tiers blieben dagegen auch selbst gesund (siehe Kasten: »Spezielle Mikrobiota für Fettleber«, S. 32).

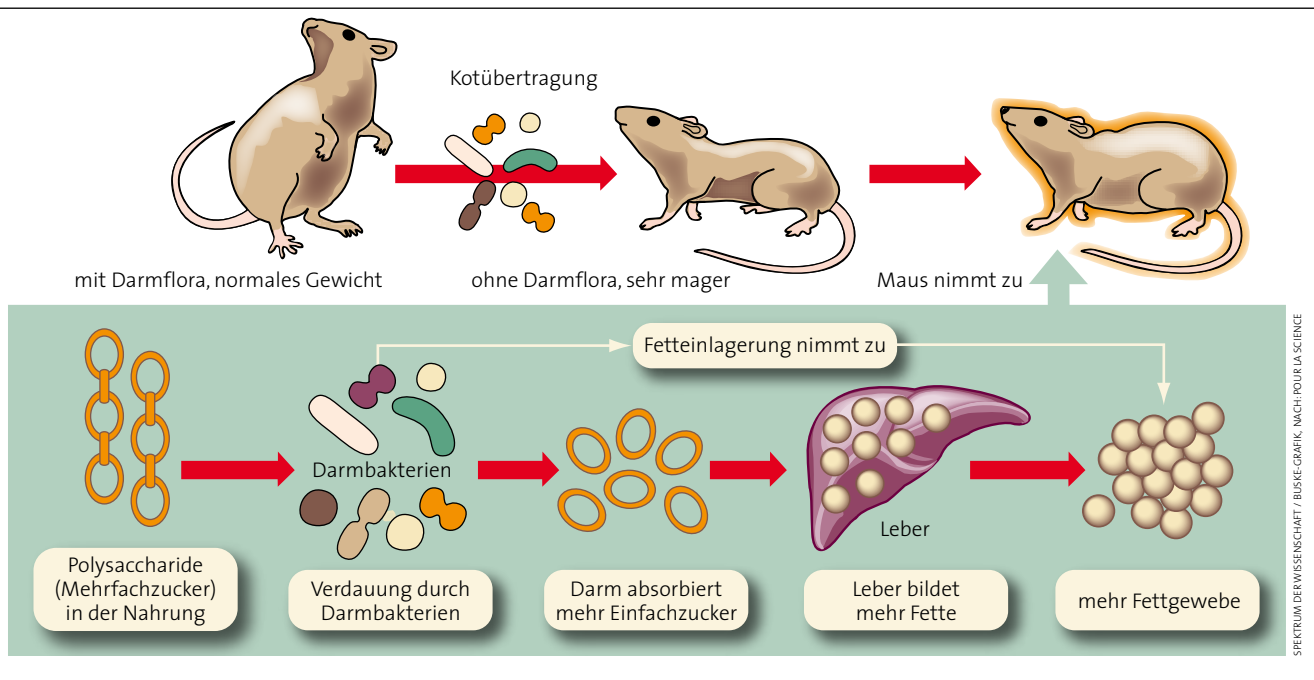
**Ein Kandidat als Dickmacher:
Eine einzige Mikrobenart kann genügen!**

Dass die Darmflora zur Entstehung von Adipositas und ihren Folgeerkrankungen beitragen kann, belegen immer mehr Untersuchungen dieser Art. Aber welche Bakterien mögen dafür verantwortlich sein? Kürzlich entdeckten Forscher der Universität von Schanghai etwas Erstaunliches. Sie isolierten einen möglichen Kandidaten – *Enterobacter cloacae* B29 – aus dem Kot eines fettleibigen Menschen und übertrugen jenes Bakterium auf sterile Mäuse. Als diese nun fettreiches Futter erhielten, wurden sie dick! Die Wissenschaftler hatten niemals damit gerechnet, dass eine einzige Mikrobenart dergleichen vermag. Bisher galt, dass es dafür einer komplexen Mikrobiotamischung bedarf.

Einen umgekehrten Effekt wies eine Gruppe um Patrice Cani von der Université catholique de Louvain (in Louvain-la-Neuve, Belgien) für die Spezies *Akkermansia muciniphila* nach. Dieser Organismus, der sich vom Schleim auf den Darmzellen ernährt, kann offensichtlich vor Fettleibigkeit schützen. Bei einem gesunden Menschen macht er drei bis fünf Prozent der Darmmikrobiota aus. Nach den Beobachtungen der Forscher ging die Besiedelung mit diesem Keim deutlich zurück, wenn die Mäuse bei fettreicher Ernährung tendenziell kräftig zunahmten. Also übertrugen sie den adipös gewordenen Nagern das Bakterium künstlich – und diese verloren wieder Gewicht. Insbesondere sank der Anteil an Körperfett, und gleichzeitig reagierten die Mäuse besser auf Insulin.

Auch bei schlanken und bei übergewichtigen Menschen treten die im Darm vorherrschenden Bakteriengruppen in unterschiedlichen Verhältnissen auf. Die erste Untersuchung dazu publizierte Gordons Team 2006. Demnach beherbergen adipöse Personen relativ weniger Bacteroidetes und mehr Firmicutes als schlanke Leute, also ähnlich, wie wir es bei Mäusen festgestellt hatten. Verändert sich dann die Zusammensetzung der Darmflora, wenn jemand abnimmt? Um dies herauszufinden, hielten zwölf adipöse Studienteilnehmer eine entweder fett- oder kohlenhydratarmer kalorienreduzierte Diät. Geling es ihnen damit, entsprechend abzunehmen, stellte sich ein Bakterienprofil ähnlich dem von schlanken Personen ein. Die Art der Diät war dafür egal. Dabei spiegelte der Anteil an Bacteroidetes regelrecht die abgespeckten Pfunde: Je mehr Gewicht ein Teilnehmer verlor, desto mehr nahmen diese Mikroben zu.

Jenen Pionieruntersuchungen an Menschen folgte eine Reihe weiterer Studien von anderen Forschern. Die Ergebnisse sind allerdings teils widersprüchlich. Auch ob Bacteroidetes-Bakterien möglicherweise vor Übergewicht schützen



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



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



FOTOLIA / NOMAD SOUL

könnten, wird daraus nicht klar. Eine der Studien untersuchte beispielsweise erwachsene ein- und zweieiige Zwillinge – in der Annahme, dass ein ungleiches Körpergewicht genetisch identischer Zwillinge auf die Darmflora zurückgehen könnte. In dieser Erhebung bestätigte sich zwar der frühere Befund, wonach der Anteil von Bacteroidetes bei Übergewicht geringer ist als bei Normalgewicht. Doch war der relative Gehalt an Firmicutes diesmal in beiden Fällen gleich, während dagegen mehr von der dritten Hauptbakteriengruppe, den Actinobacteria, vorkam. Andere Studien fanden wiederum keinen Unterschied des Bacteroidetes-Anteils bei schlanken und übergewichtigen Menschen. Und einige stellten bei Fettleibigkeit sogar verhältnismäßig mehr Bakterien aus dieser Gruppe fest.

Vor einigen Jahren untersuchte das internationale Konsortium MetaHIT (Metagenomics of the Human Intestinal Tract) das menschliche Darmmikrobiom in einem von der

EU geförderten mehrjährigen Großprojekt. Unter einem Metagenom verstehen Forscher das Gesamtgenom aller Organismen in einem System. 123 normalgewichtige und 169 adipöse Probanden aus Dänemark nahmen an einer großen Studie teil, die von INRA koordiniert wurde und an der sich 14 staatliche und industrielle Forschungseinrichtungen aus Europa und China beteiligten.

Mittels einer so genannten quantitativen Metagenomanalyse bestimmten die Forscher von allen 292 Teilnehmern die genetische Vielfalt ihrer Darmfloren und die relativen Mengen der einzelnen bakteriellen Sequenzen. Zählte man die Anzahl der bakteriellen Gene, ließen sich bei den Probanden zwei Gruppen erkennen: Etwa ein Viertel von ihnen besaß ein eher ärmliches Mikrobiom mit weniger als einer halben Million verschiedener Bakteriengene; bei den übrigen drei Vierteln herrschte mit durchschnittlich 600 000 mikrobiellen Genen eine deutlich größere Genvielfalt – was für eine höhere Bakterienvielfalt spricht.

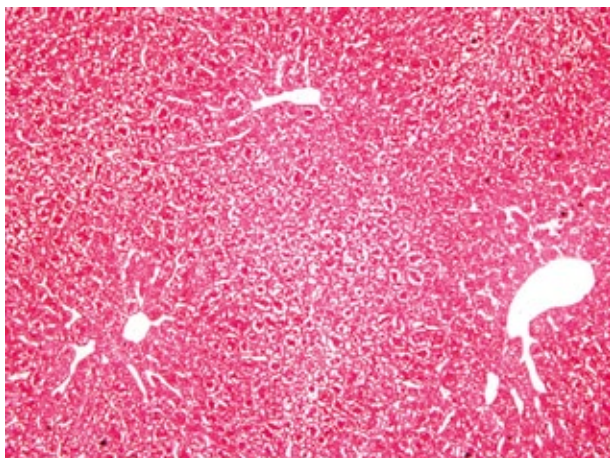
Artenarme und artenreiche Mikrobiota kommen zwar sowohl bei adipösen als auch bei normalgewichtigen Menschen vor. Allerdings erhöhen eine relativ arme Darmflora und Übergewicht das Risiko für all die typischen Begleiterkrankungen wie Altersdiabetes, Fettstoffwechselstörungen, Leber- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder sogar einige Krebsarten. Zudem zeigte sich, dass Schlankheitsdiäten bei dicken Menschen mit einer vergleichsweise reichhaltigen Darmflora erfolgreicher verlaufen.

Insgesamt ließen diese Daten keine enge Beziehung zwischen einer bestimmten Sorte von Mikrobiota und Adiposi-

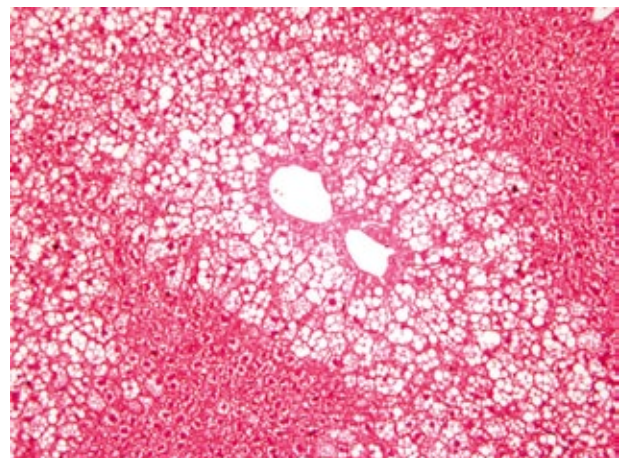
Spezielle Mikrobiota für Fettleber

Erhielten keimfrei aufgewachsene Mäuse Darmbakterien einer dick gefütterten Maus mit trotzdem gesunder Leber, nahmen sie zwar an Gewicht zu; doch sie – wie auch ihre Leber (linkes Schnittbild) – blieben sogar bei fetter Kost gesund. Bei Übertragung der Darmflora einer dicken Maus, die ein metabolisches

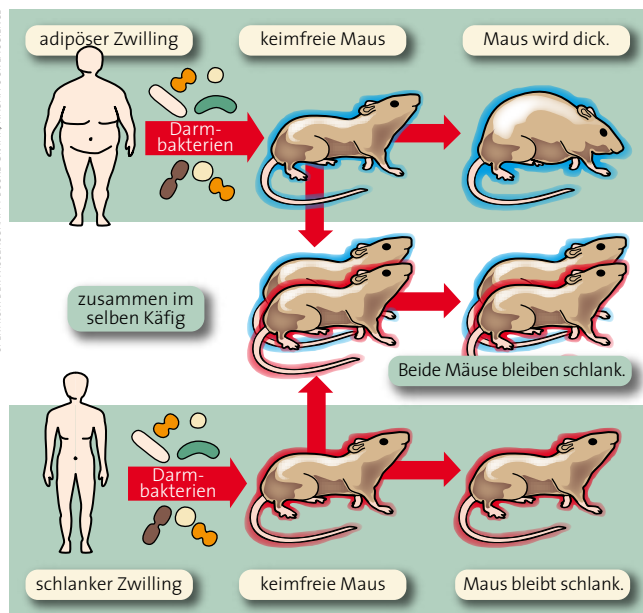
Syndrom und eine Fettleber entwickelt hatte, bekamen die so behandelten Tiere, sofern sie fettreiches Futter erhielten, die gleichen Symptome wie die Spenderin – und ebenfalls eine Leberverfettung (rechts). Die zahlreichen kleinen weißen Einschlüsse in den Leberzellen sind Fetttropfchen.



STEPHAN BOUET, ATELIER D'HISTOLOGIE, INRA



STEPHAN BOUET, ATELIER D'HISTOLOGIE, INRA



tas erkennen. Eher sah es so aus, als ob eine Kombination von Umwelt- und genetischen Faktoren zu einer individuellen Zusammensetzung der Darmflora beiträgt, welche möglicherweise eine übermäßige Gewichtszunahme fördert. Ob die beim Menschen festgestellten Unterschiede des Darmlebens Ursache oder Folge von Fettleibigkeit sind, blieb jedoch ungewiss.

Bei diesem Stand der Erkenntnisse kam das Team von Gordon auf die Idee, keimfrei aufgezogenen Mäusen menschliche Darmbakterien zu übertragen. Für die Stuhlspenden wählten die Forscher ein eineiiges Zwillingsspaar. Eine der Schwestern war normalgewichtig, die andere fettleibig. Und wirklich blieben die Mäuse in einen Fall schlank und wurden im anderen dick. Doch wenn beide Tiergruppen nach der Stuhltransplantation zusammen im selben Käfig lebten, blieben erstaunlicherweise auch die Mäuse der zweiten Gruppe dünn (siehe Bild oben).

Weil Mäuse Kot von Artgenossen fressen, können sie ihre Mikrobiota austauschen. Das dürfte in diesem Fall geschehen sein, und offenbar vermochte die Darmflora der schlanken Frau diejenige der adipösen Zwillingsschwester zu verdrängen. Das galt insbesondere für Bacteroidetes sowie einige andere Komponenten von der schlankeren Frau. Nach diesen Befunden scheint es nicht nur zumindest einen Typ von Mikrobiota zu geben, der Adipositas fördert. Sondern es scheint auch eine Mikrobiota zu existieren, die davor zu schützen vermag – und die überdies eine andere Darmflora übertrumpfen kann. Eventuell ließe sich diese Erkenntnis für Menschen mit Übergewicht therapeutisch nutzen.

Stuhltransplantationen werden seit mehreren Jahrzehnten bei Patienten vorgenommen, bei denen wiederkehrende schwere, mitunter lebensbedrohliche Darmentzündungen durch *Clostridium difficile* auftreten. Manchmal hilft diese Maßnahme drei- bis viermal so gut wie eine Antibiotikabehandlung. Bei fettleibigen Patienten wandten Ärzte in Groningen das Verfahren erstmals an. Die ausgewählten Pa-

Die Darmflora eines schlanken Menschen konnte Mäuse vor Adipositas schützen (unten). Stammte sie hingegen von dessen übergewichtigem Zwilling, nahmen die Tiere selbst bei fettarmer, ballaststoffreicher Ernährung stark zu (oben). Lebten beide Gruppen jedoch seit der Übertragung zusammen, blieben alle schlank. Vermutlicher Grund: Die Mäuse pflegten Kot von Artgenossen aufzunehmen, wobei sich Komponenten der Darmflora des schlanken Zwilling durchsetzten.

tienten litten unter einem so genannten metabolischen Syndrom, dem typischen Erscheinungsbild eines gestörten Zucker- und Fettstoffwechsels bei Adipositas. Sie erhielten Stuhlaufschlüsse von schlanken Personen. Danach nahmen sie zwar nicht ab, jedoch verbesserte sich ihre Empfindlichkeit für Insulin, und das hielt noch sechs Wochen später an.

Als Standardtherapie gegen Fettsucht und deren Begleiterscheinungen eignet sich eine Stuhltransplantation daher vielleicht nicht. Immerhin scheint es damit nach den ersten Erfahrungen aber möglich zu sein, die Darmflora und hierüber einige physiologische Parameter günstig zu beeinflussen. Auch über die Ernährung, insbesondere durch so genannte Präbiotika, lässt sie sich manipulieren. Viele dieser »Ballaststoffe« sind für uns unverdauliche Polysaccharide, von denen aber bestimmte Bakterien profitieren. Würde es gelingen, die Balance der Darmbewohner günstiger einzustellen, könnte das zusammen mit anderen gewichtsreduzierenden Maßnahmen dazu beitragen, Übergewicht entgegenzusteuern. ~

DER AUTOR



Philippe Gérard ist Wissenschaftler am MICALIS-Institut in Jouy-en-Josas bei Paris. Die Einrichtung führt Forschungen von INRA (dem Institut National de la Recherche Agronomique) und AgroParisTech zusammen und untersucht die Mikrobiota der Ernährung.

QUELLEN

- Gérard, P.:** Gut Microbiota and Obesity. In: Cellular and Molecular Life Sciences CMLS, 10/2015, Doi: 10.1007/s00018-015-2061-5
- Le Roy, T. et al.:** Intestinal Microbiota Determines Development of Non-Alcoholic Fatty Liver Disease in Mice. In: Gut 62, S. 1787–1794, 2013
- Palau, M. et al.:** Metabolomic Insights into the Intricate Gut Microbial-Host Interaction in the Development of Obesity and Type 2 Diabetes. In: Frontiers in Microbiology 10/2015, Doi: 10.3389/fmicb.2015.01151
- Ridaura, V. K. et al.:** Gut Microbiota from Twins Discordant for Obesity Modulate Metabolism in Mice. In: Science 341, S. 1079, 2013

LITERATURTIPP

Ackermann, J.: Tausend Billionen Freunde. In: SdW 11/2012, S. 26–33
Überblick über die Bakterienbesiedlung des Menschen

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382042

Entscheidend für das Einsetzen einer Entzündungsreaktion ist ein als Inflammasom bezeichneter Proteinkomplex – hier schematisch dargestellt.



MEDIZIN

Zellen in Flammen

Eine jüngst entdeckte Zellstruktur spielt eine Schlüsselrolle bei allen Arten von Entzündungen. Diese Erkenntnis eröffnet womöglich ganz neue Therapieansätze für so unterschiedliche Erkrankungen wie Arteriosklerose, Alzheimerdemenz und Fettleber.

Von Wajahat Z. Mehal

Wer schon einmal einen Pickel hatte, kennt die Kombination aus Hautrötung, Schwellung, Brennen und Schmerz, die typisch für eine lokale Entzündung ist. Von Immunzellen in Gang gesetzt, kann diese auch ohne Bakterien bei jeder Art von Gewebeschädigung auftreten – sei es eine oberflächliche Prellung oder ein Herzinfarkt. In solchen Fällen sprechen Mediziner von einer sterilen Entzündung. Wenn sie aus dem Ruder läuft, trägt sie zu einem breiten Spektrum höchst unterschiedlicher Krankheitsbilder bei, das von der Alzheimerdemenz über Diabetes bis hin zu diversen Leberleiden reicht.

All dies ist seit Jahrzehnten bekannt. Jüngste Forschungen haben jedoch neue, ebenso überraschende wie weit reichende Erkenntnisse zum Ursprung des Phänomens zu Tage gefördert. Dazu gehört vor allem der folgende Befund: Damit eine Entzündung auftreten kann, müssen die beteiligten Zellen zunächst komplexe Strukturen aus mehreren Proteinen zusammensetzen. Diese so genannten Inflammasomen entstehen erstaunlich rasch und zerfallen schon binnen eines Tages nach dem auslösenden Reiz. Das ist so, als würde eine Firma ihre Produktionsanlage innerhalb von Minuten zusammenbauen, sobald ein Kunde Ware bestellt, und sie nach der Auslieferung gleich wieder demontieren. Vermutlich soll der rasche Abbau des Inflammasoms überschießenden Abwehrreaktionen vorbeugen. Zwar sind Entzündungsprozesse nützlich, weil sie Krankheitserreger abtöten und die Ausbreitung der Keime im Körper stoppen. Unkontrolliert können sie jedoch auch gesundes Gewebe schädigen – mit teils fatalen Folgen.

Ist die Entdeckung des Inflammasoms an sich schon eine kleine Sensation, so hat sie darüber hinaus auch erhebliche Bedeutung für die Medizin. Wie sich herausstellte, können Störungen im Zyklus von Zusammenbau und Demontage

AUF EINEN BLICK

ZENTRALE SCHALTSTELLE BEI ENTZÜNDUNGEN

1 Rötung, Schwellung, Brennen und Schmerz sind die klinischen Zeichen einer Entzündung, der Reaktion des Körpers auf eine **Infektion** oder eine **Gewebeschädigung**. Diesen Vorgang setzen Zellen über Proteinkomplexe in Gang, die als **Inflammasomen** bezeichnet werden.

2 Überraschenderweise treten identische Inflammasomen bei ganz verschiedenen Erkrankungen auf – etwa bei **Alzheimerdemenz**, **Gicht** oder einer **Verengung der Herzkranzgefäße**. Das eröffnet neue Ansätze zur Behandlung solcher Leiden.

3 Anhand dieser Erkenntnisse sollten sich Medikamente entwickeln lassen, die **ein breites Spektrum chronisch-entzündlicher Erkrankungen** wirksamer bekämpfen. Daneben lassen sich möglicherweise auch weitere Einsatzbereiche für etablierte Wirkstoffe erschließen.

des Inflammasoms chronische Entzündungen auslösen. Gängige Medikamente gegen Schmerzen und Schwellungen hemmen die Aktivität entzündungsfördernder Proteine. Mit Wirkstoffen, welche die Bildung des Inflammasoms blockieren oder für seine Demontage sorgen, ließe sich die Produktion dieser problematischen Eiweißstoffe dagegen von vornherein unterbinden. Das wäre ein völlig neuer Ansatz im Kampf gegen entzündungsbedingte Gewebeschäden. Zudem würden solche Medikamente womöglich auch dann noch wirken, wenn heutige Therapien versagen.

Die neuen Erkenntnisse über Inflammasomen veranlassen mich und etliche Kollegen, unsere Vorstellungen von der Entstehung vieler Erkrankungen grundsätzlich zu überdenken. Statt diese nach den Organen zu klassifizieren, die sie betreffen – etwa Leber oder Herz –, fragen wir nun primär nach

der beteiligten zellulären Maschinerie. Vier verschiedene Inflammasomen sind bislang beschrieben worden, weitere dürften folgen. Wenn nun eines davon Erkrankungen zweier unterschiedlicher Organe verursacht, ist davon auszugehen, dass Medikamente dagegen auch in beiden Fällen helfen.

Entzündungsreaktionen gehören zum angeborenen, unspezifischen Zweig des Immunsystems. Er bildet die erste Abwehrfront gegen Krankheitserreger, die in den Körper eindringen. Dabei wandern Makrophagen und verwandte weiße Blutzellen in die betroffene Geweberegion ein und geben dort entzündungsfördernde Signalproteine ab. Die nachfolgende Schwellung und Erwärmung behindert die Vermehrung der Bakterien und ihre Ausbreitung in die Umgebung. Zudem locken die Signalproteine weitere Immunzellen an. Der sich in infizierten Wunden bildende Eiter besteht zum Teil aus solchen Zellen.

Lange Zeit nahmen Forscher an, dass das angeborene Immunsystem diese Abwehrkaskade nur dann auslöst, wenn es auf fremde Zellen und Strukturen stößt. Makrophagen erkennen spezielle Moleküle, die vielen Krankheitserregern gemeinsam sind, aber im Körper von Menschen und Wirbeltieren normalerweise nicht vorkommen. Bei Kontakt mit solchen Fremdstoffen setzen sie die erwähnten Signalproteine frei und starten so die Immunkaskade. Charles Janeway jr. und Ruslan M. Medzhitov von der Yale University in New Haven (Connecticut) haben die betreffenden Abwehrmechanismen in den 1980er und 1990er Jahren aufgeklärt.

Warum das Immunsystem auch auf körpereigene Substanzen reagiert

Später stellte sich allerdings heraus, dass Makrophagen auch auf bestimmte körpereigene Moleküle ansprechen, etwa auf Adenosintriphosphat (ATP), den universellen biologischen Energieträger, und die Nukleinsäuren DNA und RNA. Alle drei kommen normalerweise nur in membranumhüllten Kompartimenten im Zellinneren vor, wo sie für die tentakelartigen Fortsätze der Makrophagen unzugänglich sind. Gelangen sie jedoch etwa bei einer Verletzung in den Zellzwischenraum, werden sie plötzlich für Detektormoleküle auf Immunzellen wie etwa die Toll-like-Rezeptoren sichtbar. Da sie auch von eingedrungenen Krankheitserregern stammen könnten, geht der Organismus auf Nummer sicher und löst vorsichtshalber dieselbe Abwehrreaktion aus wie beim Einfall von Bakterien. Die dann ablaufende Kettenreaktion ist freilich unangemessen und vergrößert womöglich die Gewebeschäden noch, wenn sie nicht beizeiten abklingt.

Zwar sind die Abläufe bei Entzündungsprozessen schon seit etwa 15 Jahren in den Grundzügen bekannt, doch gelang es erst im Verlauf des letzten Jahrzehnts, im Detail aufzuklären, was sich in einem Makrophagen abspielt, bevor er diese schlagkräftige Abwehrkaskade ankurbelt. Anfangs

befürchteten die Forscher, Hunderte von Signalmolekülen und deren Wirkungen auf Dutzende von Immunzellen nachverfolgen zu müssen, um tiefere Einblicke in die Mechanismen von Entzündungsreaktionen zu gewinnen. Wie sich zeigte, genügen bei Makrophagen jedoch wenige solcher molekularen Signalwege, um den Immunalarm auszulösen. Obendrein bedienen sich auch andere Immunzellen derselben Pfade. Somit sollte es genügen, eine Hand voll Medikamente zu entwickeln, welche die Bildung von Inflammasomen blockieren oder ihren

Zerfall fördern, um ein breites Spektrum entzündlicher Erkrankungen behandeln zu können.

Was geschieht nun im Inneren eines Makrophagen? In der Nähe einer geschädig-

ten Zelle wird er geradezu überschwemmt von DNA-Bestandteilen, RNA-Fragmenten und anderen Molekülen, die eine mögliche Gefahr signalisieren. Einige davon heften sich an einen speziellen Rezeptor an der Zelloberfläche des Makrophagen, andere docken an einen zweiten Rezeptor an, über den man bisher kaum etwas weiß – nicht einmal, wo er sich befindet. Nach der Bindung aktivieren die beiden Rezeptoren einen von zwei zellulären Prozessen: Der erste Signalpfad steigert die Produktion von Molekülen, die zum Anwerfen der Entzündungsreaktion nötig sind, aber zunächst noch in inaktiver Form vorliegen; der zweite sorgt für die Montage der Inflammasomen. Sobald diese zusammengebaut sind, verwandeln sie die Entzündungsmoleküle in die aktive Form und transportieren sie auf einem noch unbekanntem Weg aus dem Makrophagen.

Überraschenderweise ist die Produktpalette eines Inflammasoms recht begrenzt – und zwar unabhängig davon, ob ein Fremdstoff oder ein körpereigenes Gefahrensignal vorliegt. Jedes der vier bisher beschriebenen Inflammasomen sondert hauptsächlich zwei Substanzen ab: Interleukin-1 beta (IL-1 β) und Interleukin-18 (IL-18). Beide gehören zu einer Zytokine genannten Klasse von Signalmolekülen, und es war schon länger bekannt, dass sie an Entzündungsreaktionen beteiligt sind. Doch bis zur Entdeckung der Inflammasomen wusste niemand, wie sie entstehen.

Nach ihrer Freisetzung diffundieren die Interleukine ins umgebende Gewebe. Dort lösen sie die Produktion weiterer Zytokine aus, welche die Durchblutung der betroffenen Region steigern, andere Immunzellen anlocken und das gesamte Arsenal an Veränderungen bewirken, die zu einer voll ausgeprägten Entzündungsreaktion gehören.

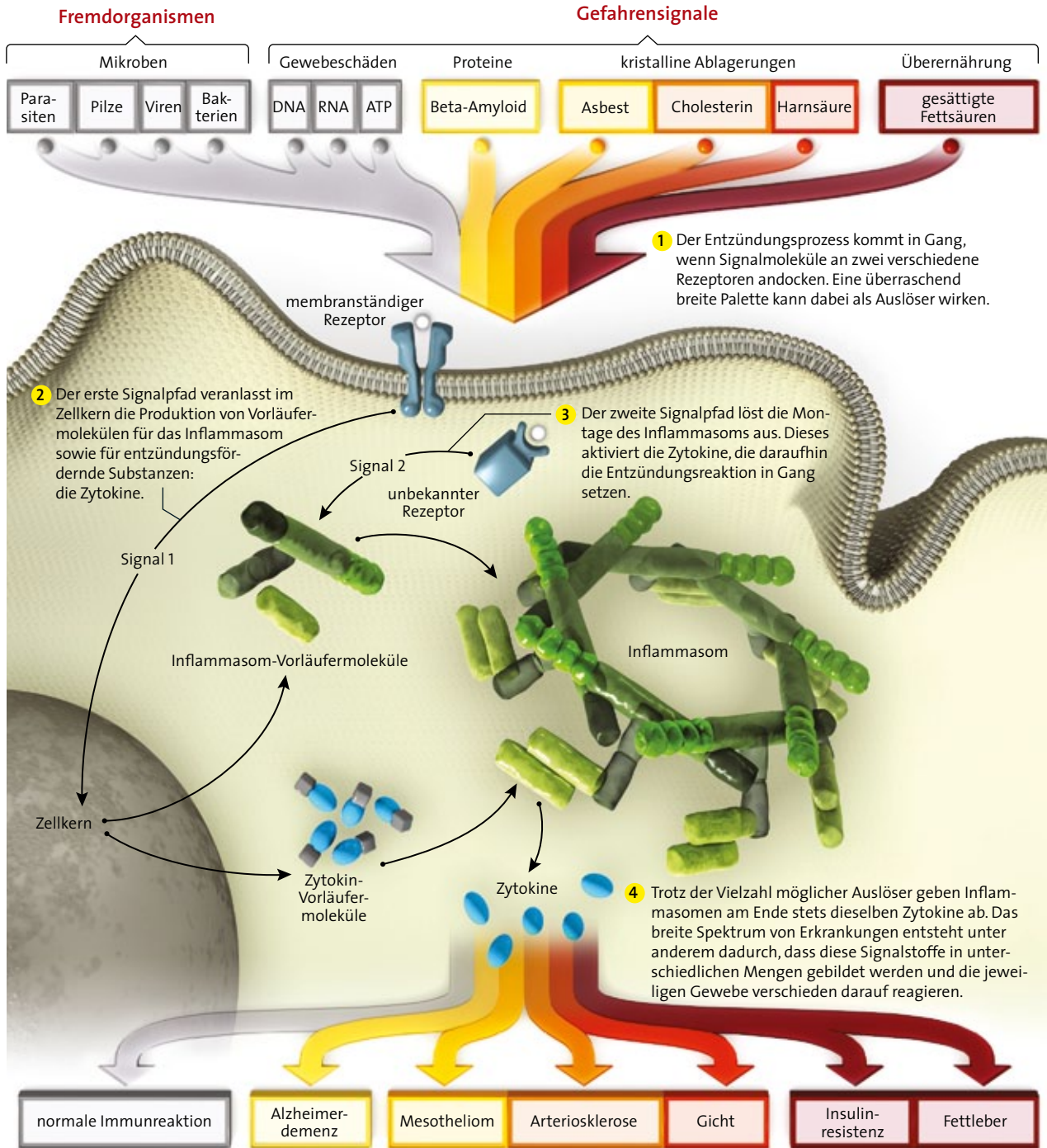
Eine weitere überraschende Erkenntnis ist, dass Inflammasomen eine zentrale Rolle bei einer Vielzahl von Erkrankungen spielen, die bisher kaum mit Entzündungen in Verbindung gebracht wurden. Tatsächlich entstehen sie nicht nur in Makrophagen, sondern in vielen anderen Zellen, sobald diese Fremdkörper oder Gefahrensignale registrieren – etwa in solchen in der Darmwand, die daraufhin Zytokine

Medikamente, welche die Bildung von Inflammasomen blockieren, sollten gegen eine Vielzahl entzündlicher Erkrankungen wirken

Wie Entzündungen entstehen

Überraschenden Erkenntnissen der letzten Jahre zufolge lösen alle Körperzellen Entzündungsreaktionen im Wesentlichen auf die gleiche Weise aus. Sie setzen dazu einen als Inflammason bezeichneten molekularen Komplex zusammen, der so genannte Zytokine produziert. Gewöhnlich werden Inflammasonen schnell wieder abgebaut. Bleiben sie dagegen dauerhaft aktiv, können verschiedene Erkrankungen wie Alzheimerdemenz oder Gicht auftreten.

Ausgelöst wird die Bildung von Inflammasonen durch Bestandteile von Fremdorganismen und andere Gefahrensignale. Dazu gehören Festkörper wie Asbestfasern, aber auch körpereigene Substanzen, die pathologische Ablagerungen bilden oder bei Verletzungen freikommen. Die Entdeckung eines einheitlichen molekularen Signalwegs bietet die Chance zur Entwicklung neuartiger Medikamente für eine Reihe von Erkrankungen, die bisher kaum Gemeinsamkeiten zu haben schienen.



freisetzen, welche die Produktion von Schleim anregen. Ferner lösen mikroskopisch kleine Partikel Entzündungsprozesse in verschiedenen Körperregionen aus, wenn sie von außen dorthin gelangen oder sich als Folge krankhafter Vorgänge ablagern.

Verantwortlich dafür ist insbesondere das in vielen Zelltypen vorkommende Inflammasom NLRP3. Es sorgt zum Beispiel dafür, dass als Reaktion auf Asbestfasern in der Lunge ein Bindegewebstumor (Mesotheliom) und bei der Ansammlung von Harnsäurekristallen in den Gelenken Gicht entsteht. Analog verursacht, wie sich immer deutlicher abzeichnet, nicht das Cholesterin selbst die arteriosklerotischen Veränderungen der Blutgefäße, die schließlich zu Herzinfarkt und Schlaganfall führen können. Schuld sind vielmehr seine Ablagerungen an den Gefäßwänden in Form winziger Kristalle, die Entzündungen auslösen.

Ähnliches gilt für die Alzheimerkrankheit, bei der sich zwischen den Nervenzellen im Gehirn Klumpen aus Beta-Amyloid-Peptiden abscheiden. Diese aktivieren das NLRP3-Inflammasom in den makrophagenähnlichen Mikrogliazellen, was schließlich zum Untergang der umgebenden Neurone führt. Eine ganze Palette von Substanzen wie Harnsäurekristalle, Cholesterinablagerungen, Beta-Amyloid-Klumpen, Asbestfasern oder Feinstaub ruft also in diversen Organen ganz unterschiedlich verlaufende Erkrankungen hervor, die jedoch alle über den gleichen Mechanismus vermittelt werden.

Auch normale Nährstoffe können, im Übermaß aufgenommen, Entzündungen auslösen

Die größte Sensation auf dem Gebiet war schließlich die Entdeckung, dass auch übermäßiges Essen Entzündungsreaktionen hervorrufen kann. Nach einer einzelnen allzu üppigen Mahlzeit klingen sie zwar bald wieder ab. Aber die ständige Aufnahme zu großer Nahrungsmengen, die den Körper veranlasst, überschüssige Kalorien in Form von Fett zu speichern, führt zu einer chronischen Entzündung.

Das ist insofern erstaunlich, als Nährstoffe ja weder bakterielle Moleküle noch mikroskopische Teilchen darstellen und normalerweise auch nicht im Zellinnern eingeschlossen sind, was sie außerhalb von Zellen zu potenziellen Gefahrensignalen machen würde. Dennoch ergab eine Reihe von Tierversuchen in den vergangenen Jahren, dass zum Beispiel gesättigte

Fettsäuren, die in Fleisch und Käse vorkommen, aber auch vom Körper selbst erzeugt werden, das NLRP3-Inflammasom in Makrophagen und anderen Zellen unmittelbar aktivieren, wenn sie in großen Mengen auftreten. Diese Erkenntnis begründete ein ganz neues Forschungsfeld, das dem Einfluss aller Arten von Stoffwechselprodukten auf die Aktivität von Inflammasomen nachspürt. Dabei zeigte sich unter anderem, dass auch der übermäßige Verzehr von Kohlenhydraten auf indirektem Weg zu entzündlichen Reaktionen führt, weil der Körper die überschüssigen Nährstoffe zunächst in Fettsäuren umwandelt, um diese dann zu speichern.

Viele Organe leiden bei Völlerei unter chronischen Entzündungsreaktionen. Am stärksten davon betroffen aber ist die Leber – wahrscheinlich weil sie große Mengen von Fettsäuren aufnimmt und verarbeitet. Zudem enthält sie zahlreiche reaktionsbereite Immunzellen, die schon bei geringem Anlass aktiv werden. Als Folge davon kann sich das Organ entzünden und anschwellen; Ärzte sprechen von Fettleber (Steatohepatitis). Dieser Zustand ist zwar reversibel, ähnelt jedoch den Symptomen bei langjährigem Alkoholmissbrauch. Aus noch unbekanntem Gründen entwickelt sich daraus in manchen Fällen eine Leberzirrhose, die zum Tod führen kann.

Besonders beunruhigend ist, dass inzwischen schon ein Drittel der übergewichtigen Kinder eine Fettleber hat. Ein Teil von ihnen dürfte bereits im frühen Erwachsenenalter an Leberzirrhose erkranken. Der Zustand des Organs bei den betroffenen Kindern gleicht dem bei Trunksucht, nur dass in diesem Fall Überernährung statt Alkohol die Ursache ist. Wie Tierversuche nahelegen, spielt auch hier das NLRP3-Inflammasom eine entscheidende Rolle. Eine Therapie, die seine Bildung blockiert, könnte daher unter Umständen Leberschäden bei übergewichtigen Menschen vorbeugen. Fettleibige Mäuse, denen Komponenten des Inflammasoms fehlen, erkranken zwar häufiger an Infektionen, haben jedoch eine gesündere Leber.

Angesichts der Erkenntnis, dass übermäßiges Essen zu chronischen Entzündungsreaktionen führt, fragten sich meine Kollegen und ich an der Yale University, ob Unterernährung vielleicht den gegenteiligen Effekt hat, also die Bildung von Inflammasomen unterdrückt. Da die entzündungshemmende Wirkung von Fasten und körperlicher Bewegung bekannt ist, betrachteten wir zwei Moleküle, die sich dabei im Körper anreichern: Beta-Hydroxybuttersäure und Milchsäure. Tatsächlich heften sich beide, wie wir herausfanden, jeweils an bestimmte Rezeptoren auf Makrophagen. Diese schalten daraufhin über biochemische Signalkaskaden Gene aus, die an der Produktion von Inflammasomen beteiligt sind. Als Nächstes stellt sich somit die Frage, inwiefern sich die betreffenden regulatorischen Signalwege dazu nutzen lassen, krankhaften Entzündungsprozessen zu begegnen.

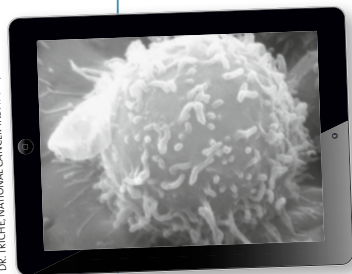
In diesem Zusammenhang ist auch von Bedeutung, wie der gesunde Körper Inflammasomen wieder deaktiviert, was normalerweise 18 bis 24 Stunden nach ihrer Bildung ge-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/das-immunsystem



schieht. Außerdem fragen sich die Forscher, warum Inflammasomen manchmal länger aktiv bleiben. Jüngsten Untersuchungen zufolge rufen alle bekannten Gefahrensignale, ob sie nun den ersten oder zweiten Signalpfad aktivieren, nur eine vorübergehende Entzündung hervor, auch wenn sie dauerhaft vorhanden sind. Nach einiger Zeit reagieren die Immunzellen einfach nicht mehr auf die per Signalpfad 1 gegebene Anweisung, Entzündungsproteine herzustellen, entwickeln also eine Toleranz. Eine dauerhafte Stimulation des Signalpfads 2 wiederum, der die Montage des Inflammasoms veranlasst, lässt die Immunzellen sogar absterben. Beides bringt letztlich den Entzündungsprozess zum Stillstand.

Offenbar bedarf es zusätzlicher Signale, um Inflammasomen über lange Zeit aktiv zu halten, wie das etwa beim Diabetes mellitus und bei der Fettleberhepatitis der Fall ist. Gemeinsam mit anderen Arbeitsgruppen konnte mein Team ein solches Signal aufdecken: Wie wir feststellten, verzögert Adenosin, das beim Verbrauch des Energieträgers ATP entsteht, den Abbau von Inflammasomen. Ironischerweise galt diese Substanz lange als Entzündungshemmer, weil sie in späteren Stadien der Entzündung dämpfend wirkt.

Was Kieselsäurekristalle in der Lunge verursachen

Die hier beschriebenen Entdeckungen haben zu einer neuen Sicht auf entzündliche Erkrankungen geführt. Demnach laufen zahlreiche unterschiedliche Reize – Fremdstoffe, Gefahrensignale und sogar Nahrungsbestandteile – an einer zentralen Schaltstelle zusammen: dem Inflammasom, das seinerseits nur über ein begrenztes Handlungsrepertoire verfügt. Die breit gefächerte Symptomatik entzündlicher Erkrankungen beruht auf Unterschieden beim auslösenden Signal, beim betroffenen Organ und bei der Dauer der Inflammasom-Aktivierung. So lösen in Gelenken abgelagerte Harnsäurekristalle akute Gichtanfälle aus, die zwischenzeitlich spontan abklingen, obwohl die Ablagerungen keineswegs verschwunden sind. Kieselsäurekristalle in der Lunge rufen dagegen chronische Entzündungsreaktionen mit Narbenbildung hervor.

Aus den neuen Erkenntnissen ergeben sich bisher ungenutzte molekulare Angriffspunkte für Medikamente. Diese könnten die Bildung des Inflammasoms stören – sei es durch Eingriffe in die verschiedenen Stadien seiner Entstehung oder durch Blockade der Rezeptoren für Gefahrensignale. Verschiedene Pharmafirmen experimentieren bereits mit entsprechenden Substanzen. Es wird jedoch noch mindestens ein Jahrzehnt dauern, bis diese in klinischen Studien auf ihre Wirksamkeit und Sicherheit geprüft sind.

Deshalb haben Forscher inzwischen begonnen, Arzneimittel, die bereits von der US-Gesundheitsbehörde zur The-

rapie einer bestimmten Krankheit zugelassen sind, auf ihre Wirkung gegen andere infektionsbedingte Leiden zu untersuchen, die über dasselbe Inflammasom vermittelt werden. Zum Beispiel dient das Medikament Anakinra schon längere Zeit zur Behandlung rheumatoider Arthritis. Es blockiert den Rezeptor, an den sich IL-1b nach Verlassen des Inflammasoms bindet. Die Substanz wird jetzt bei einem breiten Spektrum von Erkrankungen geprüft, an deren Entstehung das NLRP3-Inflammasom beteiligt ist.

Meine Arbeitsgruppe untersucht auch, ob der häufig bei Herzrhythmusstörungen eingesetzte Wirkstoff Digoxin die Entzündungsprozesse bei neurologischen Erkrankungen wie der Alzheimerdemenz abmildern kann. Nach jüngsten Erkenntnissen anderer Forscher hemmt die Substanz den hypoxieinduzierten Faktor HIF-1β. Dieser ist wiederum nach Untersuchungen meines Team für die dauerhafte Aktivierung des NLRP3-Inflammasoms erforderlich, das im Gehirn von Alzheimerpatienten nachgewiesen wurde. In hohen Dosen kann Digoxin allerdings seinerseits Verwirrheitszustände und andere Symptome verursachen, die auch bei Demenz auftreten, sowie weitere unerwünschte Nebenwirkungen hervorrufen.

Durch die rasante Zunahme von Arbeiten zur Biologie der Inflammasomen in den letzten Jahren besteht jetzt die Chance, chronische Entzündungen endlich an der Wurzel zu packen. Das wäre ein Segen für all die vielen Menschen, denen sie das Leben schwer machen. ~

Vielleicht kann das bei Herzrhythmusstörungen eingesetzte Digoxin Entzündungsprozesse bei Alzheimerdemenz abmildern

DER AUTOR



Wajahat Z. Mehal ist Medizinprofessor an der Yale University in New Haven (Connecticut), wo er Entzündungsprozesse erforscht. Außerdem behandelt er als Internist am Department of Veterans Affairs Medical Center in West Haven Patienten mit Lebererkrankungen.

QUELLEN

- Ouyang, X. et al.:** Inflammasome Biology in Fibrogenesis. In: *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular Basis of Disease* 1832, S. 979–988, 2013
- Schroder, K., Tschopp, J.:** The Inflammasomes. In: *Cell* 140, S. 821–832, 2010
- Strowig, T. et al.:** Inflammasomes in Health and Disease. In: *Nature* 481, S. 278–286, 2012

LITERATURTIPP

Stix, G.: Bösartige Entzündungen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 4/2007, S. 50–57
Artikel zur Rolle von Entzündungen bei Krebs

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382043

TITELTHEMA: ASTRONOMIE

Wie vermisst man ein Schwarzes Loch?

Schwarze Löcher verzerren die Raumzeit. Mit einem gigantischen Netzwerk von Teleskopen wollen Astronomen dies jetzt beobachten – und prüfen, ob die Regeln der allgemeinen Relativitätstheorie auch in nächster Nähe der Singularität noch gelten.

Von Dimitrios Psaltis und Sheperd S. Doeleman

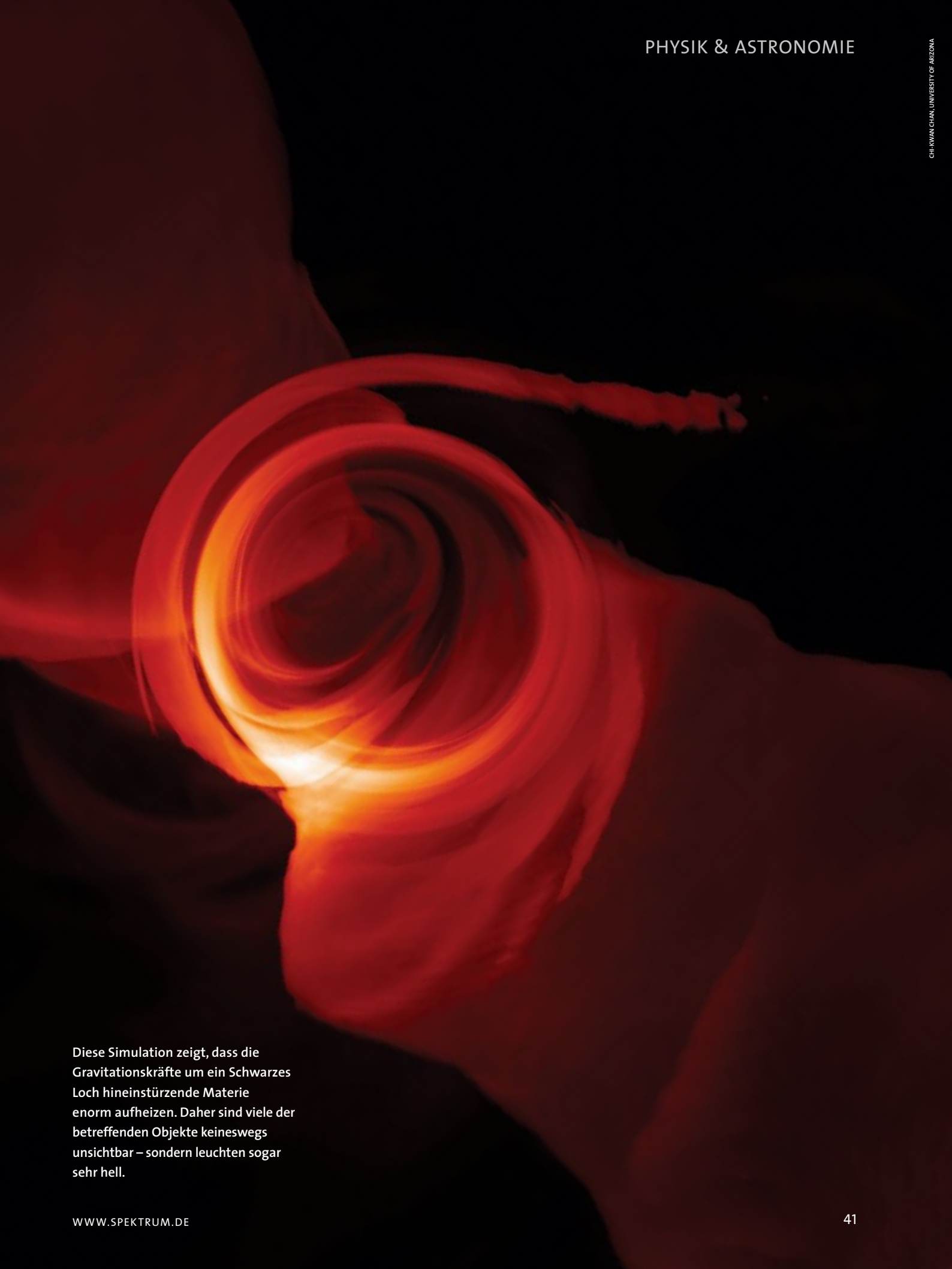
DIE SERIE IM ÜBERBLICK

100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

- | | | |
|---------------|--|---------------------|
| Teil 1 | ▶ Der Glanz des Genies
<i>Brian Greene</i> | Oktober 2015 |
| | Einsteins Weg zur
allgemeinen Relativitätstheorie
<i>Michel Janssen, Jürgen Renn</i> | |
| Teil 2 | ▶ Kosmische Würfelspiele
<i>George Musser</i> | November 2015 |
| Teil 3 | ▶ Warten auf die Welle
<i>Felicitas Mokler</i> | Dezember 2015 |
| Teil 4 | ▶ Auf der Suche nach der
Theorie von Allem
<i>Corey S. Powell</i> | Januar 2016 |
| | Alles nur im Kopf
<i>Sabine Hossenfelder</i> | |
| Teil 5 | ▶ Wie vermisst man ein
Schwarzes Loch?
<i>Dimitrios Psaltis, Sheperd S. Doeleman</i> | Februar 2016 |
| Teil 6 | ▶ Sind Zeitreisen möglich?
<i>Tim Folger</i> | März 2016 |
| | Wo Einstein irrte
<i>Lawrence M. Krauss</i> | |



FERDINAND SCHMITZ/ZEITUNGSPUBLIKONLINE (M)



Diese Simulation zeigt, dass die Gravitationskräfte um ein Schwarzes Loch hineinstürzende Materie enorm aufheizen. Daher sind viele der betreffenden Objekte keineswegs unsichtbar – sondern leuchten sogar sehr hell.

Ein ganzes Jahrhundert lang haben Experimentalphysiker Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vergeblich auf den Zahn gefühlt. Jeder dieser Tests spielte sich in relativ schwachen Gravitationsfeldern ab. Es ist an der Zeit, die Raumzeit dort zu untersuchen, wo sie viel härteren Bedingungen unterworfen ist – und das passiert nirgends im All auf extremere Weise als am Rand Schwarzer Löcher. Hier ist die Schwerkraft so stark, dass nicht einmal mehr Licht wieder entkommen kann, wenn es den so genannten Ereignishorizont überquert.

Das Zentrum von Schwarzen Löchern entzieht sich unserer Beobachtung, doch bereits in ihrem Umfeld ziehen die massereichen Giganten so stark an der umgebenden Materie, dass diese große Mengen elektromagnetischer Strahlung produziert. Die Schwerkraft drückt alles, was sich auf den Ereignishorizont zubewegt, extrem stark zusammen, wodurch Temperaturen im Bereich von Milliarden Grad Celsius erreicht werden. Im krassen Gegensatz zu den an sich unsichtbaren Schwarzen Löchern gehören deren Umgebungen daher oft zu den hellsten Regionen im Kosmos.

Wenn wir ein Schwarzes Loch mit Teleskopen betrachten könnten, deren Auflösung gut genug ist, um den Ereignishorizont abzubilden, dann könnten wir Materie auf ihrem Weg hinein verfolgen – und herausfinden, ob sie sich auf ihrer Reise ohne Wiederkehr so verhält, wie sie es auf Grund der allgemeinen Relativitätstheorie sollte. Dabei gibt es einen Haken. Ein Schwarzes Loch ist von der Erde aus gesehen winzig. Das gilt selbst für die supermassereichen Exemplare, die Astronomen heutzutage im Mittelpunkt der meisten Galaxien vermuten. Sie vereinen Millionen oder sogar Milliarden Sonnenmassen in sich und sind manchmal größer als unser ganzes Sonnensystem.

Der uns nächste Vertreter dieser Gattung ist Sagittarius A*, ein Objekt mit vier Millionen Sonnenmassen im Zentrum der Milchstraße. Sein Ereignishorizont würde für uns jedoch bloß 50 Mikrobogensekunden groß erscheinen – eine Himmelsregion so winzig wie ein rund zehn Zentimeter großes Objekt auf der Oberfläche des Mondes. Ein Instrument, das leistungsstark genug sein soll, um so etwas aufzulösen, müsste 2000-mal besser sein als das Weltraumteleskop Hubble.

AUF EINEN BLICK

GALAKTISCHES RAUMZEITLABOR

1 An Orten, wo der **Einfluss der Gravitation** extrem ist, hätten selbst kleine Abweichungen von den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie weit reichende Folgen. Daher lassen sich Einsteins Gleichungen gerade dort sehr genau testen.

2 Mit weltweit verteilten **Radioteleskopen** wollen Forscher demnächst eine solche Region genauer untersuchen: **Sagittarius A***, das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße.

3 In den nächsten Jahren kommen noch weitere Instrumente dazu. Sie werden **unabhängige Messwerte** dazu liefern, ob sich Sagittarius A* wirklich so verhält, wie Theoretiker es vermuten.

Über diese technischen Herausforderungen hinaus sind viele der Vorgänge dort auch durch grundlegende physikalische Umstände vor unseren Blicken verborgen. Einerseits spielen sie sich im galaktischen Zentrum ab, so dass dichte Wolken aus Gas und Staub zwischen uns und dem Schwarzen Loch liegen, die große Teile der elektromagnetischen Strahlung abschirmen. Zudem absorbiert die Materie, die bei ihrem Hineinstürzen das für uns interessante Licht aussendet, selbst breite Ausschnitte des Spektrums. Daher gibt es nur wenige Wellenlängen, die unbeeinflusst hindurchdringen und sich für unsere Beobachtungen eignen.

Die ganze Welt blickt auf ein Ziel – ganz buchstäblich

Das Event Horizon Telescope (EHT) ist ein internationales Projekt mit dem Ziel, diese Hürden zu überwinden und erstmals ein Schwarzes Loch detailliert untersuchen zu können. Um die höchste Auflösung zu erreichen, die von der Oberfläche der Erde aus überhaupt möglich ist, setzen die Ingenieure auf die so genannte Langbasisinterferometrie (Very Long Baseline Interferometry, VLBI). Mit dieser Technik richten Astronomen über die ganze Welt verteilte Radioteleskope gleichzeitig auf dasselbe Ziel, zeichnen die Daten auf und kombinieren diese anschließend mit Hilfe eines Supercomputers zu einem einzigen Bild. So formen die Teleskope ein zusammengesetztes, erdballgroßes Instrument. Da sich dessen erreichbare Auflösung nach den Gesetzen der Optik aus dem Verhältnis zwischen Wellenlänge und Durchmesser berechnet, ergibt die VLBI für Radiowellen das bestmögliche erdgebundene Teleskop überhaupt. Mit diesem Prinzip entstehen schon heute Bilder, deren Detailreichtum dasjenige von optischen Aufnahmen weit übersteigt.

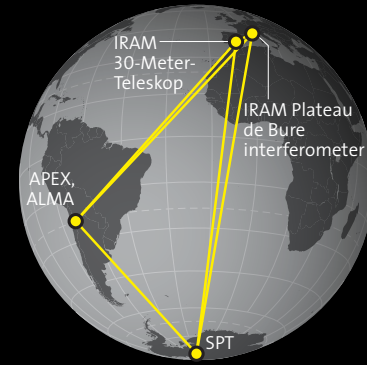
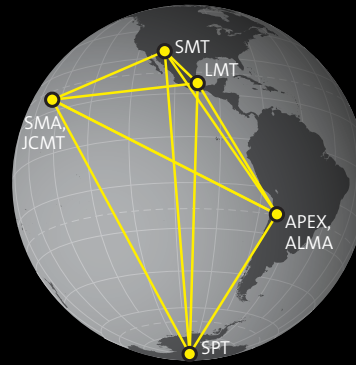
Technische Weiterentwicklungen werden es bald zulassen, auch mit den kürzesten Radiowellenlängen zu arbeiten und so alle Herausforderungen bei der Beobachtung Schwarzer Löcher zu meistern. Bei diesen Wellenlängen im Bereich von etwa einem Millimeter ist die Milchstraße weitgehend durchsichtig, so dass das EHT vergleichsweise ungestört auf Sagittarius A* und dessen innerste Regionen direkt am Ereignishorizont blicken wird. Es ist ein glücklicher Zufall, dass die Abbildungsleistung eines weltumspannenden VLBI-Teleskopverbunds bei millimetergroßen Wellenlängen rechnerisch gerade ausreichen sollte, um auch die Ereignishorizonte weiterer Schwarzer Löcher in den nächstgelegenen Galaxien zu erkennen.

Gleichzeitig entwickeln theoretische Astrophysiker mathematische Modelle und Computersimulationen, um die denkbaren Ergebnisse dieser kommenden Beobachtungen interpretieren zu können. Mit neuen Algorithmen, die speziell für leistungsfähige Superrechner ausgearbeitet wurden, lassen sie Materie um den Ereignishorizont wirbeln. Die Resultate legen nahe, dass das Schwarze Loch dem dabei ausgesendeten Licht etwas von seiner Form aufprägt.

Der Physiker James Bardeen von der University of Washington sagte 1973 die Existenz dieses »Schattens« voraus.

Ein erdballgroßes Teleskop

Mindestens neun Radioteleskope auf allen Kontinenten werden zusammen das Event Horizon Telescope EHT formen. Sie alle liegen an Orten, an denen die irdische Atmosphäre möglichst wenig die Signale stören kann. Indem die Astronomen sie gleichzeitig auf ein Ziel ausrichten und die gesammelten Daten miteinander verrechnen, entsteht ein virtuelles Teleskop mit dem Durchmesser der Erde und entsprechend hoher möglicher Auflösung – gut genug, um einen Bereich des Himmels abbilden zu können, der rechnerisch einer DVD auf dem Mond entspräche.



VERNETZTE INSTRUMENTE

- Submillimeter Telescope (SMT) in den USA
- Large Millimeter Telescope (LMT) in Mexiko
- Submillimeter Array (SMA) und James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) auf Hawaii
- Atacama Pathfinder Experiment (APEX) und Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) in Chile
- South Pole Telescope (SPT) an der Amundsen-Scott-Südpolstation in der Antarktis
- zwei Teleskope des Institut de Radioastronomie Millimétrique (IRAM) in Spanien und Frankreich

Per Definition kann kein Lichtstrahl, der den Ereignishorizont überquert, wieder zurückkommen. Bardeen fand jedoch den Bereich außerhalb dieser Grenze, in dem das Licht gerade in eine Umlaufbahn um das Schwarze Loch eintritt, den so genannten Photonenorbit (siehe Illustration S. 44). Wenn ein Strahl diese Bahn nach innen kreuzt, stürzt er unwiederbringlich spiralförmig ins Zentrum. Lichtstrahlen, die zwischen dem Ereignishorizont und diesem Orbit entstehen, können zwar entkommen – dafür müssen sie allerdings fast radial nach außen zeigen. Ansonsten kann das Schwarze Loch ihre Bahnen so sehr zurückbiegen, dass auch sie hineinfallen.

Der Kontrast zwischen dem hellen Ring des Photonenorbits und der deutlich lichtärmeren und daher nur schwach schimmernden Sphäre darunter ist der Schatten des Schwarzen Lochs. Er sollte von der Erde aus deutlich größer erscheinen, da ihn das starke Schwerfeld scheinbar aufbläst – die Gravitation krümmt das Licht stark und wirkt wie eine Vergrößerungslinse.

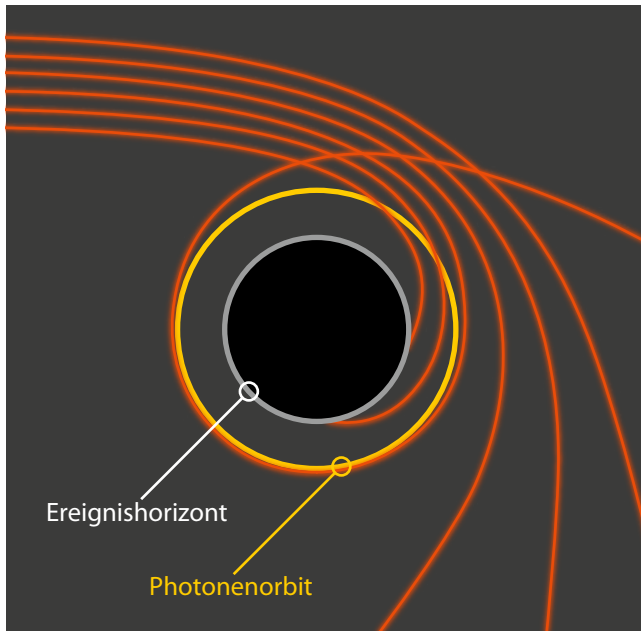
Das Event Horizon Telescope soll nun diesen Schatten und andere Eigenschaften des Schwarzen Lochs sichtbar machen. Erste Versuche aus den Jahren 2007 und 2009 haben bereits gezeigt, dass die technologische Herangehensweise grundsätzlich funktioniert. Dabei haben die Astronomen die Teleskope von drei Observatorien in Hawaii, Arizona und Kalifornien auf Sagittarius A* sowie ein weiteres supermassereiches Schwarzes Loch in der Galaxie Messier 87 ausgerichtet und die Messdaten anschließend verrechnet. Die Intensität der empfangenen Radiowellen von 1,3 Millimeter Länge entsprach in beiden Fällen dem, was die Wissenschaftler auf Grund ihrer Simulationen vom Schatten der Schwarzen Löcher erwartet hatten.

Mit dem ganzen, weltumspannenden Netz von Observatorien werden dann auch endlich genug Daten vorhanden sein, um ganze Bilder dieser Schwarzen Löcher zu errechnen. Und zudem werden sich VLBI-Messungen nutzen lassen, um so genannte Hotspots – einzelne, besonders aktive Regionen – aufzuspüren und ihre Bahnen zu verfolgen. Da die allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt, wie die Schwarzen Löcher aussehen sollten und wie Materie sie umkreist, erlauben diese Beobachtungen außerdem, die Theorie gerade dort genauen Tests zu unterziehen, wo ihre Konsequenzen am extremsten sind.

Schwarzes Loch oder nackte Singularität?

Das EHT wird ermöglichen, eine grundlegende Frage zu beantworten: Ist Sagittarius A* wirklich ein Schwarzes Loch? Alle bisherigen Beobachtungen lassen diesen Schluss zwar zu, doch niemand hat jemals ein Schwarzes Loch direkt betrachtet – und auch andere Erklärungen wären mit der allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar. Beispielsweise könnte Sagittarius A* etwas sein, was Physiker als nackte Singularität bezeichnen.

Eine Singularität ist ein Ort, für den es nicht möglich ist, bestimmte Gleichungen zu lösen, und an dem die Gesetze der Physik, wie wir sie kennen, daher nicht länger gelten. So gab es nach unserem heutigen Verständnis am Anfang des Universums einen Moment, an dem alle Bestandteile unseres Kosmos auf einen Punkt unendlich großer Dichte konzentriert waren. Eine weitere Form der Singularität liegt der allgemeinen Relativitätstheorie zufolge im Zentrum jedes Schwarzen Lochs. An diesem Punkt hat die Gravitation die Materie unbegrenzt stark verdichtet.



Lichtstrahlen, die sich auf ein Schwarzes Loch zubewegen (in dieser Illustration von links oben einlaufend), können in eine kreisförmige Umlaufbahn eintreten. Dieser »Photonenorbit« (gelb) liegt außerhalb des Ereignishorizonts. Jedes Photon, das in die Sphäre dazwischen stürzt, fällt auch unweigerlich weiter durch den Ereignishorizont. Lichtteilchen jedoch, die das Schwarze Loch außerhalb umlaufen, können wieder entkommen. Der Photonenorbit markiert daher die Grenze zwischen der hellen Umgebung eines Schwarzen Lochs und seinem wesentlich dunkleren »Schatten«.

Allerdings verbirgt der Ereignishorizont diese Region vor uns. Die allgemeine Relativitätstheorie verlangt aber nicht von jeder Singularität, derart gegen Beobachtungen abgeschirmt zu sein. Einige Lösungen von Einsteins Gleichungen beschreiben etwa normale Schwarze Löcher, die so schnell rotieren, dass ihre Horizonte sich gewissermaßen öffnen. Andere kommen ganz ohne Ereignishorizont aus. Solche nackten Singularitäten sind rein theoretische Konstrukte. Es gibt nicht einmal ein Rezept dafür, wie sie unter realen Bedingungen entstehen könnten. Jede astrophysikalisch plausible Computersimulation vom Kollaps eines Sterns endet mit einem Ereignishorizont. Bereits 1969 nahm der englische Mathematiker Roger Penrose an, dass es eine »kosmische Zensur« geben müsse, und die Natur eine nackte Singularität stets in einen Ereignishorizont hüllt. Die Hypothese wurde bis heute weder widerlegt noch bewiesen. Sollte das EHT im Mittelpunkt unserer Milchstraße eine nackte Singularität finden, wäre das für Einsteins Theorie zunächst kein Problem – schließlich erlaubt sie solche Gebilde. Allerdings wäre es eine Herausforderung für die moderne Physik, zu erklären, wie es dazu kam.

Wir erhoffen vom EHT außerdem, eine weitere, ebenfalls seit Langem kursierende Annahme über Schwarze Löcher

überprüfbar zu machen. Sollte sie sich als falsch erweisen, brächte das die allgemeine Relativitätstheorie in arge Bedrängnis. Anders als bei der kosmischen Zensur gibt es hier keinen mathematischen Spielraum.

Das »Keine-Haare-Theorem« fordert, dass sich jedes Schwarze Loch durch nur drei Eigenschaften vollständig beschreiben lässt: seine Masse, seinen Spin und seine elektrische Ladung. Anders formuliert sind zwei Schwarze Löcher, die hier jeweils die gleichen Werte haben, überhaupt absolut identisch – so, wie sich beispielsweise zwei Elektronen auch in nichts weiter unterscheiden. Schwarze Löcher haben keine »Haare«, also keine geometrischen oder sonstigen Charakteristika darüber hinaus.

Ein immer gleicher Schattenriss

Als wir erstmals darüber nachdachten, Schwarze Löcher mit der VLBI-Technik zu beobachten, gingen wir davon aus, die Formen und Größen ihrer Schatten verwenden zu können, um daraus die Drehimpulse und ihre Ausrichtungen zu berechnen. Doch unsere Simulationen hielten eine Überraschung bereit, die sich letztlich sogar als angenehm herausstellte. Egal, wie schnell wir die virtuellen Schwarzen Löcher in unseren Computern rotieren ließen, und unabhängig davon, wo wir relativ dazu einen Beobachter platzierten, blieb der Schatten stets fast rund und hatte immer eine scheinbare Größe von etwa dem Fünffachen des Ereignishorizonts. Sollte dem ein tieferer physikalischer Zusammenhang zu Grunde liegen, haben wir ihn noch nicht entdeckt. Doch dieses Phänomen ist eine hervorragende Voraussetzung, um die allgemeine Relativitätstheorie zu überprüfen – denn es tritt nur auf, falls diese korrekt ist (siehe »Die Raumzeit im Belastungstest«, rechts). Wenn Sagittarius A* einen Ereignishorizont besitzt und dessen Form von unseren Berechnungen abweicht, dann wäre das Keine-Haare-Theorem und damit Einsteins Theorie verletzt.

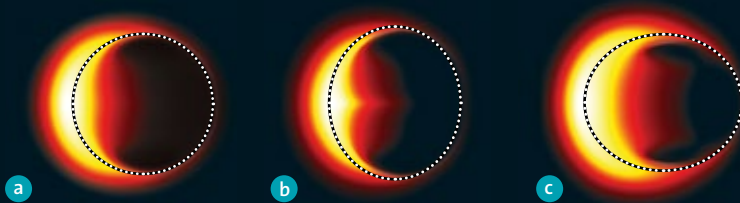
Das EHT wird wesentlich mehr Daten gewinnen, als nur für die Bilder an sich nötig wären. Die Antennen werden die Polarisationsrichtung der vom Schwarzen Loch ausgesandten Strahlung aufzeichnen, womit wir die magnetischen Felder um den Ereignishorizont kartieren können. Dann sollten wir auch die physikalischen Vorgänge besser verstehen, die zu so genannten Jets bei einigen Galaxien wie Messier 87 führen: Strahlförmige Ausbrüche ungeheuer energiereicher Materie, die den Galaxienkern mit nahezu Lichtgeschwindigkeit verlassen und bis zu 1000 Lichtjahre weit ins All reichen. Astrophysiker vermuten, dass die dafür notwendige Energie aus Magnetfeldern in der Nähe des Ereignishorizonts supermassereicher Schwarzer Löcher stammt. Die Felder zu vermessen wird helfen, diese Hypothese zu überprüfen.

Weitere Informationen über das Schwarze Loch können wir sammeln, indem wir verfolgen, wie Materie um es herumfließt. Die Bewegungen in der Akkretionsscheibe, in der sich Staub und Gas sammeln und verdichten, dürften hochgradig turbulent und unregelmäßig sein. In Computersimulationen entstehen oft konzentrierte, kurzlebige und ma-

Die Raumzeit im Belastungstest

SCHATTENSPIELE

Auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie haben Astrophysiker ausgefeilte Modelle für die Vorgänge im unmittelbaren Umfeld eines Schwarzen Lochs entwickelt. Mit den ersten Messungen des Event Horizon Telescope werden bald Daten von einem solchen Objekt vorliegen. Sollten sie nicht mit den Simulationen übereinstimmen, wird Einsteins Theorie vermutlich umgeschrieben werden müssen.

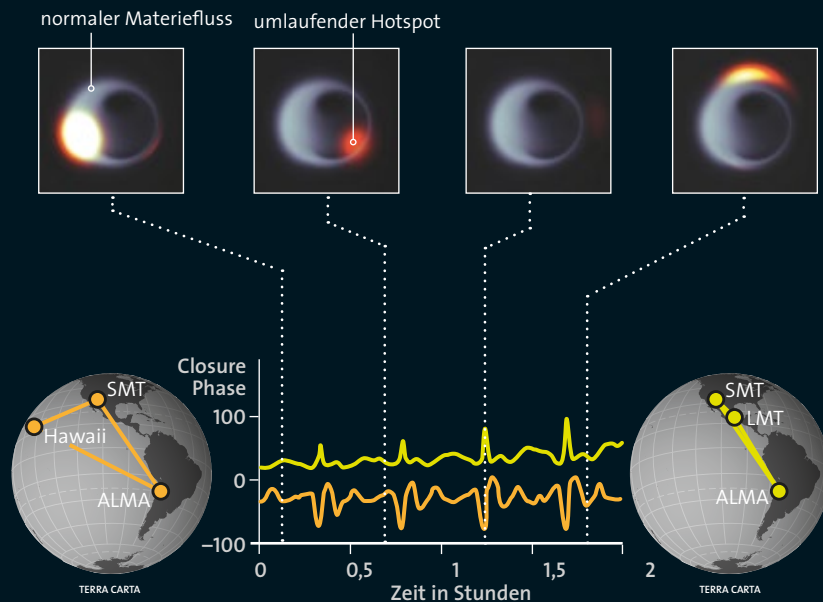


Ein Schwarzes Loch wirft auf die heiße Materie in seiner Umgebung einen »Schatten«. Dessen Form und Größe hängt im Prinzip allein davon ab, wie schnell das Schwarze Loch rotiert, wie stark die Lichtstrahlen in seiner Nähe durch die Gravitation abgelenkt werden und wo sich der Beobachter befindet. Alle drei Einflussgrößen scheinen zufällig gerade so zusammenzuspielen, dass der Schatten immer rund erscheint (a). Das trifft aber nur zu, wenn Einsteins Gleichungen richtig sind und das »Keine-Haare-Theorem« erfüllt ist. Dieses besagt, dass Masse, Spin und Ladung eines Schwarzen Lochs ausreichen, um es vollständig zu beschreiben. Sollten reale Schwarze Löcher einen eher elliptischen Schatten erzeugen, wie in (b) und (c) dargestellt, wäre das Theorem vermutlich falsch.

WENN MATERIE UNWUCHT HAT

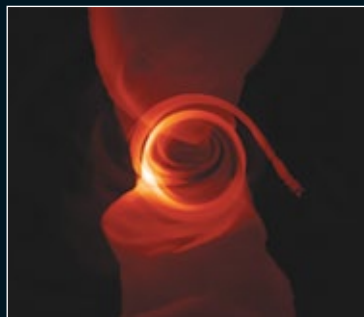
Manchmal leuchten Schwarze Löcher intensiv auf. Eine Erklärung dafür könnten dichtere »Hotspots« im Zustrom von Gas und Staub sein (Bilder rechts oben). An diesen Stellen steigt die Temperatur stark an, bevor sich die Bereiche wieder auflösen. Das EHT nutzt geschlossene Linienzüge zwischen jeweils drei Teleskopen und misst damit, wie lange das Licht zu jedem der Instrumentverbände unterwegs ist. Durch geometrische Berechnungen ist es dann möglich, auf den Ort der Hotspots im Materiefluss um das Schwarze Loch zu schließen.

Die Ergebnisse von Simulationen (Grafik rechts unten) zeigen ein solches Signal, das Closure Phase genannt wird (für die Summe der Phasen entlang des geschlossenen Dreiecks aus Teleskopen). Die beiden Kurven stammen von den zwei verschiedenen Linienzügen. Während der Hotspot das Schwarze Loch umkreist, entstehen Kurven, die an Herzschlagmuster erinnern. Richtig interpretiert, lässt sich aus ihnen der Verlauf der Raumzeit um das Schwarze Loch ablesen und mit theoretischen Vorhersagen vergleichen.

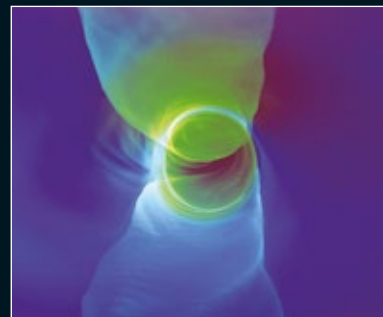


KOMPLEXITÄT IM RECHNER

Die Teams am EHT verwenden Supercomputer für ausgefeilte Simulationen von den Materieströmen um Schwarze Löcher. Wie bei anderen astronomischen Objekten zeigen sich auch hier höchst komplexe Phänomene. Auf dem rechten Bild ist ein Schwarzes Loch zu sehen, das vergleichsweise ruhig ist. Links wird gerade eine Region während eines Strahlungsausbruchs aktiv. Mit Hilfe solcher Berechnungen können Astrophysiker später das beobachtete Verhalten realer Schwarzer Löcher interpretieren.



CHIAKWAN CHAN, UNIVERSITY OF ARIZONA



CHIAKWAN CHAN, UNIVERSITY OF ARIZONA

SCHATTENSPIELE (A-C) UND 4. ABBILDUNGEN DARUNTER: AVERY, E. BRODRICK, UNIVERSITY OF WATERLOO & PERIMETER INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS

gnetisch aktive Bereiche ähnlich wie bei Sonneneruptionen. Diese Hotspots könnten die wechselhafte Helligkeit von Sagittarius A* erklären. Sie umkreisen das Schwarze Loch mit annähernd Lichtgeschwindigkeit in weniger als einer halben Stunde. Manchmal, wenn sie sich hinter dem Schwarzen Loch befinden, verzerrt der Gravitationslinseneffekt sie zu scheinbaren Ringen, die ähnlich aussehen wie einige Bilder, die das Weltraumteleskop Hubble von weit entfernten Galaxien aufgenommen hat. In anderen Fällen umkreisen sie das Schwarze Loch einige Male, verlieren ihre Energie und verblassen.

Die Hotspots könnten den ganzen Prozess der Abbildung mit dem EHT verkomplizieren. Denn die VLBI-Methode funktioniert ein wenig wie eine Langzeitbelichtung. Die Blende bleibt gewissermaßen die ganze Zeit offen. Dabei nutzen die Teleskope die Drehung der Erde, um das Schwarze Loch aus möglichst vielen Blickwinkeln aufzunehmen. Wenn ein heller Fleck darum kreist, wird dieser auf dem Bild später verwischt erscheinen, so wie ein Foto eines Menschen, der sich während der Verschlusszeit der Kamera schnell bewegt.

Doch könnte dank der Hotspots noch ein Test der allgemeinen Relativitätstheorie möglich sein. Mit einfachen trigonometrischen Berechnungen ergeben sich aus der unterschiedlichen Signallaufzeit des Lichts zu den Teleskopen die Positionen der Hotspots am Himmel (siehe »Die Raumzeit im Belastungstest«, S. 45). Denn wenn die energiereichen Regionen das Schwarze Loch umkreisen, erzeugen sie charakteristische Signaturen in den Rohdaten der Teleskope. Ähnlich wie sich mit Einsteins Gleichungen die Form und Größe des Schattens berechnen lässt, geht aus ihnen auch alles hervor,

was wir über die Umlaufbahnen der Hotspots wissen müssen – theoretisch zumindest. Die Wirklichkeit dürfte komplizierter sein. Dennoch sollte das EHT bei seiner besten Empfindlichkeit in der Lage sein, eine Struktur im Fluss zu erkennen. Das böte einen weiteren Weg, um zu überprüfen, ob die Voraussagen der allgemeinen Relativitätstheorie auf die Bewegungen rund um ein Schwarzes Loch zutreffen.

Das EHT bekommt Gesellschaft

Womit müssen wir rechnen, sollten unsere Beobachtungen Einsteins Theorie widersprechen? Der 1996 verstorbene, bekannte Astrophysiker Carl Sagan hat das geflügelte Wort geprägt, dass außergewöhnliche Behauptungen auch außergewöhnliche Beweise erfordern. In den Naturwissenschaften bedeutet das, dass unabhängige Experimente die Ergebnisse bestätigen müssen. In den kommenden Jahrzehnten könnten weitere leistungsfähige Teleskope solche Daten liefern, indem Astronomen etwa Neutronensterne – unglaublich dichte Objekte, die beim Kollaps massereicher Sterne entstehen – dabei beobachten, wie sie Schwarze Löcher umkreisen.

Das optische Interferometer GRAVITY, das gerade am Very Large Telescope VLT der Europäischen Südsternwarte in Chile eingerichtet wird, sowie die nächste Generation von Spiegelteleskopen mit mehr als 30 Meter Durchmesser werden bereits Sterne aus unserer Milchstraße verfolgen können, die Sagittarius A* auf Umlaufbahnen umkreisen, welche nur einige hundert Mal so groß sind wie der Ereignishorizont. Und das Square Kilometre Array SKA, das gerade in Australien und Südafrika gebaut wird, nimmt die Bahnen sehr schnell



Auf dieser Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble umringt eine scheinbar fast kreisrunde Galaxie (blau) eine helle, massereiche im Vordergrund. Beide liegen von der Erde aus zufällig so perfekt in einer Sichtlinie, dass durch den Gravitationslinseneffekt die hintere extrem verformt abgebildet wird. Ein ähnlicher raumzeitlicher Effekt sorgt auch dafür, dass Materie, die hinter einem Schwarzen Loch vorbeizieht, ringförmig verzerrt erscheinen würde.



rotierender Neutronensterne, Pulsare genannt, um das Schwarze Loch ins Visier. Dazu kommt später noch das satellitenbasierte Laserinterferometer eLISA (siehe »Warten auf die Welle«, SdW 12/15, S. 46), mit dem sich Gravitationswellen erfassen lassen sollten, die von sehr kompakten Objekten im Orbit um Schwarze Löcher stammen.

Das Gravitationsfeld eines Schwarzen Lochs zerrt so extrem an den Körpern in dessen Umgebung, dass deren elliptische Bahnen starken Störungen mit Richtungsänderungen unterworfen sind. Dieser Apsidendrehung genannte Effekt ist so stark, dass der Punkt des maximalen Bahnabstands nach nur einigen Orbits bereits einen vollständigen Kreis beschreiben kann. Insgesamt lässt sich aus den Bahnänderungen unterschiedlicher Objekte in wechselnden Abständen zum Schwarzen Loch ein dreidimensionales Modell der Raumzeit in dessen unmittelbarer Umgebung erstellen und so überprüfen, ob sich die Beobachtungen mit den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie decken.

All diese Instrumente werden dabei entscheiden helfen, ob Einsteins Theorie ein weiteres Jahrhundert Bestand haben kann oder ob sie zumindest für die extremen Verhältnisse um Schwarze Löcher durch eine noch bessere ersetzt werden muss – so wie sie ihrerseits Newtons Gleichungen ablöste. ~

DIE AUTOREN



Dimitrios Psaltis (links) arbeitet an der University of Arizona. Er untersucht das Verhalten von Schwarzen Löchern und Neutronensternen und entwickelt mögliche Tests der allgemeinen Relativitätstheorie in starken Gravitationsfeldern. **Sheperd S.**

Doeleman ist Astronom am Massachusetts Institute of Technology und Koordinator des Projektteams, das mit dem Event Horizon Telescope erstmals Schwarze Löcher direkt beobachten will.

QUELLEN

Chan, C.-K. et al.: The Power of Imaging: Constraining the Plasma Properties of GRMHD Simulations using EHT Observations of Sgr A*. In: *Astrophysical Journal* 799, 1, 2015

Doeleman, S. S. et al.: Detecting Flaring Structures in Sagittarius A* with High-Frequency VLBI. In: *Astrophysical Journal* 695, S. 59–74, 2009

Doeleman, S. S. et al.: Jet-Launching Structure Resolved Near the Supermassive Black Hole in M87. In: *Science* 338, S. 355–358, 2012

Johannsen, T., Psaltis, D.: Testing the No-Hair Theorem with Event Horizon Telescope Observations of Sagittarius A*. In: *Astrophysical Journal* 718, S. 446–454, 2010

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372446

Zwischen weißer Pracht und Schmutzskulptur

Schneeflächen schmelzen oft ungleichmäßig und hinterlassen zahlreiche Vertiefungen. An den exponierten Stellen wiederum sammeln sich Verunreinigungen. Beide Prozesse hängen eng zusammen.

»Der Schnee ist eine erlogene Reinlichkeit.«
Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Haben Sie auch schon beobachtet und sich darüber gewundert, dass ein völlig ebenes, ungestört tauendes Schneefeld im Lauf der Zeit wellenartige Strukturen ausbildet? Möglicherweise ist Ihnen zudem aufgefallen, dass sich an einigen Stellen Verunreinigungen besonders konzentrieren. Beide Phänomene haben sogar miteinander zu tun. Vielfältige Wechselwirkungen steuern dabei, wie die Energie der warmen Umgebung allmählich in die Decke aus Eiskristallen gelangt.

Die Mulden im Schnee sind meist zwischen zwei und 50 Zentimeter breit und formen oft regelmäßige Muster. Sie bilden sich an den verschiedensten Orten – merkwürdigerweise unabhängig davon, ob die Fläche geneigt ist oder eben, und ob sie vorwiegend in der

Sonne oder im Schatten liegt. Bei fortgeschrittenem Abtauen bleibt manchmal nur noch ein Gerippe von Rändern stehen.

Eine glatte Fläche tendiert dazu, rau zu werden. Das ist eine allgemeine Erfahrung: Wasser kräuselt sich schon unter leichtem Wind, und bei Sand verwandeln Luftströmungen das Terrain allmählich in eine Dünenlandschaft. Ebenen ganz unterschiedlicher Art sind offenbar instabil, und kleinste Ursachen können sich hier zu großen Wirkungen aufschaukeln. So ebenfalls beim tauenden Schnee. Selbst wenn man davon ausgehen kann, dass er die zum Schmelzen nötige Energie gleichmäßig aufnimmt, verursachen stets vorhandene winzige Unebenheiten einen sich selbst verstärkenden Prozess. Dieser macht aus den Rauigkeiten ein System von Mulden und Vielecken.

Das beginnt zum Beispiel damit, dass eine winzige, von der Sonne weggenigte Flanke etwas langsamer schmilzt als die dem Licht zugewandte Seite. Und wenn erst einmal eine kleine Senke entstanden ist, wirkt sich die Strahlung

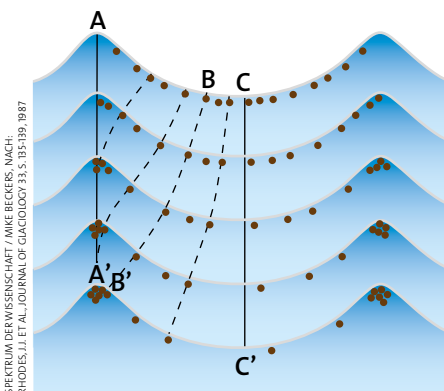
umso stärker aus: Die konvexen Stellen reflektieren die Energie weit gehend von der Schneefläche weg, während die konkaven Einbuchtungen sie in die Vertiefungen hineinlenken. Letztere absorbieren also mehr Energie und schmelzen schneller (siehe Grafik rechts).

Wenn die weißen Dünen wandern

Feldstudien bekräftigten diese Modellvorstellung. Dabei wiesen die Forscher außerdem nach, dass die Strukturen nicht an ihrem Entstehungsort fixiert bleiben: Weil die Südflanken naturgemäß mehr Sonnenlicht erhalten, taut der Schnee hier schneller, und die Mulden driften bei dünner werdender Schneedecke allmählich nach Norden. Dabei prallen verschiedene Einbuchtungen aufeinander, was regelmäßige polygonale Muster erzeugen kann.

Aber auch ohne direkte Lichteinstrahlung entstehen Vertiefungen. Streicht nämlich warme Luft über ein Schneefeld, überträgt sie mehr Energie, wenn sie auf Neigungen trifft – und seien sie noch so klein. Abermals werden damit zufällig vorhandene winzige Ver-

Schmutzpartikel sind auch daran beteiligt, wenn sich am Straßenrand abgelagerter Schnee in skurrile Skulpturen verwandelt. Stets findet man den gesammelten Dreck an den hervorstehenden Stellen.



Die Kurven sind die Oberflächen des Schnees während nach unten hin zunehmender Abtragung. Ein kleiner Fremdkörper, der sich ursprünglich bei Punkt B befand, landet gemeinsam mit den zwischen A und B befindlichen Teilchen bei B'. So konzentrieren sich Verunreinigungen allmählich an den höher gelegenen Rändern.

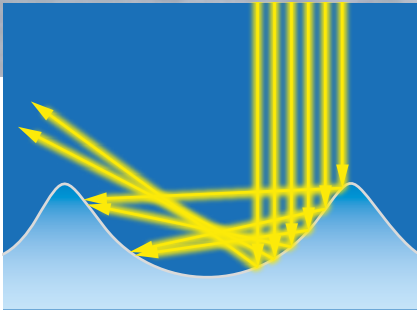




BEIDE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / AMKE BECKERS



Eine abtauende Schneeschicht hinterlässt oft eine hügelige Oberfläche, sowohl bei feuchtem (oben, links) als auch bei trockenem Untergrund (rechts).

Der helle Schnee reflektiert einfallende Lichtstrahlen vorwiegend in die Mulde. So schmilzt er dort besonders schnell, und das Loch wird tiefer – ein sich selbst verstärkender Prozess.

tiefungen zu größeren Senken. Der Wind verfängt sich darin immer mehr. So hat er länger Zeit, Energie abzugeben, und zusätzlich höhlen entstehen die Wirbel die Mulden aus. Die Unebenheiten prägen dem Windstrom manchmal sogar einen Rhythmus auf, der in regelmäßigen Abständen weitere Löcher hervorruft.

Bei alledem macht es nun einen großen Unterschied, wie sauber der Schnee ist. So stellten Wissenschaftler beispielsweise fest, dass unter dem Einfluss kleiner Schmutzpartikel unregelmäßige Strukturen entstehen. Hinzu kommt, dass sich die Verunreinigungen bevorzugt an den Spitzen der Wälle sammeln. Auf die Teilchen wirken nämlich zwei Kräfte: die Adhäsion auf Grund der Benetzung mit Tauwasser sowie ihr Gewicht. Je nach Beschaffenheit und Größe der Körner hat das unterschiedliche Folgen. Die Erdanziehung allein würde bei der Abtragung nur dazu führen, dass die Körner einfach direkt in Richtung des Erdbodens sinken. Vorwiegend adhäsiv gebundene Teilchen driften hingegen senkrecht zur Oberfläche der Schneeschicht und damit insgesamt eher schräg (siehe Illustration links).

Welcher Effekt dominiert, hängt vor allem vom Verhältnis der Oberfläche zum Volumen der Teilchen ab. Kleine Schmutzpartikel kleben besonders stark an ihrer eisigen Umgebung. So

landen vor allem sie an den Rändern und konzentrieren sich in Folge der Muldenbildung zwangsläufig auf den Kämmen dieser kleinen Gebirge.

Jedes Korn gestaltet mit

Die Verunreinigungen wirken sich ihrerseits wieder auf die Abtragung des Schnees aus – sowohl unterstützend als auch hemmend. Das hängt davon ab, ob die Energie vorwiegend durch Sonnenstrahlung oder durch die bewegte warme Luft übertragen wird. Wenn der dunkle Schmutz das Licht absorbiert, forciert das den Tauvorgang. Bei hoher Konzentration können die Beimischungen den Schnee jedoch so gut abschirmen, dass sie den entgegengesetzten Effekt haben.

Bei bedecktem Himmel spielt die Sonneneinstrahlung überhaupt keine Rolle mehr, nur der warme Wind überträgt dann noch Energie auf den Schnee. Dabei isolieren selbst kleinere Fremdkörperanteile, so dass sich an diesen Stellen die Abtragung verlangsamt. Die hohe Schmutzkonzentration an den Rändern vertieft in jedem Fall die Mulden weiter – was wiederum zusätzliches Material an die Flanken transportiert.

An winterlichen Straßen kann man das Zusammenspiel schließlich noch in ganz besonders ausgeprägter Weise beobachten. Oft schrumpft der von

Räumdiensten an der Seite aufgetürmte Schnee hier sehr ungleichmäßig zusammen und hinterlässt dabei komplexe Skulpturen. An ihnen ist dann deutlich zu erkennen, wie sich an den hervorstehenden Stellen über die beschriebenen Prozesse Streugut und Schmutz sammeln (siehe Fotos links unten). Deren zufällige Anfangsverteilung im geschichteten Weiß formt ganz maßgeblich die schmelzenden Hügel. Wer sie überhaupt bewusst und mit etwas Wohlwollen zur Kenntnis nimmt, stellt vielleicht erstaunt fest, wie absichtsvoll gestaltet die Skulpturen erscheinen – und dass sie dennoch ganz natürlich entstehen konnten. ~

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

Rhodes, J.J. et al.: Mode of Formation of »Ablation Hollows« Controlled by Dirt Content of Snow. In: Journal of Glaciology 33, S. 135–139, 1987

Dieser Artikel und Links im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382054

Die Wirklichkeit der Natur

Bis heute ringen die Physiker um die korrekte Interpretation der Quantenmechanik. Insbesondere herrscht Uneinigkeit darüber, inwieweit die von der Theorie beschriebenen Objekte »real« sind. Oder erweist sich die Frage nach deren Wirklichkeit gar als sinnlos?

Von Michael Springer

Der Kongress, der die Entscheidung bringen sollte, fand wie seit zweihundert Jahren im Kloster Mi Sang statt, welches am Ufer des Gelben Flusses liegt. Die Frage hieß: Ist der Gelbe Fluss wirklich, oder existiert er nur in den Köpfen? Während des Kongresses aber gab es eine Schneeschmelze im Gebirg, und der Gelbe Fluss stieg über seine Ufer und schwemmte das Kloster Mi Sang mit allen Kongressteilnehmern weg. So ist der Beweis, dass die Dinge außer uns, für sich, auch ohne uns sind, nicht erbracht worden.

Bertolt Brecht, »Turandot oder der Kongress der Weißwäscher«

Man kann über die Welt geteilter Meinung sein. Sie ist die beste aller möglichen, wollte der Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) beweisen; sie ist die schlechtestmögliche, fand später Arthur Schopenhauer (1788–1860). Im Mittelalter galt sie als Scheibe, und Kreationisten beharren noch heute darauf, dass sie nicht viel älter als 6000 Jahre ist. Für Kolumbus bildete sie eine meerbedeckte Kugel mit dem eurasischen Kontinent – im Westen Europa, im Osten Indien, weswegen er westwärts von Spanien aufbrach, um auf dem

Seeweg um den Globus herum Indien zu erreichen. Als der Genuese endlich Land sah, meinte er, das ersehnte Ziel vor Augen zu haben. Er nannte das Gebiet folgerichtig Westindien und die Einwohner Indianer. In Wirklichkeit hatte Kolumbus die Neue Welt entdeckt.

In Wirklichkeit: Dieses auftrumpfende »in Wirklichkeit« wird immer dann bemüht, wenn sich eine vorgefasste Meinung über die Natur als falsch erweist. Die wirkliche Welt wird »entdeckt« – wie ein gedeckter Tisch, von dem man mit einem Ruck das Tischtuch wegzieht mitsamt den Tellern und Tassen. Klirrend fallen die Meinungen zu Boden und aufgedeckt wird, was darunter liegt: der nackte Tisch, Tabula rasa, die bloße Wirklichkeit.

Also her mit der unverstellten Wahrnehmung unserer fünf Sinne, die uns die Welt so zeigen, wie sie wirklich und wahrhaftig ist! Um die pure Wirklichkeit zu erkennen, müssen wir den Sinnen trauen, nicht irgendeiner Meinung glauben: Wie jeder Astronaut sieht, ist die Erde keine Scheibe.

Dagegen wenden die modernen Physiker ein, dass ihr Gegenstand – die so genannte physikalische Realität – sich von dem, was wir gewöhnlich unter wirklich verstehen, ganz erheblich unterscheidet. Zwischen Ursache und Wirkung besteht im Mikrokosmos kein streng deterministischer Zusammenhang wie in der klassischen Mechanik Newtons und Einsteins; in der Quantenwelt herrschen Wahrscheinlichkeitsgesetze. Gemäß der gängigen Interpretation der Quan-

AUF EINEN BLICK

AUSSAGEN ÜBER DIE NATUR

1 Die Naturforschung beansprucht, Aussagen über die **Wirklichkeit** zu treffen, anstatt diese oder jene **Meinung** zu äußern – doch es ist gar nicht so einfach, ein **Kriterium für wissenschaftlich sinnvolle Sätze** anzugeben.

2 Dem handgreiflichen **Erfolg der Quantenphysik** steht das Rätseln über die **Deutung** ihrer unanschaulichen Aussagen gegenüber. Betreffen diese überhaupt eine vom Beobachter unabhängige Wirklichkeit?

3 In der modernen **Kosmologie** spielen **Quantenphänomene** eine zentrale Rolle, bei deren Entstehung gewiss kein Beobachter zugegen war. Doch auch eine vom Beobachter unabhängige Theorie ist nicht mit der Wirklichkeit identisch.

Ob Urknall oder Teilchenzerfall – die moderne Physik beschreibt Naturvorgänge mit unanschaulichen Theorien.



Der Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716).

tenmechanik hängt dies mit dem Einfluss des makroskopischen, klassisch zu beschreibenden Beobachtungsvorgangs auf das mikroskopische Quantenobjekt zusammen.

Was nun? Sollen wir also zuerst auf unsere fünf Sinne bauen, dann diese durch raffinierte Instrumente ins winzig Kleine erweitern und am Ende den abstrakt-mathematisch formulierten Aussagen einer unanschaulichen Theorie folgen? Was ist von einer Wirklichkeit zu halten, die sich nicht der unmittelbaren Anschauung offenbart, sondern erst dem Einsatz komplizierter Apparate und Theorien, die man nur nach jahrelangem Studium versteht? Und wie ist es um die Objektivität dieser Wirklichkeit bestellt, wenn sie – wie im Fall der Quantenphysik – je nach der Art der Frage, die der Experimentator stellt, einmal so und einmal anders antwortet? Fast scheint es, wir hätten uns im Kreis bewegt. Wir sind vom Glauben an ein System von theologisch-philosophischen Lehrmeinungen zu einem Gebäude von abstrakten, sinnenfernen Behauptungen gelangt, die wiederum in kanonisierten Lehrbüchern stehen und unseren Alltagsverstand nicht weniger strapazieren – oder sogar noch mehr – als die Dreieinigkeit Gottes oder die dunklen Sätze des Denkers Martin Heidegger (1889–1976) vom Sein des Seienden und dem Nichten des Nichts.

Vor allem unter Geisteswissenschaftlern ist oft die Auffassung zu finden, dass die Naturwissenschaft nur eine Ideologie ist, die sich einbildet, über einen privilegierten Zugang zur Wirklichkeit zu verfügen. In Wahrheit handle es sich um

eine Form sozialer Praxis unter anderen, nicht anders als etwa Kunst oder Religion, meinte der österreichisch-amerikanische Philosoph Paul Feyerabend (1924–1994). Ihm zufolge gibt es keinen prinzipiellen Unterschied zwischen Astrologie und Astronomie. Astrologen wie Astronomen deuten den Lauf der Gestirne; beide stellen gewisse Einflüsse der außerirdischen Konstellationen auf irdische Abläufe fest; beide haben ihre Anhänger; beide finden, die jeweils andere Fraktion sei im Irrtum. Eine sozialanthropologische Beschreibung beider Disziplinen – das heißt eine Beobachtung, die sich auf das astrologische beziehungsweise astronomische Interagieren der Teilnehmer beschränkt – muss zu dem unparteiischen Schluss kommen, dass es sich bloß um zwei durch feste und unversöhnliche Überzeugungen getrennte Gruppen von Himmelsbeobachtern handelt.

Gibt es wirklich keinen Unterschied? Wenn man von der soziologischen Momentaufnahme zur historischen Betrachtung übergeht, fällt sofort auf: Astrologen halten an ihrer Überzeugung vom Zusammenhang zwischen Sternzeichen, Geburtsdatum und Schicksal unverändert fest, während sich das Weltbild der Astronomen seit der Antike im Licht immer neuer Erkenntnisse fortwährend radikal gewandelt hat. Dennoch erweist sich das Abgrenzungsproblem – was unterscheidet empirische Forschung von Pseudowissenschaft, religiösen Glaubenssätzen und metaphysischen Spekulationen – als so knifflig, dass es Bibliotheken füllt. Ein Unterscheidungskriterium nach dem anderen entpuppte sich als zu eng.

Radikaler Sensualismus

Man könnte etwa darauf beharren: Wissenschaftlich sinnvoll ist nur, was uns die Sinne unmittelbar mitteilen; alles andere ist Meinung. Dieser radikale Sensualismus erklärt alle wissenschaftlichen Begriffe zu bloß »denkökonomischen« Konstruktionen. Wenn Forscher Theorien entwickeln, Modelle entwerfen, unzählige empirische Daten in mathematische Formeln kleiden und daraus wiederum neue empirische Vorhersagen herleiten, dann dient das nur der Vereinfachung und Erleichterung ihrer Arbeit, sagt aber über eine hinter den Sinneserlebnissen stehende Wirklichkeit nichts aus.

Doch der Sensualismus erwies sich rasch als Erkenntnisbremse. Er hinderte beispielsweise Ende des 19. Jahrhunderts Physiker wie Ernst Mach (1838–1916) und den jungen Max Planck (1858–1947) daran, Atome für reale Objekte zu halten, weil diese mit damaligen Apparaten nicht zu sehen waren. Offenbar ist es hilfreich, auch nicht unmittelbar erfahrbaren Dingen wie Elektronen oder Quarks Realität zuzubilligen.

Man braucht dann aber ein Kriterium für sinnvolle Sätze, die – wie die meisten wissenschaftlichen Aussagen – nicht nur unmittelbare Sinneserfahrungen beschreiben, sondern auch logische und mathematische Allgemeinbegriffe enthalten. Darum hat der logische Positivismus postuliert: Sinnvoll ist ein Satz dann, wenn er sich verifizieren lässt. Für Sätze wie »Das All ist 13,8 Milliarden Jahre alt« oder »Alle Vögel stammen von Dinosauriern ab« lassen sich Verifikationsmethoden angeben, also sind sie sinnvoll – sehr zum Unterschied

von Sätzen wie »Gott ist groß« oder »Das Nichts nichtet«, die deshalb zu sinnlosen Wortkombinationen erklärt werden.

Bald erwies sich dieses Kriterium als zu eng. Viele wissenschaftliche Sätze sind Allaussagen: Sie folgern aus bisherigen empirischen Bestätigungen einer Aussage, diese sei auch in Zukunft gültig. Doch solche induktiven Schlüsse, die aus Einzelfällen allgemeine Folgerungen ziehen, sind streng genommen unzulässig; sie treffen nur wahrscheinlich zu. Berühmt ist das Beispiel des Philosophen Karl Popper (1902–1994) »Alle Schwäne sind weiß«. Dafür sprechen viele Beobachtungen, doch das ist noch kein Beweis. Wenn es in einem Winkel des Universums nur einen einzigen schwarzen Schwan gibt, ist die Aussage falsch. Das Verifizieren einer Allaussage ist eine unendliche und somit unlösbare Aufgabe. Also ist das Verifikationskriterium untauglich für viele Sätze der Wissenschaft – beispielsweise auch für so genannte Dispositionsprädikate wie »zerbrechlich« oder »schmelzbar«. Der Satz »Glas ist zerbrechlich« wäre erst komplett verifiziert, wenn wir jedes Stück Glas im Universum zertrümmert hätten.

Darum hat Popper das schwächere Falsifikationskriterium vorgeschlagen: Sinnvoll sind Sätze, die sich widerlegen lassen. Damit gelten die obigen Beispiele »Gott ist groß« und »Das Nichts nichtet« weiterhin als sinnlos, denn wie will man sie falsifizieren? Dafür sind Dispositionsprädikate und die Behauptung ausnahmslos weißer Schwäne nun als sinnvoll gerettet, denn sie dürfen als wahr gelten, bis ein hartnäckiger Falsifikationist ein unzerbrechliches Glas, ein unschmelzbares Metall oder einen schwarzen Schwan vorweisen kann.

So richtig glücklich können Wissenschaftstheoretiker aber auch mit Poppers Kriterium nicht sein. Es schließt zwar eine Pseudowissenschaft wie die Astrologie aus dem Kanon der empirischen Forschung aus, denn einen Astrologen eines Irrtums zu überführen, wäre vergebliche Liebesmüh – aber praktizierende Naturwissenschaftler sind nun einmal keine Falsifikationisten. Man erforscht die Natur nicht mit dem Ziel, falsche Theorien aufzustellen und anschließend zu widerlegen. Man ist stolz auf Sätze wie »Das All ist 13,8 Milliarden Jahre alt« und »Vögel stammen von Dinosauriern ab«, weil man so starke Indizien dafür besitzt, dass man sie für praktisch verifiziert halten möchte.

Freilich ruhen solche Sätze auf einem derart komplizierten Geflecht von empirischen Daten und mathematisch formulierten Theorien, dass man für sie unmöglich eine simple Verifikationsvorschrift angeben kann. Der amerikanische Wissenschaftsphilosoph Willard Van Orman Quine (1908–2000) hat überzeugend dargelegt, dass ein Theoriegebäude nicht in separate Einzelaussagen zerlegt werden kann, die sich dann jede für sich verifizieren lassen. Nur die Theorie als Ganze lässt sich empirisch bestätigen oder widerlegen. Zwar könnte ein Verteidiger des ersten Beispielsatzes sagen: »Die kosmische Hintergrundstrahlung lässt sich am besten als Nachglühen eines Urknalls vor 13,8 Milliarden Jahren deuten« und obendrein die Rotverschiebung der Spektrallinien als Indiz für die Expansion des Weltalls infolge des Urknalls ins Treffen führen und so weiter. Das hat aber einige wissen-

schaftliche Dissidenten – ganz zu schweigen von vielen spekulationsfreudigen Laien – nicht daran gehindert, das Urknallmodell abzulehnen oder zumindest in Frage zu stellen.

Ähnlich steht es um den zweiten Beispielsatz. Kreationisten, welche die Entstehung der Arten durch natürliche Selektion ablehnen und stattdessen an göttliche Interventionen glauben, halten Saurier wie Vögel für gleichzeitige Geschöpfe eines übermenschlichen Konstrukteurs. Wenn man ihnen Fossilien des Archäopteryx und anderer Zwischentypen vorlegt, um die Abstammung der Vögel von Sauriern zu belegen, sehen sie darin wahlweise weitere Gottesgeschöpfe oder Fälschungen: Darwinisten hätten einem Saurierabdruck Vogelfedern angeklebt.

Was ist »wirklich wahr«?

Mit welchem Recht dürfen wir also sagen, das kosmologische Standardmodell und die Evolutionslehre seien »wirklich wahr«? Meine Antwort lautet: Was wir über die Natur wissen, ist Resultat eines Selektionsprozesses, bei dem es nicht wie in der Bioevolution um das Überleben von Arten geht, sondern um das Bestätigen von Theorien, hier wie dort in einem umständlichen Verfahren von Versuch und Irrtum. Eine Theorie, die »überlebt«, muss aber zur Natur passen, so wie eine Spezies, die nicht ausstirbt, sich ihrer Umwelt angepasst hat. Und diese – niemals vollkommene – Übereinstimmung zwischen Natur und Theorie bedeutet, dass die Theorie »wirklich wahr« ist.



CHARLES SCOLIK, 1905 / PUBLIC DOMAIN

Der Physiker Ernst Mach (1838–1916).



Zwei Mitbegründer der Quantentheorie: Niels Bohr (1885–1962) und Werner Heisenberg (1901–1976).

Natürlich ist diese Wahrheit nicht absolut, sondern vorläufig – aber auch nicht demnächst absolut falsch. Es hat durchaus Theorien gegeben, die lange galten und sich letztlich als falsch erwiesen wie das geozentrische System in der Kosmologie; doch gewisse große Theorien wie die newtonsche Mechanik wurden nicht widerlegt, sondern relativiert. Man könnte sogar einräumen, dass die antike Physik des Aristoteles und das geozentrische System gar nicht absolut falsch sind, sondern die Alltagserfahrung recht zutreffend beschreiben. Man muss nur berücksichtigen, dass sie – wie später Newtons Physik – lediglich einen kleinen Realitätsausschnitt näherungsweise beschreiben, nämlich den irdischen Alltag beziehungsweise die Planetenbahnen. Das war eben zu Zeiten des Aristoteles beziehungsweise Newtons der für die unmittelbare Erfahrung und für die damals vorhandenen Instrumente zugängliche Wirklichkeitsbereich. Die jeweils aktuell zutreffende Physik beschreibt, so vollständig sie kann, die zu ihrer Zeit bekannte Natur – und deren Bereich wird durch den Stand der Technik definiert, denn davon hängt die Leistungsfähigkeit der physikalisch-astronomischen Instrumente ab.

Philosophisch Geschulte mag all das fahrlässig anmuten. Wahr, wirklich und real – wie kann man mit ehrwürdigen Begriffen so Schindluder treiben? Die Schulphilosophie hat für solche Irrwege längst Verdammungsurteile parat, regelrechte Schimpfworte: Sie spricht vom »naiven Realismus«,

wenn man vernachlässigt, dass unser Erkenntnisapparat alles formt, was wir wahrnehmen. Heidegger konstatiert überall ein »vulgäres Seinsverständnis«, eine regelrechte »Seinsvergessenheit«, die sich mit der bloßen »Zuhandenheit« der Dinge zufriedengibt, wie es dem technischen Hantieren eben passt, denn die »Wissenschaft denkt nicht«.

Woher willst du eigentlich wissen, fragen Philosophen gern, dass deine Wahrnehmungen, Sätze und Theorien etwas jenseits deiner Wahrnehmungen, Sätze und Theorien erfassen, repräsentieren, wiedergeben? Du hast doch nichts als deine Wahrnehmungen, Sätze und Theorien. Also glaubst du bloß, sie besagten etwas über eine Wirklichkeit jenseits von ihnen. Aber diese Wirklichkeit wäre so jenseitig und unfassbar wie Gott, und an den klammerst du dich doch wohl nicht, solange du Wissenschaftler bleiben willst?

Gegen die skeptische Leugnung einer bewusstseinsunabhängigen Realität ist kein Kraut gewachsen. Es stimmt einfach, dass wir stets nur über Wahrnehmungen, Sätze und Theorien reden und nicht über eine davon separate Wirklichkeit – denn die nackte, von uns nicht wahrgenommene, nicht besprochene und nicht theoretisch beschriebene Wirklichkeit ist so finster, blind und stumm, als wäre sie nicht vorhanden. Um das Bild vom Anfang aufzunehmen: An die Tabula rasa der Wirklichkeit kommen wir nicht heran, indem wir das Tischtuch so ungeschickt wegreißen, dass alles, was an Besteck und Geschirr darauf lag, zu Boden fällt. Das Kunst-

stück besteht darin, die Decke so entschlossen wegzuziehen, dass Messer, Gabeln, Gläser und Teller auf dem nunmehr nackten Tisch bleiben, als hätte es nie ein Tischtuch gegeben. Dann erst können wir die Grundlage einer möglichen Erkenntnismahlzeit sehen: den Tisch mitsamt den Instrumenten, die man zum Essen braucht. Rund um den Tisch – die »nackte« Wirklichkeit – versammeln wir uns zur Mahlzeit, aber wir essen nicht mit bloßen Händen.

Die Sätze der Alltagssprache und der naturwissenschaftlichen Theorien haben ein Ziel, das über sie selbst hinausweist, eine Intention. Sie verstehen sich in der Regel nicht als Teile eines Selbstgesprächs, sondern als mehr oder weniger erfolgreiche Versuche, Aussagen über die Wirklichkeit zu machen. Ob diese Aussagen zutreffen oder nicht, wahr sind oder falsch, zeigt sich in der praktischen Anwendung. Anders als beim reinen Selbstgespräch ist für die wissenschaftlich-technische Praxis typisch, dass sie zu Überraschungen führt, wie sie nur die Wirklichkeit zu bereiten vermag: Eine Vorhersage erweist sich unerwartet als falsch; eine Folgerung passt überraschenderweise zu den Folgerungen aus einer ganz anderen Theorie; eine Aussage der Theorie bestätigt sich, als kaum noch jemand darauf zu hoffen wagte.

Kolumbus fand, ohne es gleich zu merken, nicht Indien, sondern Amerika. Allmählich wurden die Landkarten differenzierter, denn immer mehr Seefahrer wagten sich aufs offene Meer hinaus. Sie besaßen immer bessere Sextanten zum Messen der geografischen Breite und immer genauere Uhren zur Bestimmung der geografischen Länge – bis der Globus zum beliebten Möbelstück in Studierzimmern wurde. Lange Zeit konnten sich Menschen nur auf der flachen Erde bewegen, doch durch Reisen und Instrumente kannten sie den Globus längst, bevor der Blick aus Raumstationen auf ihn fiel. Aber erst seit Astronauten mit eigenen Augen auf die Erde hinunterblicken, bestätigt der Augenschein, dass unser Planet wirklich genauso aussieht wie auf den im Lauf der Jahrhunderte immer wirklichkeitsnäheren Karten der Meere und Kontinente.

Wenn die Anschauung scheitert

Eine derart eingängige Versöhnung von Theorie und Anschauung wie von der Geografie durch die Raumfahrt können wir uns von der Quantenphysik freilich nicht erhoffen. Ihre Theorie ist mathematisch konsistent, ihre Vorhersagen haben sich in überwältigender Weise empirisch bestätigt – aber unsere an Alltagsobjekten geschulte Anschauung scheitert an der einfachen Deutung: Niemand weiß, was die Quantenmechanik »wirklich« bedeutet. Die Realität der Quantenwelt bleibt umstritten, seit Theoretiker Quantenphänomene zu beschreiben begannen.

Maßgebliche Gründerväter der Theorie – insbesondere Niels Bohr (1885–1962) und Werner Heisenberg (1901–1976) – standen noch unter dem Einfluss des machtschen Sensualismus. Sie plädierten dafür, nur den im Experiment gewonnenen Beobachtungsdaten Realität zuzubilligen; jede Frage nach einer hinter den Daten stehenden Wirklichkeit sei sinnlos. Das

ging Einstein zu weit. Er fragte Bohr, ob der Mond denn nur existiere, wenn ihn jemand betrachte. Die berühmte Bohr-Einstein-Debatte im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts drehte sich letztlich um die Frage nach der Wirklichkeit der Quanten. Einstein beharrte auf einer vom Beobachter unabhängigen Realität der Mikrowelt, während Bohr und Heisenberg dies leugneten. In dieser Debatte zog Einstein den Kürzeren, denn Bohr konnte alle Gedankenexperimente widerlegen, mit denen Einstein zeigen wollte, dass die Quantentheorie unvollständig sei und es »dahinter« noch etwas geben müsse. Heute ist unstrittig: Die Theorie braucht nicht um so genannte verborgene Variable erweitert zu werden.

Genauer gesagt zeigte sich, dass die Quantenphysik nicht mit dem von Einstein für selbstverständlich gehaltenen »lokalen Realismus« vereinbar ist. Zwei so genannte verschränkte Teilchen bilden selbst über beliebige Entfernungen hinweg ein gemeinsames Quantensystem, das heißt sie haben keine separaten Zustände; die Messung des einen Partners bestimmt augenblicklich den Messwert des anderen. Wenn wir wie Einstein der Wirklichkeit vorschreiben, sie habe »lokal« zu sein – was sich hier und jetzt abspielt, beeinflusst nicht augenblicklich Vorgänge anderswo –, dann stellt das die Realität der Quanten in Frage.

Sind die Quanten also nur denkökonomische Beschreibungshilfen ohne Wirklichkeitsbezug? Diese Konsequenz popularisierten in den 1930er Jahren insbesondere die britischen Astrophysiker Arthur Eddington (1882–1944) und



Der Astrophysiker Arthur Eddington (1882–1944).

GEORGE GRANTHAM BAIN COLLECTION, LIBRARY OF CONGRESS PRINTS AND PHOTOGRAPHS DIVISION WASHINGTON D.C. / PUBLIC DOMAIN

James Jeans (1877–1946). In seinerzeit einflussreichen Büchern meinten beide, Quanten seien mathematische Ideen des menschlichen Geistes, die dieser auf die Welt projiziere und darum für Eigenschaften der Natur halte. Das wäre etwa so, als würde man aus dem Fenster eines erleuchteten Zugabteils in die Nacht hinausschauen und draußen nur das eigene Spiegelbild erkennen. Tatsächlich spekulierte Eddington, man werde eines Tages wichtige Naturgrößen a priori aus mathematischen Überlegungen herleiten, und Jeans stellte sich Gott als Mathematiker vor, der unsere Welt träumt.

Seither müssen die Quanten für viele Spekulationen herhalten, die mit Physik gar nichts zu tun haben. Die heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation und der Indeterminismus garantieren angeblich die Willensfreiheit. Die Nichtlokalität der Quantenphysik soll belegen, dass alles irgendwie ein und dasselbe sind und darum beide unter dem Oberbegriff Information zusammenfallen. Selbsternannte Quantenheiler therapieren mit beschwörenden Reden über spukhaft verschränkte Teilchen seelische Verkrampfungen, und postmoderne Konstruktivisten sehen in der Quantenmechanik ihre Überzeugung bestätigt, die vermeintliche Wirklichkeit sei nichts weiter als ein Produkt menschlicher Ideen.

Unterdessen hat sich die Quantenphysik enorm weiterentwickelt. Die ursprüngliche, von Bohr und Heisenberg begründete Kopenhagener Deutung würden die meisten Physiker – so man sie denn zum Philosophieren zwingt – auch heute bevorzugen. Allerdings wird längst nicht mehr dieselbe Physik betrieben wie seinerzeit. Die Kopenhagener Deutung ist eine Zwei-Welten-Theorie: Der Beobachter richtet sein makroskopisches Messinstrument auf ein mikroskopisches Quantenobjekt. Bohr zufolge sind Beobachter und Messgerät physikalisch betrachtet klassische, das heißt nicht quantenmechanische Objekte. Somit stoßen beim Messvorgang zwei disparate Welten aufeinander, eine klassische und eine gequantelte. Bei dieser Begegnung verwandelt sich die Vieldeutigkeit der Quantenmechanik, die mathematisch in der Wellenfunktion zum Ausdruck kommt, in ein eindeutiges, allerdings nur statistisch vorhersagbares Messresultat. Das ist der so genannte Kollaps der Wellenfunktion – ein physikalisch nicht erklärter Vorgang, in dem sich alle Deutungsprobleme der Quantentheorie zusammenballen.



Zwei Welten – oder viele

Heute passt die physikalische Praxis immer schlechter zur bohrschen Zwei-Welten-Theorie – allein schon deswegen, weil die Grenze zwischen Mikro- und Makrophysik durch die Fortschritte der Experimentiertechnik immer diffuser wird: Typische Quanteneffekte werden mit immer größeren, aus tausenden Atomen bestehenden Objekten demonstriert, und umgekehrt nähern sich immer feinere Messfühler der Größenordnung des beobachteten Quantenobjekts an. Deshalb hat in den letzten Jahren die so genannte Dekohärenztheorie an Boden gewonnen. Sie wurde bereits 1970 von dem Theoretiker H. Dieter Zeh vorgeschlagen und beschreibt alle Beteiligten – Beobachter, Messapparat, Messobjekt und Umwelt – als Quantenobjekte. Das hebt zwar die künstliche Trennung in zwei Welten auf, schafft aber dafür das Problem, wie man das vertraute Verhalten klassischer Alltagsobjekte durch die exotischen, unanschaulichen Vorgänge der Quantenwelt erklären soll.

In ihr regiert die Wellenfunktion, der zufolge stets Superpositionen (Überlagerungen) mehrerer Zustände existieren. Zustände separater Teilchen können verschränkt, das heißt zu einem gemeinsamen Quantenobjekt gekoppelt sein, Teilchen können sich an zwei Orten gleichzeitig aufhalten, eine mikroskopische Blattfeder kann zugleich zwei gegenläufige Schwingungen ausführen und so fort. Nach der Dekohärenztheorie lassen sich solche »kohärenten« Quantenphänomene im Alltag deshalb nicht beobachten, weil die Wellenfunktionen von Beobachter, Umwelt und Quantenobjekt quantenmechanisch verschränkt sind und, wie sich rechnerisch zeigen lässt, gerade dadurch in praktisch klassisch-eindeutige Zustände separiert werden. Das heißt, ein reines Quantenphänomen – die Dekohärenz – erklärt das klassische Verhalten der Makrowelt. Insbesondere wird der Messvorgang nicht mehr durch den ominösen Kopenhagener Kollaps der Wellenfunktion beschrieben.

Damit verliert der Beobachter seine herausgehobene Bedeutung. Beim Messvorgang handelt es sich um eine Wech-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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



www.spektrum.de/t/quantenphysik



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

selwirkung zwischen Apparat, Messobjekt und Umwelt, die wie jeder Naturvorgang den Quantenregeln gehorcht. Das beruhigt nebenbei die Kosmologen, die – anders als zu Bohrs Zeiten – heutzutage Urknall, kosmische Hintergrundstrahlung, Supernovae und Schwarze Löcher als typische Quantenphänomene untersuchen. Sie müssten sonst über Einsteins alte Frage grübeln, ob für Quantentheoretiker der Mond existiert, wenn niemand ihn beobachtet. In den 13,8 Milliarden Jahren seit dem Urknall musste das Universum gewiss die allermeiste Zeit ohne auch nur einen einzigen Beobachter auskommen.

Die Dekohärenz behebt zwar das Kollapsproblem, produziert aber dafür ein anderes. Wenn man der Wellenfunktion unabhängig vom Beobachter Realität zugesteht, erhebt sich die Frage: Was wird aus den vielen möglichen Messresultaten, die wir nicht beobachten? Da sie nicht mehr durch den unerklärten Kollaps weggezaubert werden, bestehen sie irgendwie weiter. Eine logisch einfache, aber für den Normalverstand extrem unverdauliche Antwort gibt die so genannte Vielwelteninterpretation nach dem amerikanischen Theoretiker Hugh Everett (1930 – 1982): Der Messvorgang spaltet die Quantenwelt quasi in getrennte Zweige auf; alle möglichen Messresultate existieren in parallelen Teilwelten, in denen das Messgerät jeweils einen von ihnen anzeigt. Die einem Beobachter zugängliche Wirklichkeit ist nach wie vor einfach, denn die anderen Realitäts- oder Möglichkeitszweige sind durch Dekohärenz prinzipiell unzugänglich. Wanderungen zwischen Parallelwelten, wie sie in der Sciencefiction beliebt wurden, sind ausgeschlossen.

Wird sich unser Verstand je an solche oder andere ähnlich bizarre Ideen gewöhnen? Die Quantenphysik zwingt uns jedenfalls, den Realitätsbegriff drastisch zu erweitern. Die Wirklichkeit ist offenbar keine simple Addition lokaler eindeutiger Zustände. Gegenwärtig favorisieren Wissenschaftstheoretiker den so genannten Strukturalismus, der die Natur nicht mehr als klassische Ansammlung von Teilchen und zwischen ihnen herrschenden Kräften betrachtet, sondern als eine letztlich nur mathematisch fassbare Struktur, die durch komplexe Symmetrien definiert ist (siehe »Was ist real?« von Meinard Kuhlmann, Spektrum der Wissenschaft 7/2014, S. 46–53).

Besteht die Realität aus mathematischen Strukturen?

Doch soll das wiederum heißen, die Realität sei im Grunde nichts als pure Mathematik? Diese Konsequenz zieht Max Tegmark, ein besonders eloquenter Vertreter der Vielweltheorie, in seinem neuen Buch. Ironischerweise landet damit eine von Zeh betont realistisch gemeinte Interpretation der Quantentheorie, die sich trotz der beobachterzentrierten Kopenhagener Deutung absetzt, fast genau im Fahrwasser der idealistischen Spekulationen von Eddington und Jeans, die sich eine nur aus dem menschlichen Geist entspringende Physik und einen mathematisch träumenden Gott ausdachten.

Der springende Punkt ist der Konditionalsatz »Wenn man der Wellenfunktion unabhängig vom Beobachter Realität zugesteht...« Vorsicht! Die Wellenfunktion ist ein mathematisches Gebilde zur Beschreibung der Quantenwirklichkeit, aber nicht die Realität selbst! Wenn man wie Zeh den Realitätsbezug des Quantenformalismus betont, heißt das nicht, dass man wie Tegmark den Formalismus mit der Wirklichkeit gleichsetzen darf. Die physikalische Realität ist, wie sie ist, und verhält sich, wie sie will – und wir lernen mühsam, unsere mathematischen Werkzeuge an ihr ungebärdiges Verhalten anzupassen. Umgekehrt lernen wir mit jeder Vervollkommnung des mathematischen und technischen Werkzeugs neue Aspekte der Wirklichkeit kennen.

Die Quantentheorie von Bohr, Heisenberg und Schrödinger, um deren Deutung Experten immer noch streiten, wurde seinerzeit bald überholt von der Quantenfeldtheorie, welche die Quantenmechanik mit der speziellen Relativitätstheorie vereinigte und die Basis der heutigen Teilchenforschung bildet. Aber auch das ist noch nicht der physikalischen Weisheit letzter Schluss, denn niemand weiß heute, wie eine Theorie von Allem, die Gravitation und Quanten konsistent vereinigt, aussehen wird – falls sie je zu Stande kommt.

Wir wissen nur: Von der Naturforschung sind auch künftig Überraschungen zu erwarten. Daher sollten wir uns kein vorgefertigtes Bild von ihrem Gegenstand machen. Vor allem sollten wir unser Bild nicht mit der Wirklichkeit verwechseln. Die Natur war da, bevor unser Geist sich anschickte, sie zu verstehen. ~

DER AUTOR



Michael Springer ist promovierter Physiker, Schriftsteller und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

- Esfeld, M. (Hg.):** Philosophie der Physik. Suhrkamp, Berlin 2012
Scheibe, E.: Die Philosophie der Physiker. Beck, München 2006
Stebbing, L. S.: Philosophy and the Physicists. Penguin Books, London 1944
Tegmark, M.: Unser mathematisches Universum: Auf der Suche nach dem Wesen der Wirklichkeit. Ullstein, Berlin 2015
Zeh, H. D.: Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn? Springer, Berlin 2011

LITERATURTIPPS

- Friebe, C. et al.:** Philosophie der Quantenphysik. Springer, Berlin 2015
Schwere Kost, die zeigt, wie zahlreich die offenen Fragen sind
Tegmark, M.: Paralleluniversen. In: Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34–45
Ein kühnes Plädoyer für viele, viele Welten

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382045

Streit ums simulierte Gehirn

2013 startete ein europäisches Großprojekt, um das menschliche Gehirn im Computer nachzubilden. Doch schon bald gerieten die verantwortlichen Projektleiter in die Kritik. Wie lässt sich verhindern, dass milliardenschwere Forschungsaufträge aus dem Ruder laufen?

Von Stefan Theil

Jahrzehntelang träumte Henry Markram davon, das menschliche Gehirn nachzubauen. Als Postdoc am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg zapfte er als erster Wissenschaftler die elektrischen Ströme in den Membranen zweier miteinander verknüpfter Nervenzellen mit mikroskopisch kleinen Pipetten an. So konnte er aufzeigen, wie die Reizübertragung zwischen den Synapsen verstärkt und abgeschwächt wird – es wurde möglich, Lernprozesse zu untersuchen und zu modellieren. Als er sich 1998 habilitierte, war er einer der angesehensten Wissenschaftler auf seinem Gebiet.

Doch dann frustrierte ihn das Ausbleiben entscheidender Fortschritte in seiner Disziplin allmählich. Obwohl Forscher weltweit jährlich zehntausende neurowissenschaftliche Studien veröffentlichten, schien weder das Verständnis der grundlegenden Gehirnfunktionen zuzunehmen noch unsere Fähigkeit, Krankheiten dieses Organs zu behandeln. Markram war auch persönlich betroffen: Bei seinem Sohn wurde

in den 1990er Jahren Autismus diagnostiziert. Gegenüber der britischen Tageszeitung »The Guardian« äußerte er 2013, er hätte gern die Fähigkeit, in eine Nachbildung des Gehirns seines Sohns zu steigen, »um die Welt so zu sehen wie er«. Die einzige Möglichkeit hierfür sah er darin, statt einzelner Experimente zu Verhalten, Krankheiten und Anatomie ein Modell zu erstellen, das die Verschaltung des gesamten menschlichen Gehirns widerspiegelt.

In einem Vortrag während einer TED-Konferenz in Oxford präsentierte er 2009 erstmals der breiten Öffentlichkeit seine Vision, 86 Milliarden Neurone und 100 Billionen Synapsen mit einem Supercomputer mathematisch zu erfassen. Markram versprach den Zuhörern: »Wir können das innerhalb von zehn Jahren schaffen.« Er suggerierte, dass solch eine Simulation sogar Bewusstseinszustände abbilden könnte. In zahlreichen weiteren Gesprächsrunden, Interviews und Fachartikeln deutete er an, dass ein Modell des Gehirns fundamentale und bahnbrechende Erkenntnisse für die Wirkstoffforschung liefern würde, ein besseres Verständnis von Erkrankungen wie Alzheimer brächte sowie bestimmte Tierversuche ersetzen könnte. Und damit nicht genug: Das künstliche Gehirn käme auch der Computertechnologie zugute. Neue und schnellere Rechner ließen sich konstruieren, Roboter erhielten kognitive Fähigkeiten und möglicherweise Intelligenz (Henry Markram berichtete in SdW 9/2012 ab S. 82 im Artikel »Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn« über seine Pläne). Viele Neurowissenschaftler waren skeptisch, aber Markram warb erfolgreich um Unterstützer. Sein Traum schien sich im Januar 2013 zu erfüllen, als ihm die Europäische Union für sein Projekt zur Simulation eines menschlichen Gehirns, das Human Brain Project (HBP), über einen Zeitraum von zehn Jahren Fördermittel in Höhe von mehr als einer Milliarde Euro zusagte.

Nur wenige Jahre später ist dieses Großprojekt in Misskredit geraten. In Fachzeitschriften wurde von »Hirnge-

AUF EINEN BLICK

AN DIE WAND GEFAHREN

1 2013 sprach die Europäische Kommission einem Team um den Neurowissenschaftler **Henry Markram** mehr als eine Milliarde Euro zu, damit dieser seine Vision eines **digital nachgebauten Gehirns** verwirklichen kann.

2 Markrams Initiative ist inzwischen in Misskredit geraten. Kritiker prangern **Fehlorganisation** und unverhältnismäßig hochgesteckte Ziele an. Dazu trugen auch die **Geldgeber** in Brüssel bei, die **politische Interessen** mit der Wissenschaft vermischten und mangelhafte Aufsicht ausübten.

3 Das europäische Projekt wird nun neu organisiert, um begangene Fehler auszubessern und weitere in Zukunft zu vermeiden. Als **Vorbild** könnte dabei ein ähnliches Vorhaben der USA dienen.



Ein Gehirn zu simulieren,
ist ein enorm ambitioniertes Unterfangen – Aufsichtsgremien sollten es umso kritischer begleiten.



spinsten« gesprochen. Mehrere Wissenschaftler, die Markram persönlich kennen, beschreiben ihn inzwischen als gescheitertes Genie. Das Exekutivkomitee aus ihm und zwei weiteren Personen wurde innerhalb des Projekts entmachtet. Sein Management hat ihm untersagt, mit der Presse zu sprechen. Laut Aussagen des neuen Direktors, Christoph Ebell, nahm Markram an internen HBP-Konferenzen nicht mehr teil und schickte einen Vertreter. Wie konnte es so weit kommen?

Kritik aus dem Kollegenkreis

Das Human Brain Project sollte europaweite Zusammenarbeit fördern, doch stattdessen sorgte es für eine tiefe öffentliche Spaltung der Neurowissenschaftler. Im Juli 2014 schrieben 156 Forscher einen offenen Brief, dessen Inhalt nachträglich mehrere hundert weitere Kollegen unterstützten. Sie kritisierten im Schreiben die Arbeit und Organisation des HBP und drohten damit, das Vorhaben zu boykottieren, sollte sich nichts ändern. Markram initiierte ein Schlichtungsverfahren, um auf die Forderungen einzugehen. Ein Komitee aus 27 Wissenschaftlern überprüfte die Argumente beider Seiten und stimmte mit Ausnahme von zwei Beteiligten nahezu vollumfänglich mit den Kritikern überein. In ihrem 53-seitigen Bericht vom März 2015 forderten die Vermittler eine grundlegende Neuausrichtung des HBP, unter anderem des Managements und des wissenschaftlichen Schwerpunkts.

Bei der Suche nach den Gründen für die massiven Startschwierigkeiten dieses Prestigeprojekts konzentrierten sich viele hauptsächlich auf Markram und seinen Führungsstil. Aber das ist nur ein Teil der Geschichte. Zumindest bemüht sich Markram allem Anschein nach aufrichtig um gute wissenschaftliche Arbeit. Und so viel Fehlleistungen es auch in der Schweizer Zentrale des HBP gegeben hat – die eigentliche Quelle des Problems befindet sich wohl rund 500 Kilometer weiter nördlich in Brüssel, am Sitz der Europäischen Kommission. Das Exekutivorgan der Europäischen Union verknüpft in einem wenig transparenten System der Großforschungsförderung die wissenschaftlichen Ziele mit politischen Interessen. Zusammen mit fehlender Kontrolle führte das letztlich zu dem Schlamassel, in dem das HBP nun steckt. »Das echte Problem ist der Entscheidungsprozess der EU«, sagt auch Andreas Herz, Professor für Computational Neuroscience an der Ludwig-Maximilians-Universität München und Mitglied des Vermittlungsausschusses.

Seit nach Ende des Zweiten Weltkriegs und dem Manhattanprojekt der Trend zu Großforschung aufkam, haben Wissenschaftler und Politikexperten immer wieder ihren Wert diskutiert. Bereits 1961 sinnierte Alvin M. Weinberg, Direktor des Oak Ridge National Laboratory in Tennessee, in einem Artikel im Fachmagazin »Science« darüber, ob etwa riesige Teilchenbeschleuniger oder bemannte Raumfahrtinitiativen die »Wissenschaft ruinieren«. Er argumentierte, Großfor-

schungsprojekte wären verantwortlich für einen »journalistischen Beigeschmack« der Forschung, der grundsätzlich ihren wissenschaftlichen Gehalt gefährden könnte – eine Situation, in der »eher das Spektakuläre als das Tiefgründige zum Standard« würde. Weiterhin befürchtete er, dass sich die Beteiligten durch die riesigen zur Verfügung stehenden Geldsummen mehr damit beschäftigen müssten, die Förderung auszugeben, als mit der Forschung an sich.

Diese Bedenken sind mehr als ein halbes Jahrhundert später immer noch aktuell. Das HBP hat sie wieder in den Fokus gerückt. Heutzutage beruhen Großprojekte auf einer umfangreichen, oft stark interdisziplinären Kooperation von Grundlagenforschung und industrieller Entwicklung. Die Regierungen fördern sie in dem Bestreben, Innovationen anzuschließen. Die Neurowissenschaften sind hier nur der jüngste Forschungsweig, dem milliardenschwere Budgets zugeordnet werden, wie sie zuvor nur in der Verteidigungs- sowie der Luft- und Raumfahrttechnik üblich waren.

Es gibt aber auch wichtige Gründe für Großvorhaben. Viele Forschungsbereiche sind inzwischen so komplex und kostenintensiv, dass eine umfangreiche Zusammenarbeit die besten Erfolgsaussichten bietet, um vorwärtszukommen. Großforschung war lange eine Domäne der Physik, wo das Herantasten an immer energiereichere Naturphänomene gewaltige Teilchenbeschleuniger erforderte, wie zuletzt den Large Hadron Collider am CERN bei Genf. In der Biologie hatte die Großforschung ihr Debut im Jahr 1990 mit dem Humangenomprojekt, bei dem verschiedene Institutionen mehr als zehn Jahre lang mit damals rund drei Milliarden US-Dollar die Sequenzierung des menschlichen Erbguts vorantrieben. Anfang der 2010er Jahre schien dann die Neurowissenschaft reif für einen gewaltigen Schritt nach vorn (siehe »Ein neues Kapitel der Hirnforschung«, SdW 3/2015, S. 22). Nahezu zeitgleich mit dem europäischen Human Brain Project gaben die USA ihre letztendlich vermutlich mehrere Milliarden Dollar teure BRAIN-Initiative bekannt. Israel, Kanada, Australien, Neuseeland, Japan und China kündigten ebenfalls größere neue Hirnforschungsinitiativen an. Tom Insel, Direktor des National Institute of Mental Health – eine der Behörden, welche die BRAIN-Initiative organisieren – meint, dass sich politische Entscheidungsträger und Wissenschaftler für einen möglichen großen Wurf in diesem Feld begeistern ließen, weil sie sich vor der Ausbreitung und den Kosten psychischer Erkrankungen sorgen, sowie aus Enthusiasmus für neue Hirnmanipulationstechniken wie die Optogenetik. »Eine ganze Generation brennt nun darauf, diese Art der Forschung zu betreiben – nicht nur in den USA, sondern weltweit«, so Insel.

Wie leicht ein solches Projekt aus der Bahn geraten kann, veranschaulicht die Situation des HBP. Es zeigt die Grenzen dafür auf, Geld für komplexe Fragestellungen effizient auszugeben. Kostenintensive Vorhaben können bei klar definierten technologischen Zielen wie dem Bau von Raketen oder der Entschlüsselung des Genoms durchaus erfolgreich von kleinen Gruppen durchgeführt und verwaltet werden. Doch sind

solche Strukturen auch die beste Option, etwas so Grundlegendes wie ein neues Verständnis des menschlichen Gehirns zu entwickeln?

Unter den Neurowissenschaftlern seiner Generation hob sich der 1962 geborene Markram durch seine Leistungen als experimenteller Wissenschaftler ebenso wie durch seinen Ehrgeiz von der Masse ab. 2005 startete er an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne das Blue Brain Project, zu dem IBM einen Supercomputer beisteuerte. Das Projekt sollte eine Art Blaupause des Gehirns erstellen, genau genommen: eines kleinen Bereichs im Rattenhirn. Markram konzentrierte sich hier auf eine Ansammlung von Neuronen in der Hirnrinde, die als »kortikale Säule« bezeichnet wird. Das Projekt sollte Erkenntnisse darüber liefern, wie sich die zellulären Schaltkreise darin mathematisch modellieren lassen. Kritiker meinen allerdings, dass solch eine Simulation wenig dazu beitragen könnte, die tatsächliche Arbeitsweise des Gehirns besser zu verstehen. Im Oktober 2015 – also zehn Jahre später – hat Markram ein erstes Ergebnis seiner Fleißarbeit veröffentlicht. Sein Team berechnete die Verschaltung von insgesamt 31 000 Neuronen und fast 40 Millionen Kontaktpunkten. Doch er hatte lange zuvor bereits Pläne entworfen, um das aufwändige Unterfangen zu einem ungleich ambitionierteren auszubauen: eine Simulation des gesamten menschlichen Gehirns mit einem Supercomputer.

Ein Mann, eine Vision – und viele Fragezeichen

Neben seinen wissenschaftlichen Qualifikationen verfügt Markram über ein außergewöhnliches Talent, seine Interessen durchzusetzen. Charismatisch und fotogen, gewann er als großer Visionär in den Neurowissenschaften an Ansehen und Gefolgschaft. Seine Kritiker wies er ab; sie seien unwillig, den Paradigmenwechsel zu vollziehen, den das HBP seiner Meinung nach darstellt. Viele seiner Gegner haderten mit der wissenschaftlichen Grundlage des Projekts. Mehrheitlich vertreten die Neurowissenschaftler die Meinung, dass selbst wenn es möglich wäre, das Gehirn so detailgetreu zu konstruieren wie von Markram angestrebt, uns dies nichts über Wahrnehmung, Gedächtnis oder Emotionen erzählen würde – so wie uns das Kopieren einer Computerhardware, Atom für Atom, nur wenig über die darauf laufende Software verrät. Kritiker warfen Markram auch vor, die möglichen Erkenntnisgewinne maßlos zu übertreiben. »Henry war schon immer größenwahnsinnig«, sagt Eilon Vaadia, Direktor des Edmond und Lily Safra Center for Brain Sciences an der Hebräischen Universität von Jerusalem. »Keiner von uns glaubt, dass das, was er versprochen hat, möglich ist.«

Trotz der Skepsis unter den Neurowissenschaftlern gewann Markram die Leute für sich, die für sein Ziel wirklich zählen: die Geldgeber bei der Europäischen Kommission. Dort stand offenbar weniger die wissenschaftliche Machbarkeit des Projekts im Mittelpunkt als der potenzielle wirtschaftliche und politische Gewinn. »Dieses Projekt war gewollt, damit die europäische Industrie wieder wettbewerbs-



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



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

fähig wird«, sagt Christoph Ebell. Getrieben von der Befürchtung, bei Computern, digitalen Dienstleistungen und anderen Technologien weiter hinter die USA zurückzufallen, lobten die Europäer 2009 einen Wettbewerb für »Flaggschiff«-Projekte aus, die mit jeweils mindestens einer Milliarde Euro gefördert werden sollten. Laut einem Dokument der Europäischen Kommission aus jenem Jahr sollten die gleichermaßen industriepolitischen wie wissenschaftlichen Projekte Europa bei zukünftigen und neu entstehenden Technologien »die Führung ermöglichen«. Markrams geplantes Gehirn in einem Supercomputer und seine Verheißungen, was das für die Neurowissenschaften, Medizin, Robotik und Computertechnik bedeuten würde, passten bestens in das Schema. Es entsprach der Denkweise des zuständigen Beamtenapparats, dass technologische Revolutionen mit einem zentral gesteuerten Zehnjahresplan möglich sind. »Henry erzählte ihnen genau das, was sie hören wollten«, sagte Ebell. »Gibt es irgendeinen Politiker, der nicht gern aufstehen und sagen würde: ›Wir Europäer bauen ein Gehirn?‹ Das ist aufregend. Das ist wie ein Flug zum Mond.«

Da das Flaggschiffprogramm als Vorzeigeprojekt außerhalb der üblichen Förderungsverfahren vorgestellt wurde – und auf Grund des großen Budgets, das gerechtfertigt werden musste –, bestand für Politiker, Bürokraten und auch Wissenschaftler ein starker Anreiz, übertriebene Versprechen zu machen. »Da sitzen Sie in einer Konferenz, und jemand sagt Ihnen, dass Sie diesen oder jenen Teil spannender formulieren sollen«, sagt Ebell. »Dann fangen Sie an, mehr zu versprechen, und jeder wiederholt es, sogar die Fachleute. So arbeitet eine klassische Rückkopplungsschleife. Und da so viel Geld im Spiel ist, läuft dieser Feedback-Mechanismus unheimlich effektiv.«

Eine geheim gehaltene Jury aus 25 Experten – mindestens ein Neurowissenschaftler war darunter, aber sonst Spezialisten aus anderen Gebieten – wählten aus den sechs Finalisten das HBP sowie ein weiteres Projekt aus. Sie sollten jeweils etwa eine Milliarde Euro in Teilzahlungen von 100 Millionen Euro erhalten. Im Gegensatz zur gängigen Praxis in den USA gab die Europäische Kommission die Namen der Jurymitglieder nicht bekannt, selbst nachdem die Entscheidung ge-

fällt war. Die Kommission verteidigte dieses Vorgehen als notwendig, um »Auswirkungen auf das Privat- und Berufsleben der beteiligten Experten sowie auf die Qualität und Effizienz der Verfahren« zu verhindern.

Der andere Gewinner der Flaggschiffinitiative ist ein Projekt, bei dem Teams aus 23 Ländern das Nanomaterial Graphen weiterentwickeln wollen. Dabei hofft die Kommission auf Anwendungen in der Elektronik, dem Energiesektor und weiteren Industriezweigen. Auch das Graphenprojekt soll die europäische Wirtschaft in einem Bereich unterstützen, bei dem das Risiko besteht, hinter andere Nationen zurückzufallen. In Südkorea beispielsweise arbeitet der Elektronikhersteller Samsung mit diesem viel versprechenden Material. Aber im Gegensatz zum HBP wurden hier Streitigkeiten vermieden, und europaweit haben sich industrielle Forschungspartner zur Mitarbeit verpflichtet. Ein ganz wesentlicher Unterschied ist, dass dieses Flaggschiffprojekt nicht auf der technologischen Vision einer einzelnen Person beruht, sondern als umfassendes, gemeinschaftliches und dezentrales Projekt angelegt ist. Während beim HBP anfangs nur Markram und wenige andere Personen die Struktur und Finanz-

Auf Grund des großen Budgets bestand ein starker Anreiz, übertriebene Versprechen zu machen

ausstattung des Projekts kontrollierten, liegt die Steuerung beim Graphen in der Hand eines offenen Netzwerks, das nur lose von dem Projektleiter koordiniert wird, der schwedischen Chalmers University of Technology. Noch bedeutsamer ist vielleicht, dass das Graphenprojekt eine ausschließlich technische Aufgabe hat – nämlich Strategien zu identifizieren, mit der ein bekanntes Material industriereif gemacht werden kann. Im Unterschied zur Modellierung des Gehirns erfordert dieser Ansatz nicht, zunächst einmal riesige Lücken im wissenschaftlichen Grundlagenwissen zu überbrücken.

Geldspritze ohne Nachsorge

Aus unerfindlichen Gründen versäumte es die Europäische Kommission beim Start des HBP 2013, auf den üblichen wechselseitigen Kontrollmechanismen im Management zu beharren. Laut dem Bericht des Vermittlungsausschusses gab es immense Interessenkonflikte in der Projektleitung. Nicht nur, dass ausschließlich Markram und zwei weitere Wissenschaftler den Verwaltungsrat und damit die Verteilung der Fördermittel unter den 112 beteiligten Institutionen kontrollierten; sie waren auch Nutznießer ihrer eigenen Finanzierungsentscheidungen. Außerdem sei Markram Mitglied in allen Beratungsgremien und berichte gleichzeitig an sie. Peter Dayan, Direktor der Computational Neuroscience am University College London und Mitglied des Vermittlungsausschusses, kommentiert, das werfe »ein erschreckendes Licht auf die Entscheidungsprozesse in der EU«. Dayan betont, dass er sich an kein Projekt vergleichbaren Umfangs erinnern könne, das ähnlich katastrophal verlaufen wäre. »Dabei ist es doch nicht übermäßig kompliziert,

selbst umfangreiche Wissenschaftsprojekte erfolgreich zu leiten.«

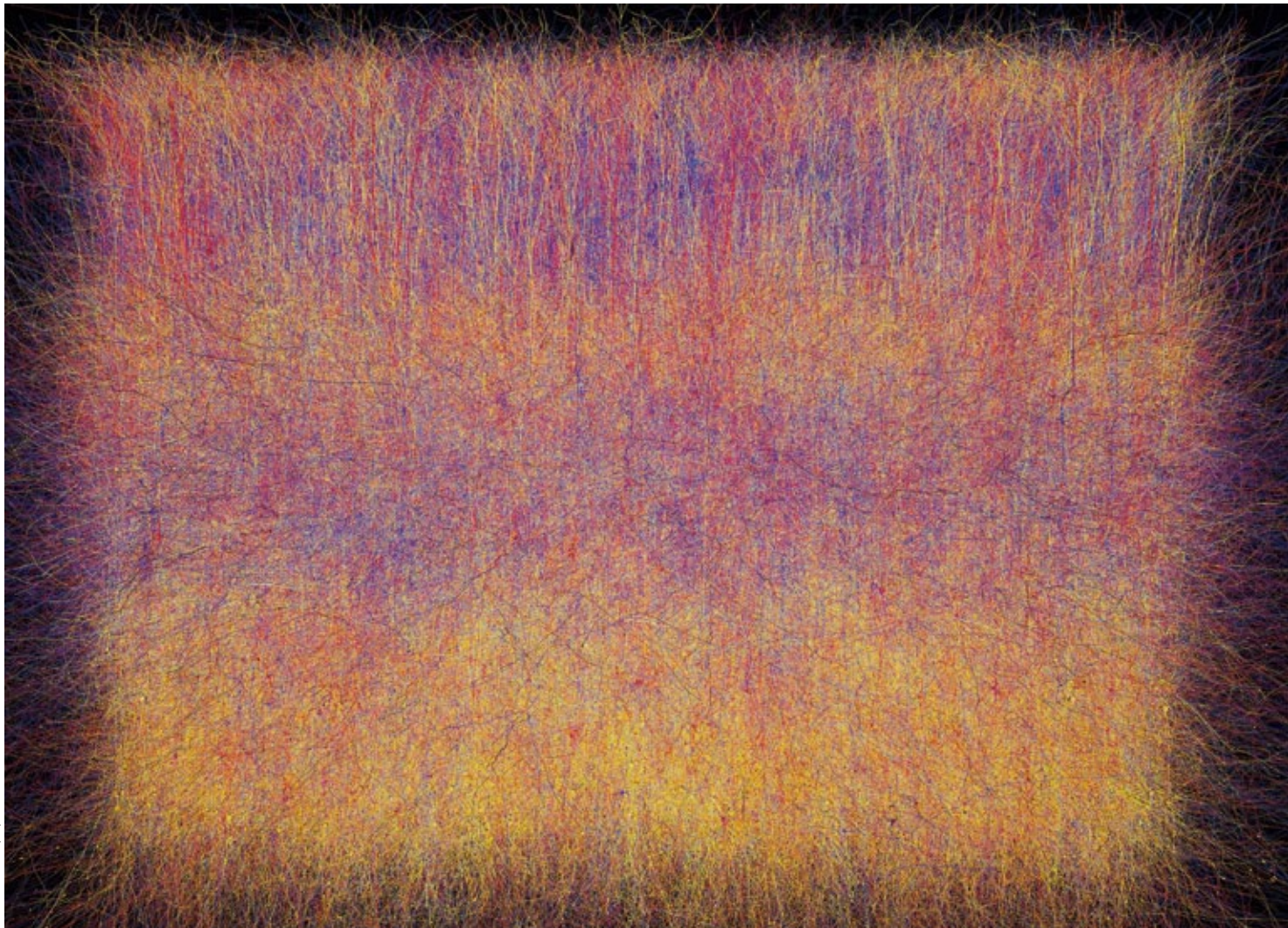
Erst nach dem offenen Brief der Neurowissenschaftler begann die Europäische Kommission damit, die Führungsprobleme beim HBP zu untersuchen. Nur Tage bevor der Vermittlungsausschuss seinen ausführlichen kritischen Bericht veröffentlichte, legte die Europäische Kommission ihren eigenen vor – erstellt von einem geheimen Gremium, das nur der Kommission und dem HBP bekannt ist. In diesem werden zwar weniger explizit die Strukturprobleme angesprochen, aber dennoch Änderungen beim HBP angeordnet. Die Kommission äußerte auch, dass sie das Vermittlungsverfahren begrüße. Hätte sie allerdings den Vorgang von Anfang an effizient beaufsichtigt, wäre das HBP viel-

leicht nie auf Grund gelaufen. Es ist nicht klar, ob ohne die Revolte der Neurowissenschaftler die nun angestoßenen Änderungen auf organisatorischer Ebene überhaupt stattfinden würden.

Der BRAIN-Initiative der USA ist es besser ergangen als dem HBP. Im April 2013 kündigte Präsident Barack Obama sie als das »nächste große amerikanische Projekt« an. Anfangs traf es eine vergleichbare Woge von Skepsis. Genau wie in Europa befürchteten viele Neurowissenschaftler, das Projekt sei schlecht konzipiert und würde Fördergelder von anderen Themen ihres Felds abzweigen – und das alles nur, um nebulöse, möglicherweise unerreichbare Ziele zu verfolgen.

Das verantwortliche National Institute of Mental Health (NIMH) reagierte auf die Kritik, stoppte die Initiative vo-

Im Oktober 2015 stellte Markkrams Arbeitsgruppe das erste größere Ergebnis des 2005 gestarteten Blue Brain Project vor: eine Simulation der Aktivität eines winzigen Stücks der Hirnrinde einer Ratte aus insgesamt 31000 Neuronen. Die Teams des multinationalen Nachfolgeprogramms Human Brain Project arbeiten bereits daran, das menschliche Gehirn mit millionenfach mehr Nervenzellen in Supercomputern zu modellieren. Kritiker halten dieses Vorhaben jedoch für teure Fleißarbeit, die unverhältnismäßig wenige Erkenntnisse liefern dürfte.



rübergehend und zog Neurowissenschaftler hinzu, statt mit Diskussionsrunden hinter verschlossenen Türen und vertraulichen Bewertungen fortzufahren. Die Behörde berief ein Gremium aus 15 führenden Gehirnxperten zusammen und ließ die Wissenschaftler in einer Reihe transparenter Workshops das Projekt definieren. Nach einem Jahr solcher Beratungen ging daraus ein ambitioniertes, interdisziplinäres Programm zur Entwicklung neuer Arbeitstechniken hervor, die den Forschern ermöglichen sollen, Gehirnaktivitäten besser zu beobachten und zu stimulieren. Es bringt Neurowissenschaftler mit Nanotechnologiespezialisten und Werkstoffingenieuren zusammen. Sie lösen konkrete Fragestellungen, beispielsweise, wie bei einer sehr kleinen Gruppe von Neuronen ein elektrischer Reiz ausgelöst werden kann, um Hirnerkrankungen deutlich präziser als bisher behandeln zu können.

Offener Wettbewerb statt politischer Blackbox

Der Hauptunterschied zwischen dem europäischen HBP und der US-amerikanischen BRAIN-Initiative besteht darin, dass Letztere nicht auf der Vision eines einzelnen Wissenschaftlers beruht. Viele Teams konkurrieren um die Fördermittel und entwickeln ihre Bereiche in unterschiedliche und auch ungeplante Richtungen. Der Wettbewerb findet über das beim NIMH übliche Gutachterverfahren statt, das Interessenkonflikte wie beim HBP verhindert. Sicher sind auch Begutachtungen nicht perfekt – sie begünstigen oft bekannte Paradigmen –, und die amerikanische Wissenschaftsförderung hat selbst zahlreiche Probleme. Aber die BRAIN-Initiative ist insgesamt weitaus mehr auf Wettbewerb ausgerichtet und die Entscheidungsfindung ist deutlich transparenter als bei der politischen Blackbox in Brüssel, die das HBP auf den Weg gebracht hat.

Für die BRAIN-Initiative sind die Erfolgchancen daher recht hoch, da sie trotz ihrer pompösen Verpackung als Großprojekt eher ein Strauß verteilter Innovationsansätze unter einem zentralen Förderschirm ist; mit Regeln, welche die Zusammenarbeit fördern. Die Bezeichnung der Initiative als Megavorhaben ist vielleicht eher als clevere öffentlichkeitswirksame Maßnahme zu verstehen, um Förderzusagen und weitere Unterstützung einzuwerben. »Wenn ich mit Mitgliedern des Kongresses spreche, möchten sie immer wissen, welche neue Idee dahintersteckt«, berichtet Insel. »Sie wollen nicht noch mehr Geld in die gleiche Sache stecken.« Auch Journalisten stürzen sich eher auf neue große Ideen. Ein wissenschaftliches Mammutunternehmen – oder etwas, was als solches verpackt ist – lässt sich Politikern, ihren Wählern und Journalisten einfach besser vermitteln. »Es entspricht dem aktuellen Zeitgeist, Großprojekte für effizienter zu halten«, meint Zachary Mainen, Leiter des in Lissabon ansässigen Champalimaud Neuroscience Programme und Mitorganisa-

Die neuen Rechenwerkzeuge und Modelle könnten der neurobiologischen Forschung insgesamt nutzen

tor des offenen Briefs gegen das HBP. »Aber das ist kein Argument dafür, Wettbewerb zu unterbinden.«

Seit es die im Vermittlungsbericht geäußerten Kritikpunkte entgegennehmen musste, unterzieht sich das HBP einer tief greifenden Veränderung. Das könnte es trotz allem noch in ein erfolgreiches Vorhaben verwandeln. Ebell betont, dass eine neue Managementstruktur aufgebaut wird, die sich nicht länger so stark auf Markram und seine engsten Mitarbeiter konzentriert. Neue Organe für eine unabhängige Aufsicht entstehen. Ein Teilprojekt der kognitiven Neurowissenschaften ist inzwischen wieder eingesetzt – dessen Streichung aus dem Kernprogramm war 2014 ein wichtiger Anstoß für die Angriffe gegen das HBP. Auch ein offeneres, auf mehr Wettbewerb ausgerichtetes Verfahren soll Kooperationsprojekten einen Zugriff auf HBP-Fördermittel verschaffen. Ab jetzt, so Ebell, muss jede an dem Projekt beteiligte Gruppe alle zwei Jahre neue Zuwendungen beantragen – auch Markrams eigene. Inzwischen unterzeichnete die Europäische Kommission ein Abkommen, das dem HBP eine weitere Finanzierung zumindest bis 2018 zusichert.

Weiterhin wird das Vorhaben seinen Schwerpunkt auf Werkzeuge und Software erweitern, die nicht ausschließlich der Simulation des Gehirns dienen. Obwohl die Mitglieder des Vermittlungsausschusses das HBP kritisiert hatten, weil es unrealistische Erwartungen in Hinblick auf das Verständnis des Gehirns und die Behandlung seiner Krankheiten weckte und sie einen Verlust an wissenschaftlicher Glaubwürdigkeit beklagten, unterstützen nun selbst Skeptiker wie Dayan und Mainen die zusätzlichen Ziele des Projekts. Die dabei entwickelten Rechenwerkzeuge, der verbesserte Umgang mit den Daten und neue mathematische Modelle könnten schließlich der neurobiologischen Forschung insgesamt nutzen.

Durch die Konzentration auf »Big Data« – ein zentraler Bestandteil von Markrams ursprünglicher Vision – könnten sich die europäischen und die US-amerikanischen Projekte letztlich sogar gut ergänzen. Die Technologien werden enorme Mengen an neurobiologischen Daten hervorbringen. Wenn sich das HBP auf seinen Kern zurückbesinnt und nützliche Rechenwerkzeuge und Modelle entwickelt, dann könnte Henry Markram der Neurowissenschaft doch noch ein großes und dauerhaftes Vermächtnis hinterlassen. ∞

DER AUTOR



Stefan Theil ist Journalist in Berlin. Er berichtet bereits seit 20 Jahren als Korrespondent für das amerikanische Magazin »Newsweek« über wirtschaftspolitische Entwicklungen.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1378771

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projekts nicht möglich. Deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!

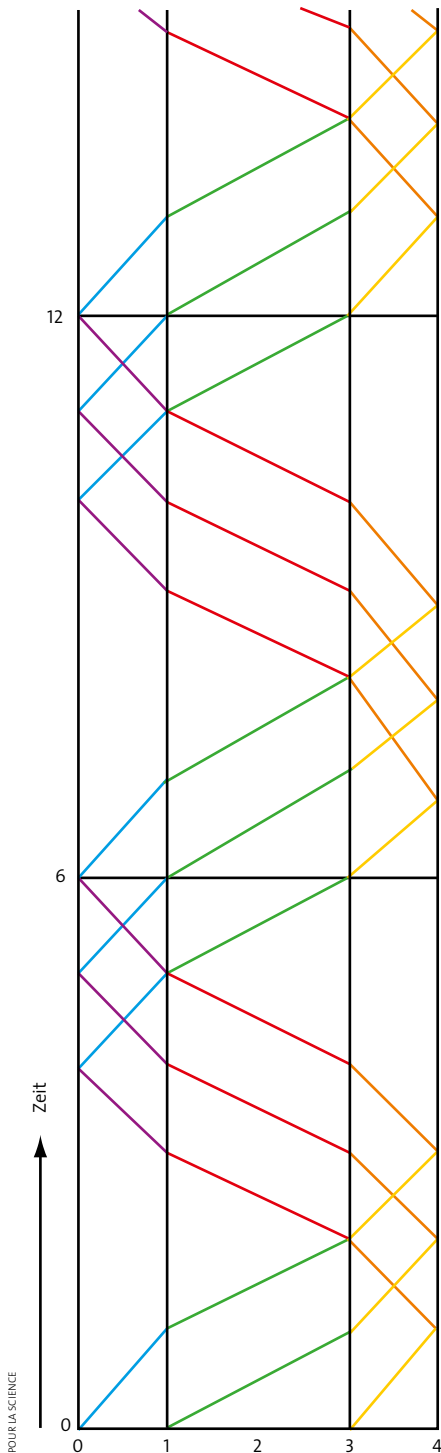


Märkischer Arbeitgeberverband | Großrebnitzer Agrarbetriebesgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymsnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Förderverein des Thomas-Mann-Gymnasiums Stutensee | Förderverein der Leibnizschule Wiesbaden e. V. | KIT Karlsruhe | Volksbank Bigge-Lenne eG | Meissner AG | Förderverein der Justus-Liebig-Schule Darmstadt | Dominique Mayer | Rotary Club Buchloe | Förderverein des Johanneum-Gymnasiums Herborn | Freundeskreis der Konrad-Duden-Realschule Mannheim | Förderverein des Eichsfeld-Gymnasiums Duderstadt | Albertus-Magnus-Gymnasium Stuttgart | Sternwarte am Wallgarten Gifhorn

Undigitale Computer

Was wäre, wenn man einen Analogrechner mit unendlicher Genauigkeit bauen könnte? Er würde bei äußerst einfacher Konstruktion die erstaunlichsten Leistungen erbringen.

VON JEAN-PAUL DELAHAYE



Wenn Informatiker die reale Welt in einem vereinfachten Modell wiedergeben wollen, greifen sie meistens zu einer Diskretisierung, das heißt, sie schauen sich die Sache irgendwie verpixelt an. Ihr Modell der Welt besteht nur aus Punkten, die in einem gewissen Abstand voneinander entfernt (»diskret«) liegen, und die Zeit wird ebenfalls diskretisiert: Nur zu bestimmten Zeitpunkten macht das Modell eine Aussage über den Zustand des Systems. Was – räumlich wie zeitlich – dazwischen passiert, fällt der Vereinfachung zum Opfer.

Diese drastische Vergrößerung der Realität ist durch die Funktionsweise der Computer erzwungen. Denn die können das Systemverhalten in der Regel nur dadurch wenigstens annähernd erfassen, dass sie sich auf endlich viele Stellvertreterpunkte und -zeiten beschränken.

Mit immer kleiner werdendem Punktabstand – und entsprechend anwachsendem Rechenaufwand – kommt man der Realität immer näher. Es gibt sogar Spekulationen, nach denen unser gewöhnlicher Raum, den wir als kontinuierlich erleben, auf einer extrem kleinen Größenskala, weit unterhalb alles Messbaren, von diskreter Struktur sei und daher einem Computer gleichkomme (der »rechnende Raum«, siehe

Eine Welt aus dem Baukasten von Jérôme Durand-Lose. Ein schwarzes Teilchen ist unbeweglich, verändert aber bei jeder Begegnung mit einem farbigen dessen Identität und damit auch dessen Geschwindigkeit. Die Welt ist periodisch: Nach sechs Zeiteinheiten wiederholt sich das ganze Geschehen.

Spektrum der Wissenschaft Spezial 3/2007 »Ist das Universum ein Computer?«).

Im vorliegenden Artikel möchte ich Ihnen ein Konzept vorstellen, das die Idee vom rechnenden Raum auf den Kopf stellt. Es geht um einen Computer, der die kontinuierliche Struktur von Raum und Zeit gewissermaßen ernst nimmt und darauf aufbaut.

Ein derartiges hypothetisches Gerät hat Jérôme Durand-Lose, Professor an der Universität d’Orléans, in den letzten zehn Jahren ausgearbeitet. Seine Welt besteht nur aus einer Geraden. Auf ihr bewegen sich punktförmige Teilchen und begegnen einander; Durand-Lose nennt sie »Signale« und denkt dabei an so etwas wie Photonen, die ja auch in der realen Welt Informationen übermitteln. Typischerweise steckt die Information eines Photons oder allgemeiner eines Signals in dem Zeitpunkt, in dem es eintrifft.

Wichtig: Die Gerade ist die reelle Zahlengerade der Mathematiker. Insbesondere enthält sie auf jedem beliebig kleinen Teilstück unendlich viele Punkte und bietet sogar irrationalen Zahlen wie π , e und $\sqrt{3}$ Platz. Auch die Zeit ist kontinuierlich und wird mit reellen Zahlen dargestellt, so wie es in der Physik üblich und unvermeidlich ist. Um die Lösungen ihrer Bewegungsgleichungen stets hinschreiben zu können, brauchen die Physiker eben die ganze Reichhaltigkeit der reellen Zahlen – und handeln sich damit unweigerlich ein paar Eigenschaften ein, die so in der Realität nicht zu finden sind. Entsprechend bieten die Modelle von Durand-Lose einige Überraschungen.

Schauen wir uns eine dieser Welten genauer an (Bild links). In ihr können

Teilchen von sieben verschiedenen Arten existieren. Jede Teilchenart hat ihre eigene unveränderliche (reelle) Geschwindigkeit und ist in den Abbildungen durch eine eigene Farbe gekennzeichnet. In unserem Beispiel soll gelten:

- Das Signal Schwarz hat die Geschwindigkeit 0;
- Blau und Gelb haben die Geschwindigkeit 1, sie legen also in einer Zeiteinheit eine Längeneinheit nach rechts zurück;
- Grün hat die Geschwindigkeit 2;
- Rot hat die Geschwindigkeit -2, das heißt, es legt in einer Zeiteinheit zwei Längeneinheiten nach links zurück;
- Orange und Violett haben beide die Geschwindigkeit -1.

Wenn zwei Teilchen zusammentreffen – und auf der Geraden gibt es keine Ausweichmöglichkeit –, geschieht das, was unter Elementarteilchen üblich ist: Sie reagieren miteinander, und zwei neue Teilchen gehen aus der Kollision hervor. Anders als in der Teilchenphysik geht es allerdings nicht darum, die Gesetze dieser Reaktionen ausfindig zu machen; vielmehr hat man die Freiheit, sie zu bestimmen und zu schauen, was passiert.

In unserem Beispiel sollen folgende Reaktionen stattfinden:

- 1) Blau, Schwarz → Schwarz, Grün (das heißt: Aus der Begegnung von Blau und Schwarz gehen Schwarz und Grün hervor)

- 2) Grün, Schwarz → Schwarz, Gelb
- 3) Gelb, Schwarz → Orange, Schwarz
- 4) Schwarz, Orange → Rot, Schwarz
- 5) Schwarz, Rot → Violett, Schwarz
- 6) Schwarz, Violett → Schwarz, Blau

Ist in dieser Liste ein Teilchenpaar links vom Pfeil nicht aufgeführt, wie beispielsweise Gelb, Orange, so durchdringen die Teilchen einander ohne Wechselwirkung, wie zwei Photonen. Treffen mehr als zwei Teilchen an einem Punkt zusammen, so sind die Regeln für alle vorkommenden Teilchenpaare anzuwenden. Geraten zum Beispiel die Signale Orange, Grün und Schwarz am selben Punkt aneinander, so wirken die Regeln 2 und 4, was zusammen die Regel

Grün, Schwarz, Orange
→ Schwarz, Gelb, Rot
ergibt. Wenn man will, kann man solche Superregeln explizit angeben.

Verfolgen wir nun das Schicksal unseres eindimensionalen Universums! Zu einem Anfangszeitpunkt $t=0$ setzen wir vier schwarze Teilchen auf die Punkte 0, 1, 3 und 4, ein blaues auf 0, ein grünes auf 1 und ein gelbes auf 3. Das Bild links zeigt den weiteren Verlauf; die Zeitachse weist anders als üblich nach oben.

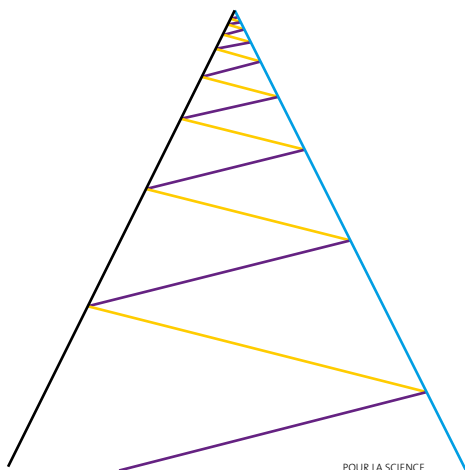
Nach einer Zeiteinheit trifft das blaue Signal auf das schwarze, das von Anfang an unbeweglich auf Position 1 verharrte. Gemäß Regel 1 entstehen bei dieser Kollision ein schwarzes Signal und ein grünes; das schwarze lebt also

unverändert fort, während das blaue in ein doppelt so schnelles grünes verwandelt wurde. Zur gleichen Zeit kollidiert das grüne Signal, das in 1 gestartet ist, mit dem unbeweglichen schwarzen in 3. Nach Regel 2 bleibt das schwarze abermals unbeeindruckt, während das grüne zum gelben abgebremst wird. Und so weiter.

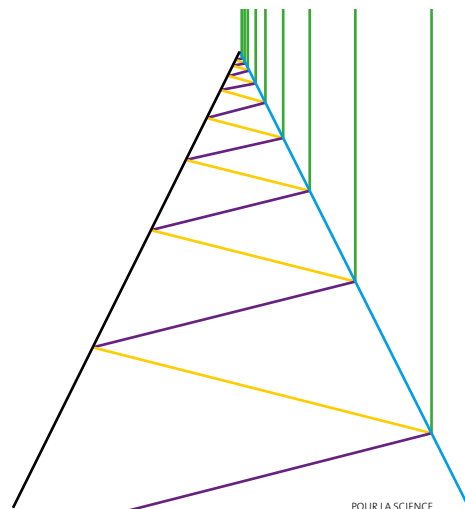
Das gesamte Weltgeschehen in diesem Universum ist festgelegt einerseits durch die Naturgesetze, das heißt die Definition der Signale und ihrer Interaktionsregeln, andererseits durch die Anfangsbedingungen. Die Welt ist deterministisch, der Zufall spielt keine Rolle.

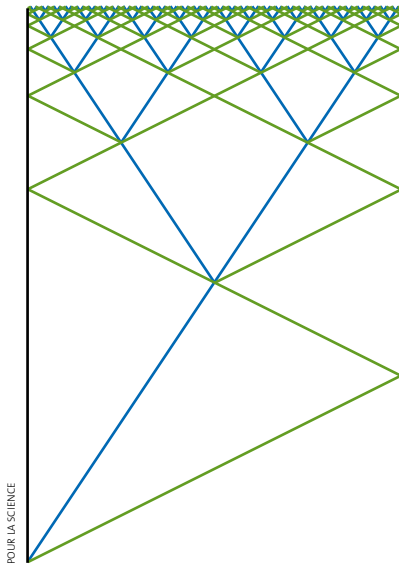
Im beschriebenen Beispiel ist das Schicksal des Universums ziemlich einfach zu durchschauen. Die schwarzen Signale sind ortsgebunden und verbleiben an ihren Plätzen bis in alle Ewigkeit, komme was wolle. Jedes andere Signal wechselt bei der Begegnung mit Schwarz die Farbe, wird dabei manchmal auch reflektiert und kehrt nach genau sechs Zeiteinheiten in seinen Anfangszustand zurück. Das gilt entsprechend für die ganze Welt: Das gesamte Geschehen in ihr wiederholt sich alle sechs Zeiteinheiten – ein bisschen langweilig, aber das ist ja erst der Anfang.

Im Folgenden werde ich die Signale mit ihren Geschwindigkeiten und Interaktionsregeln nicht immer vollständig aufzählen. Diese Daten sind jedoch aus den Abbildungen leicht zu erschließen; und eine einmal gefundene Regel

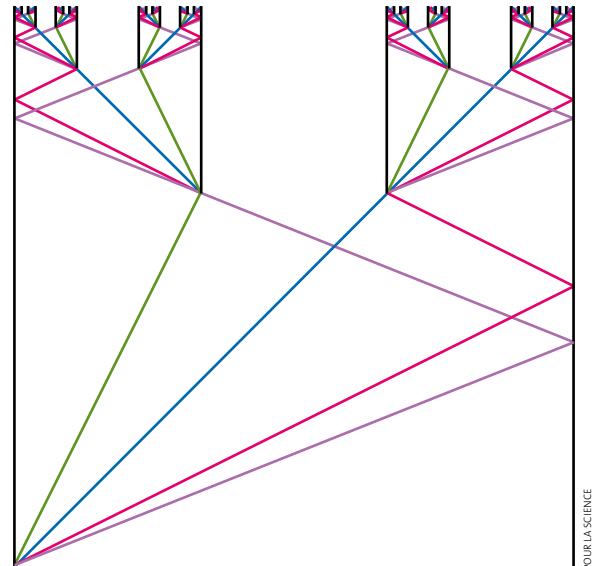


In dieser Welt können wir Signale Pingpong miteinander spielen lassen und so einen Häufungspunkt für die Interaktionen erzeugen (links). Ändert man die Regeln geringfügig ab (man ersetze Violett, Blau → Gelb, Blau durch Violett, Blau → Gelb, Blau, Grün), so produziert eine endliche Anzahl von Signalen in endlicher Zeit unendlich viele Teilchen (rechts).





Systeme von Signalen mit ziemlich einfachen Regeln erzeugen eine vollständig von Häufungspunkten erfüllte Linie (links) oder sogar eine Menge von Häufungspunkten, die genau dem so genannten Cantor-Staub entspricht (rechts).



ist selbstverständlich an allen Orten und Zeiten dieser Welt gültig.

Eine beliebte mathematische Rätselaufgabe handelt von einem Hund, der ständig zwischen Herrchen und Frauchen hin- und herrennt, während beide mit der halben Hundegeschwindigkeit aufeinander zugehen. Bevor die beiden Menschen sich begegnen, muss der Hund unendlich oft die Richtung wechseln, was jeden nicht punktförmigen Hund vor unüberwindliche Probleme stellt. Gleichwohl legt er nur ein endliches Stück Weg zurück, das allerdings aus unendlich vielen Teilstücken besteht.

Komm her, Hasso!

Diese Situation lässt sich mit den Teilchen von Durand-Lose mühelos nachstellen (Bild S. 67, links): Herrchen ist schwarz, Frauchen blau, der Hund je nach Laufrichtung gelb oder violett, und unmittelbar bevor Schwarz auf Blau trifft, finden unendlich viele Kollisionen statt. Was geschieht in einem solchen Häufungspunkt? Das ist aus den üblichen Regeln des Spiels nicht herzuleiten, also muss man für derartige Grenzfälle Zusatzregeln einführen. Die einfachste Möglichkeit ist festzusetzen, dass alle Signale verschwinden, als ob dort ein Schwarzes Loch wäre.

Selbst dann kann es vorkommen, dass in endlicher Zeit unendlich viele

Signale entstehen. Dazu muss man nur annehmen, dass der Hund bei jeder Begegnung mit Frauchen vor Freude eine Duftmarke setzt (Bild S. 67, rechts). Auch das würde selbstverständlich jeden realen Hund überfordern.

Wenn man solche Phänomene in der Fantasiewelt vermeiden will, kann man sich von einem realen Hund inspirieren lassen: Man schreibt jedem Teilchen eine Masse zu und fordert, dass bei jeder Kollision das Massenerhaltungsgesetz gilt, wie in der echten Physik. Wenn man die Welt am Anfang mit einer endlichen Gesamtmasse ausstattet, können nicht unendlich viele Teilchen entstehen.

Das Bild oben links zeigt eine ungewöhnliche Situation. Hier entsteht nicht nur ein Häufungspunkt, sondern unendlich viele; mehr noch: Ein ganzes Intervall der reellen Geraden besteht aus Häufungspunkten. Noch rätselhafter wirkt das rechte Teilbild: Die Menge der Häufungspunkte ist der Cantor-Staub. Dieses historisch früheste Fraktal entsteht, indem man von dem Intervall $[0, 1]$ das mittlere Drittel wegnimmt, aus jedem der verbleibenden Teile wieder das mittlere Drittel, und so weiter ad infinitum (Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 112).

Aus den genannten Beispielen geht hervor, dass die Signalwelten des Jérôme Durand-Lose und die Realität

sehr verschiedene Dinge sind. Punktförmige Teilchen auf einer reellen Geraden: Das kann nicht gut gehen. Da macht sich das unendlich Kleine bemerkbar, dessen Existenz die Physiker nicht wirklich akzeptieren; Häufungspunkte, Signale in unendlicher Anzahl und sogar Fraktale treten auf. Echte Fraktale wohlgermerkt, nicht die Näherungen wie Romanesco-Kohl oder das Adergeäst der menschlichen Niere, deren Selbstähnlichkeit spätestens dann zusammenbricht, wenn man in die Größenordnung von Atomen kommt.

Anders als Physiker haben Mathematiker keine Berührungsängste gegenüber idealen Welten – im Gegenteil, sie finden sie interessant und streben alsbald danach, sie sich zu Nutze zu machen. Kann man vielleicht eine solche Signalwelt zum Rechnen gebrauchen und damit dem Begriff vom »rechnenden Raum« eine neue Bedeutung geben? Diese Frage zerfällt in drei Teile, die wir nacheinander angehen werden:

- Ist jede Rechnung, die man in einer diskreten klassischen Welt realisieren kann, auch in einer eindimensionalen Welt von Signalen ausführbar?
- Erlauben die Häufungspunkte Rechnungen, die in einer diskreten Welt unmöglich sind, und wenn ja, welche?
- Lassen sich gewisse Rechnungen schneller durchführen als in der diskreten Welt? Wie verhält es sich insbeson-

dere mit den berüchtigten NP-vollständigen Problemen?

Für die erste Teilfrage beginnen wir mit zwei elementaren Rechenaufgaben: Subtraktion und Division mit Rest.

Ein Init geht auf die Reise

Um die Subtraktion $a - b$ zu realisieren, setzen wir drei unbewegliche Teilchen namens w_0 , w_a und w_b auf die Punkte 0, a und b der reellen Gerade (siehe »Elementares Rechnen mit Signalen«, links). Nun schicken wir im Punkt -1 ein Teilchen namens »init« mit der Geschwindigkeit 1 auf die Reise. Nach fünf Kollisionen entsteht ein unbewegliches Teilchen w_r . Dieses entspricht exakt dem Resultat der Subtraktion, denn es befindet sich genau im Punkt $a - b$. Im Lauf der Rechnung sind die Teilchen w_a und w_b , welche die Eingangsdaten verkörperten, verschwunden. Dem könnte allerdings bei Bedarf durch eine kleine Änderung der Regeln abgeholfen

werden. Das Vergnügen, sich mit einer kleinen geometrischen Überlegung zu vergewissern, dass das Teilchen w_r sich tatsächlich am Punkt $a - b$ befindet, bleibt dem Leser überlassen.

Mit einer nur geringfügig längeren Liste an Kollisionsregeln erhalten wir eine Signalwelt, die den Rest bei der Division von a durch b berechnet (»Elementares Rechnen mit Signalen«, rechts).

Das Ergebnis ist von vollkommener Genauigkeit. Selbst Differenzen wie $\pi - e$ sind in allen unendlich vielen Dezimalstellen korrekt – vorausgesetzt, wir haben w_a und w_b auf exakt die richtigen Plätze gesetzt. Das ist natürlich viel zu schön, um physikalisch realisierbar zu sein. Schon die brownische Molekularbewegung würde jeden Versuch einer exakten Festlegung am großen Zittern scheitern lassen, ganz abgesehen davon, dass sich die Position eines Atoms und seine Geschwindigkeit nicht gleichzeitig beliebig genau festle-

gen lassen. Überhaupt kommen für einen Physiker keine Konstante und kein physikalischer Wert einer reellen Zahl mit ihren unendlich vielen Dezimalstellen gleich. Physiker arbeiten zwar mit reellen Zahlen, glauben aber nicht wirklich an sie!

Lassen wir das ohnehin hoffnungslose Ziel absoluter Genauigkeit vorübergehend beiseite, so stellt sich mit der Zeit heraus, dass unser Signalrechner über alle Fähigkeiten verfügt, die ein gewöhnlicher Computer mit seinen stets diskreten Berechnungen und endlich genauen Zahlen hat. Er muss dazu noch nicht einmal die Häufungspunkte zu Hilfe nehmen. Es genügt, Signale mit ganzzahligen Geschwindigkeiten zu betrachten, die sich im Anfangszustand an Positionen mit ganzzahligen Koordinaten befinden und zu ganzzahligen Zeitpunkten miteinander reagieren. Die eindimensionale Primitivwelt ist also, was die Rechenfähigkeit angeht, so

Elementares Rechnen mit Signalen

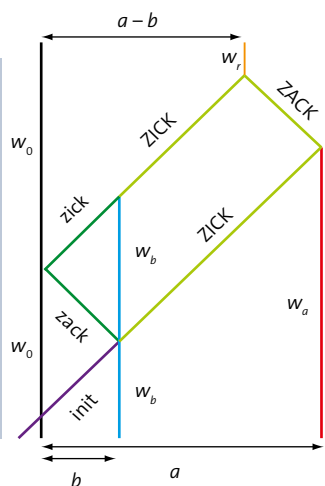
Will man eine Berechnung, hier zum Beispiel eine Subtraktion, mit zwei Zahlen a und b durchführen, so setzt man zum Zeitpunkt 0 stationäre Signale an die Punkte a und b . Das im linken Bild beschriebene System realisiert mit einigen Kollisionen von Signalen die Subtraktion, das heißt, es produziert ein stationäres Teilchen am Punkt $a - b$. Dieser geometrische Subtraktions-

algorithmus funktioniert mit beliebigen reellen Zahlen, selbst wenn diese irrational wie π oder $\sqrt{5}$ sind. Er bringt völlig fehlerfreie Ergebnisse hervor.

Die Figur rechts zeigt den geometrischen Algorithmus zur Berechnung des Restes bei der Division von a durch b (» a modulo b «). Im Beispiel ist $a = 11$ und $b = 3$.

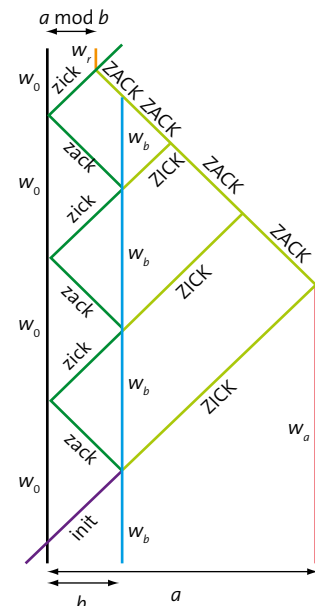
init, zick, ZICK	1
w_0, w_a, w_b, w_r	0
zack, ZACK	-1

init, w_b	→ zack, w_b , ZICK
w_0 , zack	→ w_0 , zick
zick, w_b	→ ZICK
ZICK, w_a	→ ZACK
w_b , ZACK	→ ZACK, w_b
ZICK, ZACK	→ w_r
zick, ZACK	→ w_r
zick, w_b , ZACK	→ w_r



init, zick, ZICK	1
w_0, w_a, w_b, w_r	0
zack, ZACK	-1

init, w_b	→ zack, w_b , ZICK
w_0 , zack	→ w_0 , zick
zick, w_b	→ zack, w_b , ZICK
ZICK, w_a	→ ZACK
w_b , ZACK	→ ZACK
zick, w_b , ZACK	→ ZACK
ZICK, ZACK	→ ZACK
zick, ZACK	→ w_r
w_0 , ZACK	→ w_0



leistungsfähig wie ein Computer, der dafür sogar einen dreidimensionalen Raum benötigt – wie eine Turing-Maschine, um genau zu sein. Aber dieses äußerst primitive Gerät kann ja seinerseits alle Tätigkeiten eines Computers durchführen.

Das Unentscheidbare entscheidbar machen

Der Signalrechner hat jedem gewöhnlichen Computer die Häufungspunkte voraus. Verschaffen sie ihm auch außerordentliche Rechenfähigkeiten?

Alan Turing hat 1936 gezeigt, dass ein üblicher diskreter Computer nicht alles berechnen kann. Insbesondere scheitert er an dem berühmt gewordenen Halteproblem: Es kann keinen Algorithmus geben, der für ein gegebenes Programm P fehlerfrei voraussagt, ob P anhalten oder unendlich weiterlaufen wird. Zahlreiche andere Probleme sind in diesem Sinn »algorithmisch unentscheidbar«, darunter das zehnte aus der berühmten Liste der 23 Probleme, die David Hilbert 1900 aufstellte, um der Mathematik des 20. Jahr-

hundert den Weg zu weisen. Es geht darum, ob eine Polynomgleichung mit ganzzahligen Koeffizienten wie beispielsweise $x^2 + 5y^2 = 129$ ganz-

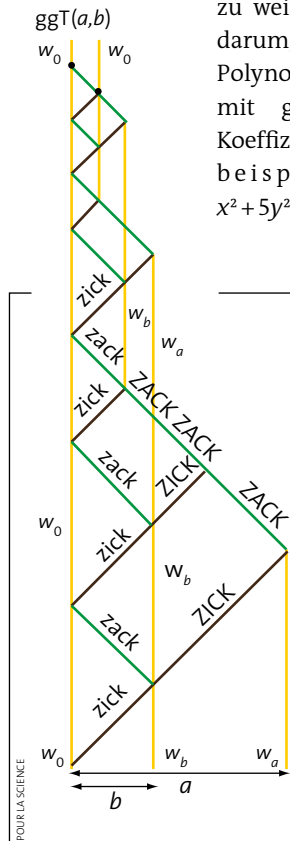
zahlige Lösungen hat (in dem Beispiel ist die Antwort Ja, denn $x=2, y=5$ ist eine Lösung). Erst 1970 bewies Juri Matijassewitsch, dass es kein allgemeines Verfahren geben kann, das diese Frage in jedem Einzelfall beantworten würde.

Es stellt sich nun heraus: Ein Signalrechner kann mittels Häufungspunkten beide genannten algorithmisch unentscheidbaren Probleme erledigen. Selbstverständlich sind solche Aussagen mit Vorsicht zu genießen. Schon richtig: Wenn man Signale – in Form von Teilchen oder anderen physikalischen Gegenständen – mit unendlicher Genauigkeit an ihre Ausgangsplätze setzen, miteinander interagieren lassen und ihren Endzustand mit ebenso unendlicher Präzision messen könnte, dann könnte man die Fähigkeiten klassischer Computer übertreffen und insbesondere gewisse Unentscheidbarkeiten auflösen. Da aber diese Voraussetzungen schon wegen der Beschränkungen der Quantenmechanik unerfüllbar sind, haben solche Ergebnisse nur eine sehr theoretische Bedeutung.

Gleichwohl darf man mit Aussicht auf Erfolg in dieser Richtung weiterdenken. Istvan Némethi und Gergely Székely vom mathematischen Institut der ungarischen Akademie der Wissenschaften sowie andere Wissenschaftler haben sich ein physikalisches System ausgedacht, das gewisse Arten von Häufungspunkten realisiert und zum

Rechnen nutzt. Für den Hausgebrauch sind diese Gedankenexperimente bislang eher ungeeignet: Sie erfordern entweder ein echtes Schwarzes Loch oder eine geschlossene Kurve in der relativistischen Raumzeit. David P. Malament und Mark Hogarth haben sogar eigens ein Raumzeitmodell mit der Eigenschaft eingeführt, dass die Vergangenheit eines Punktes, von außen gesehen, durchaus endlich ist, im Bezugssystem des Punktes selbst jedoch unendlich weit zurückreicht. In dieser unendlich langen Zeit konnte eine Turing-Maschine unendlich viele Berechnungen durchführen – genau das, wofür ein Signalcomputer die unendlich vielen Teilchen in der Umgebung eines Häufungspunktes verwendet.

Ein weiteres Resultat sei noch erwähnt. Irrationale Zahlen wie $\sqrt{2}$, e oder $\log 2$ sind in einem Signalcomputer nicht nur (theoretisch) exakt darstellbar, sondern auch exakt berechenbar, und zwar mit rationalen Ausgangsdaten. Das heißt, anfänglich haben alle Teilchen rationale Positionen und Geschwindigkeiten. Mit den vier Grundrechenarten käme man von diesem Ausgangspunkt über den Bereich der rationalen (als Quotient zweier ganzer Zahlen darstellbaren) Zahlen nicht hinaus. Eine irrationale Zahl ist nur als Grenzwert einer Folge rationaler Zahlen erreichbar; aber diesen Grenzwert kann ein Signalcomputer über einen Häu-



fungspunkte verwendet.

Berechnung des größten gemeinsamen Teilers

zick, ZICK		1
w_0, w_a, w_b		0
zack, ZACK		-1

zick, w_b	→	zack, w_b , ZICK
w_0 , zack	→	w_0 , zick
w_a , ZICK	→	ZACK
w_b , ZACK	→	ZACK, w_a
zick, ZACK	→	zack, w_b
ZICK, ZACK	→	ZACK
zick, w_b , ZACK	→	ZACK, w_0
w_0 , ZACK	→	w_0

Dieser geometrische Algorithmus arbeitet mit einer Variante des klassischen Verfahrens von Euklid. Gesucht ist der größte gemeinsame Teiler (ggT) von a und b , im Beispiel 8 und 3.

Man zieht b so oft wie möglich von a ab: $8-3 = 5, 5-3 = 2$. Dann rückt b an die Stelle von a und das letzte Ergebnis (hier 2) an die Stelle von b . Wieder subtrahiert man b so oft wie möglich von a : $3-2=1$, lässt nachrücken, und so weiter: $2-1=1, 1-1=0$. Das letzte von null verschiedene Resultat ist der gesuchte ggT. In unserem Beispiel ist das Ergebnis 1, was bedeutet, dass 8 und 3 teilerfremd sind.

Wählt man für a und b Zahlen, deren Verhältnis irrational ist, so liefert der Algorithmus einen Häufungspunkt. Das ist die ökonomischste Art, einen solchen zu erzeugen.

fungspunkt realisieren. Und mit einer einmal gefundenen Irrationalzahl kann man natürlich auch weiterrechnen.

Welche Irrationalzahlen sind einem Signalrechner denn überhaupt zugänglich? Diese Frage wurde 2009 abschließend beantwortet. Und zwar sind es alle Zahlen, die man als Differenz zweier rekursiv aufzählbarer Zahlen schreiben kann. Eine Zahl heißt rekursiv aufzählbar, wenn es eine Folge algorithmisch berechenbarer rationaler Zahlen gibt, die von unten gegen diese Zahl konvergiert. Diese Eigenschaft hat zum Beispiel die Zahl π .

Es ist allerdings keineswegs so, dass ein Signalcomputer praktisch jede Irrationalzahl bis auf vielleicht ein paar exotische Ausnahmen berechnen könnte, im Gegenteil: Die Menge der zugänglichen Zahlen ist abzählbar, also von der eher milden Unendlichkeit der natürlichen oder auch der rationalen Zahlen. Die reellen Zahlen insgesamt gehören zu einer höheren Unendlichkeitsklasse: Sie sind überabzählbar.

Übrigens zählt zu den rekursiv aufzählbaren Zahlen auch die berühmte, von Gregory Chaitin eingeführte Zahl Ω , deren Kenntnis die Mehrzahl der großen mathematischen Probleme lösen würde (siehe Chaitins Artikel in Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 54).

NP-vollständige Probleme im Visier

Die letzte der drei Fragen handelt von Problemen, die »von Natur aus« (»intrinsisch«) schwer sind. Das bedeutet typischerweise, dass der Rechenaufwand zur Lösung eines solchen Problems in der Größenordnung von 2^N liegt, wobei N die Größe des Problems ist (im Wesentlichen die Anzahl der Bits, die zu seiner Beschreibung benötigt werden). Bereits mittelgroße Exemplare einer solchen Aufgabe überfordern jede denkbare Rechenkapazität.

Eine bedeutende Art von schweren Berechnungsproblemen sind die NP-vollständigen. Ein Beispiel: Kann man einen Graphen mit drei Farben derart einfärben, dass niemals zwei durch eine Kante verbundene Knoten dieselbe Farbe haben?

Noch ist die Frage offen, ob es für dieses Problem nicht doch einen Algorithmus mit erträglicher (»polynomialer«) Rechenzeit gibt; das ist die berühmte Frage »P \neq NP?« der Informatik (Spektrum der Wissenschaft 10/2008, S. 74, und Dossier 6/2009 »Die größten Rätsel der Mathematik«). Aber eigentlich sind die Informatiker davon überzeugt, dass es einen solchen Algorithmus nicht gibt und daher alle NP-vollständigen Probleme intrinsisch schwer sind.

Könnte eine Berechnung mit Signalen ein NP-vollständiges Problem schnell lösen? Die Antwort ist Ja. Gemeinsam mit Denys Duchier und Maxime Senot hat Durand-Lose einen Algorithmus für Signale formuliert, der ein Problem dieser härtesten Klasse löst, und zwar mit einem Platz- und Zeitbedarf, der nicht von der Problemgröße abhängt, und ohne Verwendung von Häufungspunkten (dieses Mittel, unendlich viele Dinge in endlicher Zeit zu tun, gilt als fauler Trick). Da man alle NP-vollständigen Probleme ineinander umrechnen kann, würde der Algorithmus die ganze Klasse der NP-vollständigen Probleme mit einem Schlag erledigen – wenn er in der Realität durchführbar wäre.

Für dieses Ergebnis kommt es entscheidend darauf an, die Anzahl der Signale abzuschätzen, die für eine Berechnung mindestens erforderlich sind. Und dafür liefert ein spezieller Algorithmus den Schlüssel: die Berechnung des größten gemeinsamen Teilers zweier Zahlen. Er erfordert nur drei verschiedene Geschwindigkeiten (siehe »Berechnung des größten gemeinsamen Teilers«, links).

Allgemein kommt man mit einem erstaunlich geringen Sortiment an Teilchen aus. Folgendes haben Durand-Lose und seine Arbeitsgruppe gefunden und bewiesen:

► Bei Verwendung von Signalen, die eine oder zwei Geschwindigkeiten besitzen, können Häufungspunkte nicht auftreten.

► Auch bei drei Geschwindigkeiten gibt es noch keine Häufungspunkte, falls die Geschwindigkeiten und Anfangspositionen der Signale rationale

Zahlen sind, wohl aber, wenn zwei dieser Werte ein irrationales Verhältnis haben.

► Mit vier Geschwindigkeiten kann man nicht nur Häufungspunkte erzeugen, sondern auch alles berechnen, was gewöhnliche diskrete Maschinen berechnen können.

► Letzteres gelingt mit drei Geschwindigkeiten und 25 Typen von Signalen, wie Durand-Lose 2013 gezeigt hat.

So theoretisch und abgehoben die Welt der Signale heute auch erscheinen mag – vielleicht bereitet uns diese Diskussion ja auf die Zukunft vor. Die Physiker haben nie behauptet, dass es unmöglich sei, Häufungspunkte zu erzeugen. Es müsste ihnen nur noch ein Mittel einfallen, das etwas preiswerter ist als ein ganzes Schwarzes Loch. ∞

DER AUTOR



Jean-Paul Delahaye ist emeritierter Professor am Institut für Grundlagen der Informatik der Universität de Lille.

QUELLEN

Andréka, H. et al.: Closed Timelike Curves in Relativistic Computation. In: Parallel Processing Letters 22, 1240010, 2012

Duchier, D. et al.: Computing in the Fractal Cloud: Modular Generic Solvers for SAT and Q-SAT Variants. In: Theory and Applications of Models of Computation. Springer Lecture Notes in Computer Science 7287, S. 435–447, 2012

Durand-Lose, J.: Irrationality is Needed to Compute with Signal Machines with only Three Speeds. In: The Nature of Communication, Springer Lecture Notes in Computer Science 7921, S. 108–119, 2013

Durand-Lose, J.: Abstract Geometrical Computation 1: Embedding Black Hole Computations with Rational Numbers. In: Fundamenta Informaticae 74, S. 491–510, 2006

WEBLINKS

Durand-Lose, J.: A Visual Introduction to Abstract Geometrical Computation
www.univ-orleans.fr/lifo/Members/Jerome.Durand-Lose/Recherche/AGC/intro_AGC.html

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1382053

Der Pinot noir – ein Auslaufmodell?

Winzer und Kellermeister weltweit fürchten um die Zukunft des Qualitätsweinbaus. Denn mit höheren Jahrestemperaturen verändern sich Aromen und Zuckergehalt der Trauben.

Von Kimberly A. Nicholas

Als ich vor Kurzem Stichproben in Carneros nahm, einer Weinbauregion im Sonoma Valley in Kalifornien, entdeckte ich etwas Ungewöhnliches: Auf dem zweieinhalb Hektar großen Weinberg wuchsen wie erwartet Pinot-noir-(Spätburgunder-)Reben Reihe neben Reihe, doch etwas abseits standen einige andere Sorten. Anhand ihrer Blätter und Trauben identifizierte ich die Rotweine Cabernet Franc, Petit Verdot, Syrah und Malbec sowie den Weißwein Sauvignon Blanc.

»Das ist mein kleines Experiment«, erklärte mir Ned Hill, der einige der besten Weingüter in der Region leitet. »Hier ist es inzwischen ziemlich warm für den Pinot. Im Moment erzielen wir damit noch einen sehr guten Preis, aber schon sehr bald brauchen wir andere Sorten, die besser an den Klimawandel angepasst sind.« Für einen amerikanischen Weinfreund klingt eine solche Aussage geradezu ketzerisch. Denn dort, wo sich Sonoma und Napa Valley zur Bucht von San Francisco vereinigen, ist traditionell Pinotgebiet. Milde Tage und kalte Nächte, frische Seeluft und lehmige Böden verleihen den Rotweinen der Regionen Aromen von frischen Erdbeeren, Kardamom und Zimt. Dieser Geschmack macht sie einzigartig und wertvoll.

AUF EINEN BLICK

KLIMASTRATEGIEN FÜR WINZER

1 Die **Klimaerwärmung** könnte manche Weinbauregion hart treffen, denn steigende Temperaturen verändern die **chemischen Prozesse** in den Trauben und damit den **Geschmack** beziehungsweise über die Zuckersynthese auch den **Alkoholgehalt** des Weins.

2 Versuche, den Anbau einer bestimmten Sorte in eine heute eigentlich zu **kühle Zonen** zu verlegen, beispielsweise in eine höhere Lage, sind umstritten, weil auch die **Bodenverhältnisse** den Geschmack bestimmen.

3 In gewissen Grenzen können Winzer einer regionalen Klimaerwärmung vor Ort begegnen, zum Beispiel durch eine **sonnenabgewandte Ausrichtung** der Rebenreihen oder eine stärkere **Beschattung** der Trauben durch die Blätter.

Gut 9000 Kilometer weiter östlich haben Staats- und Regierungschefs der ganzen Welt gerade erst auf der UN-Klimakonferenz in Paris darüber beraten, wie der globale mittlere Temperaturanstieg zu beschränken sei (siehe den Beitrag S. 19). Wenn der Trend anhält, wird der Geschmack der Carneros-Weine nicht mehr der gleiche bleiben. Winzer müssen dann womöglich zu anderen, den Bedingungen besser angepassten Sorten wechseln, wie Hill sie versuchsweise bereits anbaut. Sie könnten ihre Unternehmen auch nach Norden in kühlere Gebiete verlagern, doch der Geschmack hängt auch von Boden, Feuchtigkeit und Niederschlägen ab. Derartige Maßnahmen würden einen Bruch mit Traditionen bedeuten und bergen das Risiko massiver Umsatzeinbußen.

Der Klimawandel bereitet Winzern weltweit Sorgen, ob in Kalifornien oder Burgund, in Südafrika oder Australien. Manche befürchten quantitative Ernteeinbußen, etwa in Fresno im kalifornischen Central Valley, wo 30 Tonnen Trauben pro Hektar das Maß aller Dinge sind, um dank großer Mengen einen preiswerten Wein auf den Markt zu bringen.

Nur 200 Meilen nördlich davon steht der Anbau im Zeichen der Qualität. Im Napa Valley schneiden die Winzer ihre Reben im Winter so, dass jeder Trieb nur wenige, dafür aber hochwertige Früchte trägt. Den ganzen Sommer hindurch kontrollieren sie die Pflanzen und schneiden minderwertige Trauben heraus. Ein Hektar Rebfläche ergibt dann zwar »nur« ungefähr zehn Tonnen an Früchten, doch das daraus gewonnene Getränk erzielt einen zehnfach höheren Preis. Könnte man in Fresno nicht auf die gleiche Strategie umschwenken? »Selbst ein Genie bringt in Fresno keinen guten Pinot zu Wege«, erklärte mir dazu ein Winzer. »Es ist dort im Jahresdurchschnitt um ein paar Grad heißer, und das ist einfach zu viel.«

Denn Wein besteht zwar zu mehr als 80 Prozent aus Wasser und zu ungefähr 12 bis 15 Prozent aus Alkohol, doch es sind die verbleibenden fünf Prozent, die einen besonderen Geschmack ausmachen. Obwohl der Herstellungsprozess viel Erfahrung voraussetzt, räumen die meisten der von mir interviewten Kellermeister ein, dass das Potenzial eines



Seidig und elegant, Noten von roten und schwarzen Früchten, dazu erdige Töne – beim Pinot noir geraten Weinliebhaber ins Schwärmen. Doch die hier zu Lande als Spätburgunder bekannte Rebsorte stellt Ansprüche, die sich in Folge der Klimaerwärmung mancherorts künftig wohl nicht mehr erfüllen lassen.

Weins bereits in seinen Trauben festgelegt ist. Zwar entstehen einige der möglichen Geschmacksstoffe beim Keltern, zum Beispiel durch die unterschiedlichen Hefen, die Zucker in Alkohol umwandeln, durch das Reifen in Eichenfässern beim Barriqueausbau oder dank anderer Feinheiten. Doch wenn der Weingarten wenig Potenzial bietet, vermag der Kellermeister kein Spitzenergebnis herbeizuzaubern. Und an dieser Stelle kommt das Klima ins Spiel.

Winzer unterscheiden das Makroklima einer ganzen Anbauregion wie zum Beispiel Carneros vom Mesoklima eines einzelnen Weinbergs und vom Mikroklima, das am Rebstock und um die Trauben herrscht. Ersteres wird durch größere geografische Zusammenhänge beeinflusst, die Temperatur und Niederschlag sowie die Anbausaison vorgeben – und da-

mit auch, welche der Tausenden heutigen Rebsorten sich für eine bestimmte Region eignet. So passen solche für spritzige Weißweine zu den kürzeren Wachstumsperioden und kühleren Temperaturen in Deutschland, während kräftige Rotweine ihren Geschmack eher während eines langen, heißen und trockenen Sommers in Spanien oder Südfrankreich entwickeln. Auch zu viel Feuchtigkeit kann schaden, da sie in Kombination mit Wärme den Pilzbefall fördert. Zu viele Niederschläge zur falschen Zeit können daher Trauben faulen lassen, während lang anhaltende Trockenheit die Reben stresst. Viele Weinanbauregionen in der Neuen Welt, einschließlich Kalifornien, werden daher intensiv bewässert; Studien, die ich in einem Team unter der Führung von Kollegen der Stanford University durchgeführt habe, zeigten jedoch, dass die

Made in Germany

Deutsche Winzer gehören derzeit noch zu den Gewinnern der Klimaerwärmung.

Kann ein deutscher Spätburgunder mit einem französischen Pinot noir mithalten? Noch vor etwa 15 Jahren hätte diese Frage einem Weinkenner nur ein müdes Lächeln entlockt. Das hat sich inzwischen geändert und zwar wohl nicht allein dank der besseren Kenntnisse einer neuen Winzergeneration, sondern auch durch höhere Temperaturen.

Laut Marco Hofmann, Manfred Stoll und Hans Reiner Schultz von der auf Weinbau spezialisierten Hochschule Geisenheim im Rheingau beträgt die mittlere Temperatur während der Vegetationsperiode 15,7 Grad Celsius für die Jahre 2000 bis 2014. Das sind 1,2 Grad Celsius mehr als 1961 bis 1990 und entspricht damaligen Werten im französischen Burgund.

Der klassische Riesling profitiert zurzeit ebenfalls von der globalen Erwärmung sowie von einer Zunahme der Sonneneinstrahlung, die auf eine Abnahme von Aerosolen in der Atmosphäre zurückgehen könnte. Beide Bedingungen führen zu ei-

nem höheren Zuckergehalt der Trauben. So sei in den Jahrgängen 1973 bis 2000 auf zwei Testparzellen nur zweimal ein Öchslegrad von 90 erreicht worden, seit 2000 aber bereits in mehr als der Hälfte der Ernten. Mostgewichte von unter 75 Grad Öchsle, bis 2000 in gut der Hälfte der Jahre der Fall, kommen gar nicht mehr vor. Auch der Säuregehalt hat stark abgenommen, und der Riesling erreicht nun international anerkannte Qualität.

Freilich gibt es neue Risiken zu beachten. Im Süden und Südwesten Deutschlands sei die Wahrscheinlichkeit für niederschlagsreiche Sommermonate gestiegen. Insbesondere Rebsorten mit kompakten Trauben faulen schneller. Auch die Bodenerosion wird in Folge von Starkregen zunehmen. Andererseits dürften lange trockene Phasen häufiger auftreten, was vor allem die Reben noch junger Weinberge mit schwach ausgeprägtem Wurzelwerk sowie Steillagen mit geringer Wasserspeicherkapazität belasten wird.

Damit nicht genug, lassen mildere Winter die Reben früher austreiben, was sie anfälliger gegen Nachtfrost macht. Die Wissenschaftler warnen auch davor, dass der höhere Zuckergehalt – Ergebnis wärmerer Spätsommer – Schädlinge anlockt. Zudem wandern neue Schädlinge wie die Kirschessigfliege aus südlichen Ländern ein.

Unklar ist noch, wie sich steigende Konzentrationen von Kohlendioxid auswirken. Das Gas wird von Pflanzen aufgenommen und in Biomasse umgesetzt, wirkt aber auch auf Bodenorganismen und Schädlinge. In Treibhäusern wird Kohlendioxid gezielt zur Düngung eingesetzt. Gemeinsam mit Forschern der Justus-Liebig-Universität in Gießen und der Philipps-Universität Marburg untersuchen Önologen der Hochschule Geisenheim diese Zusammenhänge nun bei Reben unter Freilandbedingungen.

Klaus-Dieter Linsmeier



Rieslinganbau im Rheingau. Die Winzer profitieren von den wärmeren Durchschnittstemperaturen der letzten Jahre: Der Zuckergehalt der Trauben stieg, der Säureanteil fiel.



BEIDE FOTOS: ROBERT SINSKEY VINEYARDS



Winzer versuchen höhere Temperaturen auszugleichen, indem sie die Trauben stärker durch die Blätter beschatten lassen oder die Reihen in einer anderen Richtung pflanzen.

Erträge dennoch von den natürlichen Niederschlägen abhängen.

Einer der wichtigsten Umweltfaktoren auf Makro-, Meso- und Mikroebene ist die Temperatur. Sie steuert, wann Reben aus der Winterruhe erwachen und wie die Trauben reifen. In dieser letzten Phase akkumuliert Zucker in den Früchten, bei reifen Weintrauben trägt er mit ungefähr einem Viertel zu ihrem Gewicht bei; zum Vergleich: bei einem reifen Pfirsich ist es nur ein Achtel. Eigentlich ist Wärme in dieser Zeit willkommen, denn sie steigert den Zuckergehalt um ein oder zwei Prozent pro Woche und damit – nach der Gärung des Traubensafts – den Alkoholgehalt. Doch allzu viel schadet der Qualität: Höherprozentige Weine schmecken vielen Kennern etwas zu bitter und unausgewogen, weil der Alkohol manche feinen Aromen überdeckt.

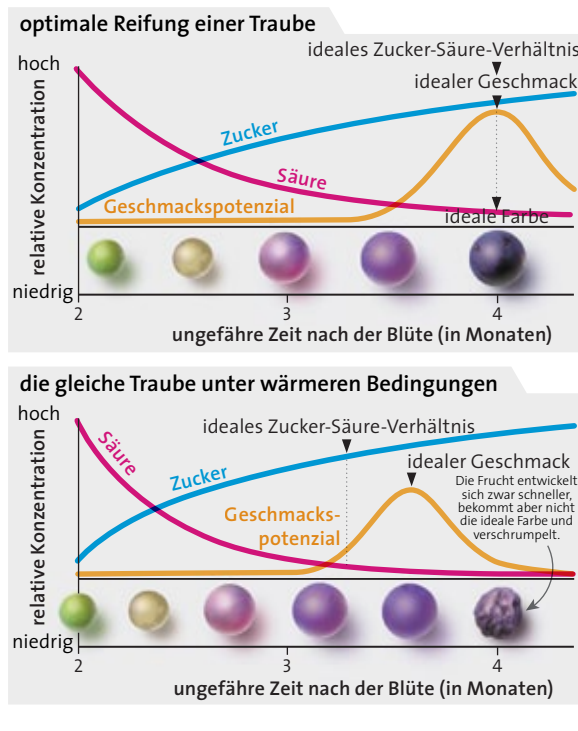
Zucker und Säure austarieren

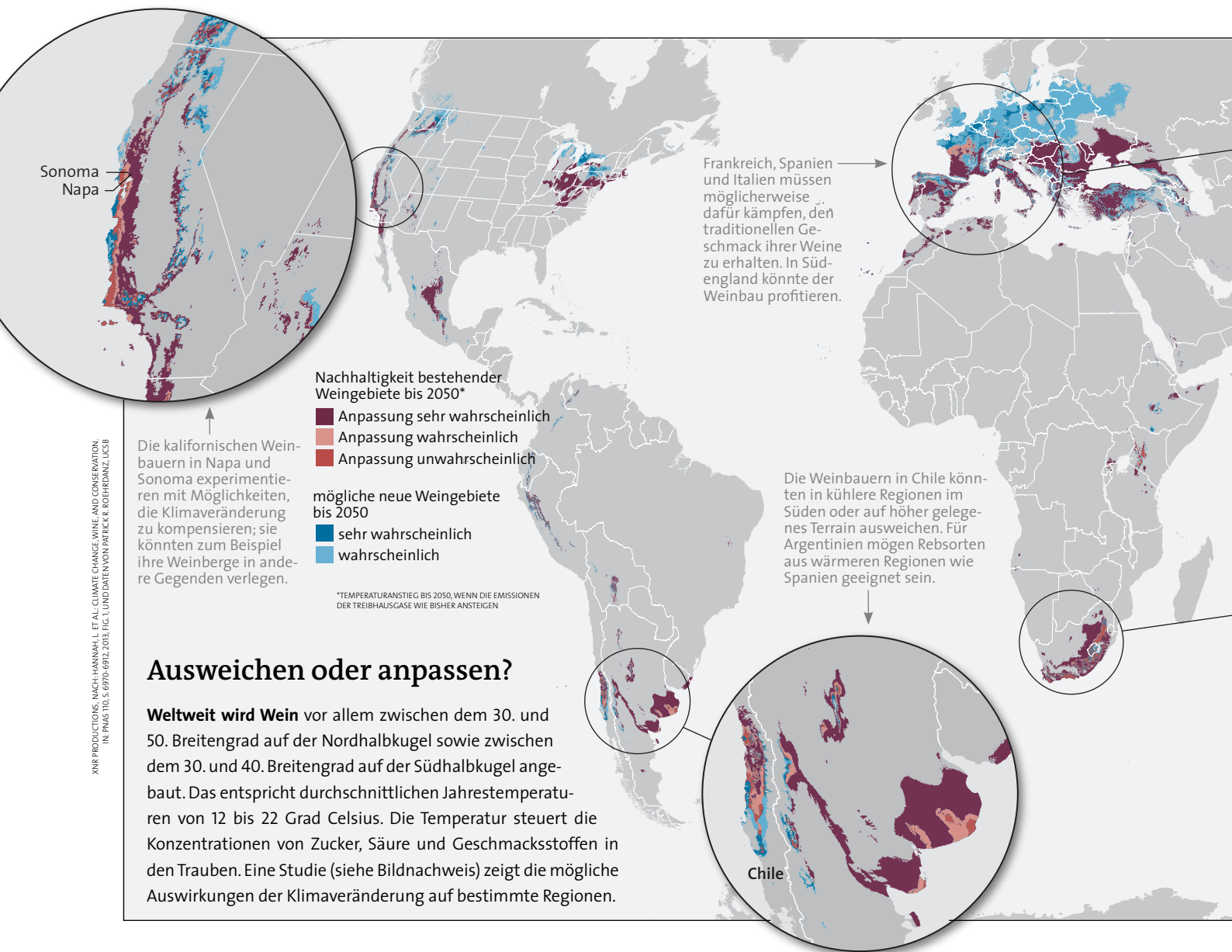
Die Wirkung des Mesoklimas ist weniger offensichtlich, in erster Linie beeinflusst es das Verhältnis von Zucker und Säure in den Trauben. Unreife Früchte enthalten viel Säure, die sich während des Reifeprozesses abbaut. In kühleren Regionen kultiviert man Sorten, die in der relativ kurzen Wachstumsaison schnell reifen und doch einen nicht zu hohen Säuregehalt aufweisen. Es kommt auf das richtige Maß an: Einem Weißwein verleiht die Säure Frische und Spritzigkeit, was für den in Deutschland beliebten Riesling charakteristisch ist (siehe »Made in Germany« links).

Erst seit wenigen Jahren richten Önologen (Weinforscher) ihr Augenmerk auch auf weniger hervorstechende Komponenten. So ist der Traubensaft der meisten Rebsorten eigentlich farblos; ein Rotwein wird daraus, wenn er nach dem Pressen auf den Beeren gären darf. Aus diesen treten Anthozyane aus, Moleküle mit Kohlenstoffringen und angehängten OH-Gruppen. Solche »phenolischen Verbindungen« färben auch Blaubeeren blau und Auberginen lila. Die Farbe eines Weins ist nämlich nicht nur schmückendes Beiwerk – sie prägt unsere Erwartung und damit die Geschmackswahrnehmung. Einen tiefroten spanischen Rioja werden wir niemals auf die gleiche Weise erleben wie einen Spätburgunder. Diese che-

Wann soll man ernten?

Wenn die Traube reift, steigt der Zuckergehalt, und der Säureanteil fällt (obere Grafik, blaue und rote Kurve). Das ideale Verhältnis für einen guten Wein bildet sich ungefähr vier Monate nach der Blüte heraus. Auch der Geschmack (orangefarbene Kurve), durch andere Stoffe beeinflusst, hat sein Optimum ungefähr zu diesem Zeitpunkt. Das ergibt ein enges Zeitfenster für die beste Erntezeit. Wenn die globalen Temperaturen steigen (untere Grafik), entsteht das gewünschte Verhältnis aber schon früher und ebenso, jedoch nicht zur gleichen Zeit, das Geschmacksoptimum. Die Trauben könnten aber auch so schnell reifen, dass sich Aromen und Farbe erst gar nicht optimal entwickeln können (das Maximum ist in der orangefarbenen Kurve niedriger).





XNR PRODUCTIONS, NACH HANNAH L. ET AL.: CLIMATE CHANGE, WINE, AND CONSERVATION, IN: PNAS 110, S. 6970-6972, 2013, FIG. 1, UND DATEN VON PATRICK R. ROHRDANZ, UCSB

Ausweichen oder anpassen?

Weltweit wird Wein vor allem zwischen dem 30. und 50. Breitengrad auf der Nordhalbkugel sowie zwischen dem 30. und 40. Breitengrad auf der Südhalbkugel angebaut. Das entspricht durchschnittlichen Jahrestemperaturen von 12 bis 22 Grad Celsius. Die Temperatur steuert die Konzentrationen von Zucker, Säure und Geschmacksstoffen in den Trauben. Eine Studie (siehe Bildnachweis) zeigt die mögliche Auswirkung der Klimaveränderung auf bestimmte Regionen.

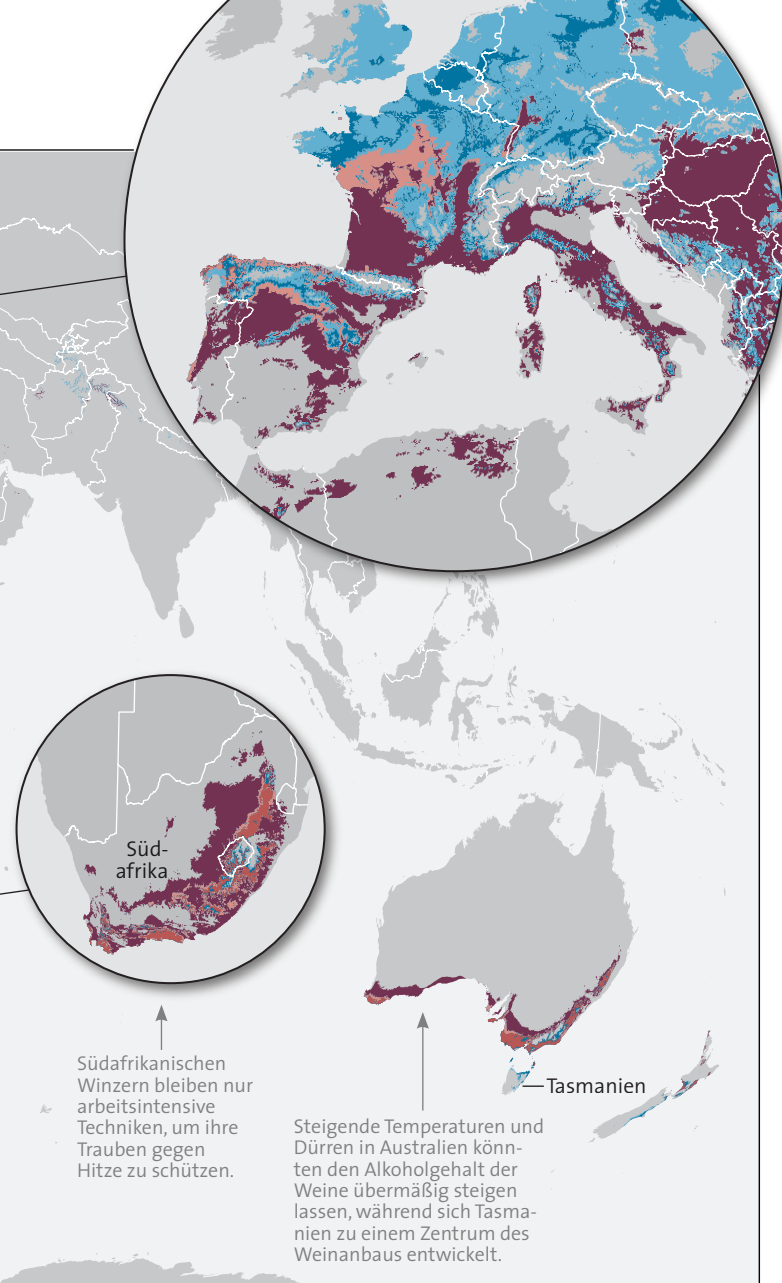
mischen Verbindungen entstehen in Folge der Umwandlung von Sonnenenergie. Trotzdem zeigen Weine aus bereits wärmer gewordenen Klimazonen eher weniger die erwünschte Farbe. Vermutlich kann ein Temperaturanstieg über einen Schwellenwert Prozesse anstoßen, welche die Anthozyankonzentration oder die Farbkomplexbildung verringern. Weißweintruben enthalten übrigens weniger Phenole in den Schalen und werden normalerweise auch nicht mit ihnen weiterverarbeitet.

Das Mikroklima am Rebstock beeinflusst unter anderem weitere phenolische Verbindungen: die Tannine. Der Name rührt aus alten Zeiten, als diese Stoffe zum Verarbeiten von Leder dienten: das französische Wort »tanin« bedeutet Gerbstoff. Die Moleküle verbinden sich mit Proteinen des Speichels und trocknen so Zunge und Zahnfleisch, was ein raues, pelziges Gefühl im Mund verursacht; zudem schmecken sie bitter. Weine mit einem ausgewogenen Tanningehalt passen sehr gut zu herzhaften Speisen. Tannine polymerisieren bei

der Reifung des Weins in Eichenholzfässern und bei der Flaschenreife, was ihre Wirkung mildert. Deshalb empfiehlt es sich bei manchen Rotweinen, sie eine Zeit lang zu lagern: Das Ergebnis ist ein samtig weicher Wein.

Den Unterschied zwischen einem passablen Tischwein und einem edlen Tropfen mit einzigartigem Charakter machen aber vor allem jene Bestandteile aus, die in nur sehr geringen Konzentrationen auftreten: die Aromen. Beim Schwenken des bauchigen Glases steigen sie auf und binden an die Geruchsrezeptoren in unserer Nase; von dort gelangen Signale direkt in unser Gehirn. Wenn wir Wein schmecken, haben wir ihn eigentlich gerochen. Aus diesem Grund erscheint einem Erkälteten selbst ein schwerer Rotwein oft fade. Die Aromen gelangen auf Grund des vermehrt gebildeten Schleims erst gar nicht zu den Rezeptoren.

Insbesondere in den späteren Stadien des Reifens bilden sich immer mehr dieser Verbindungen. Würde ein Wein aus unreifen Trauben gewonnen, fände er daher nicht viele



zu verstehen. Ein schwieriges Unterfangen, denn einerseits kommen manche davon in extrem geringen Konzentrationen vor, andererseits nehmen wir sie ganz unterschiedlich wahr. So können wohl mehr als 200 Komponenten die Assoziation »Erdbeere« wecken, doch sind sie keine Garantie dafür, dass ein Kunde die Frucht herausschmeckt. Ein Meilenstein auf diesem Forschungsgebiet gelang der Wahrnehmungsforscherin Hildegard Heymann von der University of California in Davis in den 1980er Jahren. Sie entdeckte, dass Sonnenlicht Methoxypyrazin zerstört, das einem Cabernet Sauvignon ein unerwünschtes Paprikaaroma verleiht. Kalifornische Winzer ließen ihre Reben daraufhin so wachsen, dass die Blätter den Früchten weniger Schatten spendeten; ihr Cabernet wurde deutlich besser. Forscher in Australien, Chile und Deutschland identifizierten die Substanz Rotundon als Quelle des beim Syrah erwünschten Geschmacks von schwarzem Pfeffer. Doch hier zeigt sich erneut der Einfluss des Klimas: Offenbar reichert sich dieses Molekül in kühleren Anbaugebieten oder in kühleren Jahren stärker an.

Seit Generationen im Familienbesitz

Erst wenn alle derartigen Einflüsse bekannt sind, können Winzer auf die globale Veränderung adäquat reagieren. Ob es sinnvoll wäre, beispielsweise Anbaugebiete von Kalifornien nach Oregon zu verlegen, lässt sich derzeit nicht vorhersagen, denn hochwertige Weine wachsen nur auf Böden mit den richtigen Nährstoffen und bei angemessenen Niederschlagsmengen. Zudem benötigt ein neuer Weinberg fünf bis sechs Jahre, bis er volle Erträge bringt, und es kann bis zu 20 Jahre dauern, bis man einen Gewinn erzielt. Viele Winzer hängen überdies an ihren Weingärten, weil die seit Generationen im Familienbesitz sind. Gebiete, die in naher Zukunft warm genug sein werden, um dort Wein anzubauen, mögen außerdem heute noch unbekannte Herausforderungen wie Schädlinge und Pflanzenkrankheiten bergen. Letztlich entwickelt eine Weinbauregion auch einen Stil und eine Identität, die nicht einfach zu verpflanzen sind. Die Konsumenten nehmen das ebenfalls so wahr: Wer die Rotweine Kaliforniens für sich entdeckt hat, wird nicht ohne Weiteres solche aus Oregon wertschätzen.

Statt mit den vorhandenen Rebsorten deren bevorzugten Umweltbedingungen hinterherzuziehen, könnte man natürlich umgekehrt auch Sorten verwenden, die dem erwarteten Klima bereits angepasst sind. Winzer haben im Lauf der Geschichte tausende Varietäten für bestimmte Umgebungsbedingungen gezüchtet. Aber auch mit dieser Strategie wird es Zeit und einen langen Atem brauchen, um trotz unvermeidlicher Fehlschläge letztlich das richtige Gesamtkonzept für eine Lage zu entwickeln.

Bei Grundnahrungsmitteln wie Getreide züchten Forscher bereits neue Sorten für steigende Temperaturen. Doch dieser Ansatz eignet sich nur bedingt für Reben. Bis das Ergebnis feststeht, braucht es zehn oder mehr Jahre, zudem gibt es kulturelle Beschränkungen. Französische Gesetze bei-

Freunde. Denn anfangs schmecken Trauben wie grüne Früchte oder Gemüse, später wie rote Früchte (Himbeere), dann wie schwarze (Brombeere) und schließlich wie Rosinen. Vermutlich entstehen die Aromen nicht in gleichem Maß, wie der Zuckergehalt steigt. Deshalb lesen einige Winzer die Trauben nicht mehr einfach dann, wenn ein bestimmter Öchslegrad erreicht ist. Vielmehr verkosten sie die Früchte vom Stock und entscheiden dann, ob die vorhandenen Geschmacksstoffe das Potenzial für einen großen Wein haben. Manchmal bleiben die Trauben dann länger hängen, allerdings verlieren sie dabei Wasser und damit Gewicht – der an der Saftmenge gemessene Ertrag sinkt. Durch die längere Reifezeit steigt überdies der Zuckergehalt. Das mag bei einem Eiswein erwünscht sein, mitunter zwingt es aber den Kellermeister, Most mit Wasser zu verdünnen, um den Alkoholgehalt auf dem gewünschten Niveau zu halten.

Wissenschaftler versuchen, die Einflüsse der mehr als tausend verschiedenen Aromastoffe auf den Geschmack besser



Winzer von Robert Sinskey Vineyards in Napa lassen die Maische mit der Haut der Beeren gären, um ein Maximum an Farbe und Tanninen zu extrahieren.

spielsweise schreiben vor, dass in bestimmten Regionen nur bestimmte Sorten angebaut werden dürfen, wenn sie ein geschütztes Label wie Bordeaux tragen sollen. Zwar ist der Marselan, eine Kreuzung zwischen Cabernet Sauvignon und Grenache, in den 1990er Jahren als Côtes du Rhône erfolgreich zugelassen worden, doch Weinliebhaber hängen oft an ihren Liebessorten und blockieren damit den Markt für neue.

Reben richtig erziehen

Winzer können den makroklimatischen Veränderungen aber auch mit diversen Maßnahmen im Weinberg begegnen: Sie können zum einen die Richtung der Pflanzreihen so ändern, dass sich die Pflanzen stärker beschatten. Auch die »Erziehung« der Reben, also die Technik, ihr Holz durch Stützkonstruktionen, durch Beschnitt und Anordnung der Triebe in die gewünschte Form zu bringen, kann die Früchte vor der Sonne schützen. Beispielsweise ist es in Südafrika üblich, Schatten spendende Halbdächer zu formen und in steilen Hanglagen Südtirols pflegt man Reben zu einer Pergola zu erziehen. Winzer können auch Wurzelstöcke als Unterlagen verwenden, um darauf wärmeresistenteren Sorten zu pflöpfen; bislang erfolgt eine derartige Veredelung vor allem als Maßnahme gegen die Reblaus. Dergleichen wird normalerweise nur einmal durchgeführt, nämlich wenn man einen Weinberg anlegt.

Darüber hinaus lässt sich das Mesoklima in engen Grenzen durch Bewässern mit Sprengern verändern – auf diese Weise senkt man dank der Verdunstung die Temperatur im Weingarten. Außerdem gehört es zur Kunst des Rebschnitts, durch die Zahl und Position der Blätter das Mikroklima der reifenden Trauben zu beeinflussen.

In den Weinbergen um Carneros zeigten meine Messungen an Trauben von mehr als 500 Pinot-noir-Reben, dass die Sonneneinstrahlung in den letzten Jahren um mehr als das Dreifache gestiegen ist. Dort habe ich die Wirksamkeit sol-

cher Maßnahmen gemeinsam mit Kollegen von der Stanford University und der University of California in Davis untersucht. Alle Triebe und Blätter waren oberhalb der Trauben an Drähten hochgebunden, damit die Luft besser zirkulieren konnte, was Erkrankungen vorbeugt. Jedes Prozent zusätzliches Licht hatte einen zweiprozentigen Rückgang der Tannine und Anthozyane zur Folge. Banden wir die Reben aber so, dass die Blätter die Früchte mehr beschatteten, konnten diese kühler heranreifen und ihre Aromastoffe bewahren. Doch diese Maßnahmen haben ihre Grenzen. Eine Temperaturerhöhung von mehr als einem Grad Celsius im Frühjahr dürfte die Ernteerträge erheblich schmälern, und mit sinkender Qualität wird obendrein der Preis fallen.

Obwohl die meisten Aromen aus der Traube kommen, können Kellermeister den Geschmack noch zusätzlich beeinflussen. Wenn Säuren durch die Klimaerwärmung zu schnell abgebaut werden, kann man nach dem Pressen welche zugeben; akkumulieren die Trauben zu viel Zucker, entfernt Umkehrosmose einen Alkoholüberschuss. Dies sind aber drastische Maßnahmen, die nur bedingt den ursprünglichen Geschmack bewahren und den Wein zum Industrieprodukt machen, was sich auf den Preis auswirken dürfte.

»Es dauert eine Generation, um ein Weingut aufzubauen. Die nächste findet bereits einen Weg, es besser zu machen, die Generation der Enkel aber macht es dann wirklich gut.« Jason Kesner, Manager eines der besten Weingüter Kaliforniens, weiß genau, wovon er spricht. »Auf genau diese Weise sind die grandiosen Weingüter in der alten Welt entstanden – durch eine Menge harte Arbeit und die Erfahrung vieler Jahre.« Manche Experten glauben, dass die Anbauregionen der Neuen Welt wie Napa und Sonoma ihr Potenzial noch gar nicht voll entwickelt haben. Winzer und Kellermeister können zwar mit einigen technischen Möglichkeiten und Migration gen Norden oder auf höheres Terrain auf die veränderten Bedingungen reagieren, es bleibt aber offen, ob dies ausreichen wird. ~

DIE AUTORIN



Kimberly A. Nicholas ist Associate Professor of Sustainability Science an der Universität Lund in Schweden. Sie berät Winzer und Kellermeister auf der ganzen Welt. Aufgewachsen ist sie auf einem Weingut in Sonoma, Kalifornien.

QUELLEN

- Hofmann, M. et al.:** Klimawandel und Weinbau. In: Geographische Rundschau 3, 2016 (in Vorbereitung)
- Nicholas, K. A., Durham, W. H.:** Farm-Scale Adaptation and Vulnerability to Environmental Stresses: Insights from Winegrowing in Northern California. In: Global Environmental Change 22, S. 48–494, 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382048

Unsere Neuerscheinungen



Gründungsmythos: Wie entstand Israel? • David und Salomo – nur ein Mythos? • Der Tempel Salomos • Religionsgeschichte: Jahwes Frau • Judas Untergang: Ende mit Schrecken • € 8,90



Irrt euch! Warum Illusionen sinnvoll sind • Bilder im Kopf: Wie Metaphern beflügeln • Wahre Worte: Was Erklärungen sexy macht • Linguistik: Gedacht wie gesprochen • € 8,90



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



Elf Mythen über Burnout • Seelische Abwehrkraft • Wie Stress auf das Gehirn wirkt • Mäßigung im Arbeitsleben • Ins Erbgut eingebrannt • Was uns Mäuse über Depressionen lehren • € 8,90

Alle Hefte auch im Handel erhältlich!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

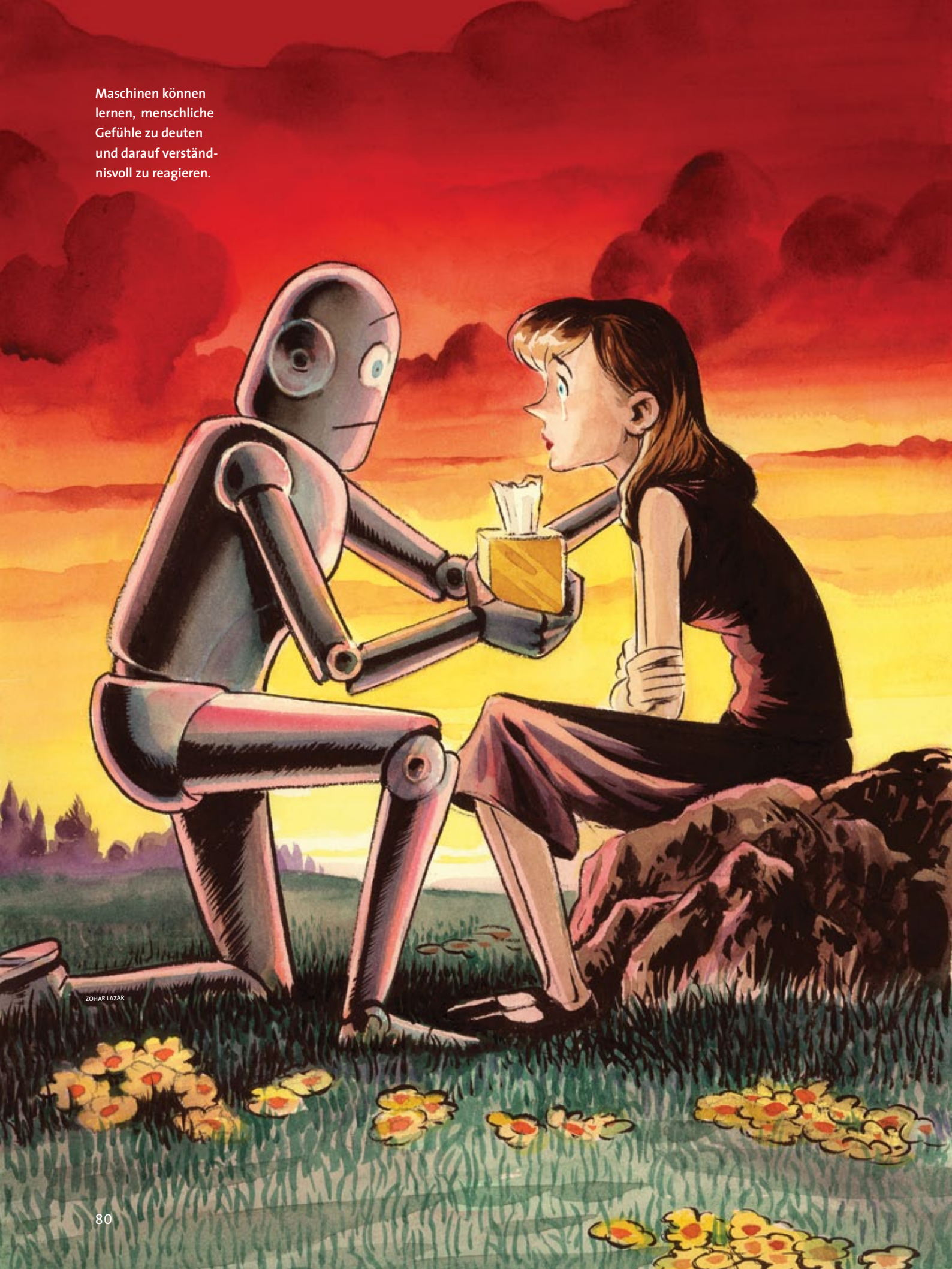
www.spektrum.de/neuerscheinungen

E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



Maschinen können lernen, menschliche Gefühle zu deuten und darauf verständnisvoll zu reagieren.



ZOHAR LAZAR

Roboter mit Gefühlen

Bald schon könnten uns Roboter aller Art ähnlich vertraut sein wie Smartphones und Tablets heute. Um uns das Kommunizieren mit »intelligenten« Maschinen zu erleichtern, bringen Forscher ihnen bei, menschliche Emotionen zu verstehen und zu simulieren.

Von Pascale Fung

Den ersten einfühlsamen Satz sprach eine Maschine vermutlich mit den Worten: »Leider habe ich Sie nicht verstanden.« Ende der 1990er Jahre bot das Bostoner Softwareunternehmen SpeechWorks International seinen Firmenkunden Programme an, die ein paar höfliche Phrasen gebrauchten. Seither haben wir uns angewöhnt, mit Maschinen zu reden. Fast jeder Anruf bei einer Kundendienststelle landet zunächst bei einem Roboter. Hunderte Millionen Menschen sind mit einem digitalen Mädchen für alles (englisch »intelligent personal assistant«) unterwegs. Man kann beispielsweise die Apple-Software Siri (Speech Interpretation and Recognition Interface) mündlich auffordern, ein Restaurant zu finden, einen Freund anzurufen oder ein bestimmtes Musikstück abzuspielen. Solche Programme können menschliches Verhalten oft geradezu unheimlich gut simulieren.

Aber nicht immer reagieren Maschinen wunschgemäß. Die Spracherkennungssoftware missversteht oft die Absicht der Frage; sie ist unempfindlich für Humor, Sarkasmus und Ironie. Wenn wir künftig routinemäßig mit intelligenten Staubsaugern oder menschenähnlichen Pflegekräften kommunizieren wollen, müssen die Roboter nicht bloß gesprochene Worte verstehen, sondern auch Emotionen – sie sollten Einfühlungsvermögen besitzen.

In meinem Labor an der Hong Kong University of Science and Technology entwickeln wir solche Maschinen. Einfühlsame Roboter werden freundliche Gefährten sein, die unsere physischen und emotionalen Bedürfnisse umso besser vorausahnen, je öfter sie mit uns kommunizieren. Sie werden sich für ihre Fehler entschuldigen und uns vor einer Aktion um Erlaubnis fragen. Sie werden nicht nur Senioren pflegen und Kinder unterrichten, sondern sich in kritischen Situationen sogar selbstlos opfern, um Leben zu retten.

AUF EINEN BLICK

COMPUTER MIT EMOTIONALER INTELLIGENZ

- 1 Je mehr wir uns angewöhnen, Maschinen mit Sprache und Gesten zu steuern, desto stärker wird der Wunsch, dass sie auch **Andeutungen** und **Gefühle** richtig auslegen.
- 2 Damit ein digitales Gerät Humor, Ironie oder Missstimmung versteht, muss es mit einem **Empathiemodul** ausgestattet werden. Eine entsprechende Software erkennt Emotionen an Gesichtsausdruck und Sprechverhalten des menschlichen Gegenübers.
- 3 Die Entwicklung einfühlsamer Roboter steckt noch in den Kinderschuhen, doch erste Prototypen verwenden bereits **lernfähige Algorithmen**, um menschliche Stimmungen und Emotionen immer treffsicherer zu deuten.

Einige Roboter mit simulierten Gefühlen sind schon auf dem Markt – zum Beispiel der kleine Android Pepper, den die französische Firma Aldebaran Robotics für das japanische Unternehmen Softbank Mobile gebaut hat. Oder Jibo, ein knapp drei Kilogramm schwerer persönlicher Assistent; diesen Roboter konstruierte ein Ingenieurteam um Roberto Pieraccini, der zuvor die Abteilung für Dialogtechnik bei SpeechWorks geleitet hatte. Die Entwicklung solcher Maschinen steckt zwar noch in den Kinderschuhen, aber das wird sich bald ändern.

Das Empathiemodul

Ich selbst begann mich für die Konstruktion empathischer Roboter 2009 zu interessieren, als mein Team das erste chinesische Gegenstück zu Siri entwarf. Mich faszinierte, wie selbstverständlich die Nutzer begannen, emotional auf intelligente Assistentensysteme zu reagieren – und wie ungeduldig sie wurden, wenn ihre Geräte sie nicht verstanden. Offen-



bar hängt der Erfolg von Spracherkennungsalgorithmen wie jenen ab, an denen ich im Lauf meiner 25-jährigen Laufbahn gearbeitet habe.

Jede intelligente Maschine ist im Grund ein Softwaresystem, das aus Modulen besteht – aus Programmen, die jeweils auf eine Aufgabe spezialisiert sind. Ein Modul übernimmt beispielsweise die akustische Sprachverarbeitung, ein anderes die visuelle Bilderkennung und so weiter. Ein einfühlsamer Roboter besitzt ein spezielles Empathiemodul. Es analysiert nicht nur den Inhalt des Gesprochenen, sondern auch die Prosodie – die Sprachmelodie – und die Miene des Sprechers, um eine Antwort zu finden, die zu den darin ausgedrückten Gefühlen passt.

Wenn zwei Menschen kommunizieren, nutzen sie automatisch gewisse Hinweise auf den emotionalen Zustand des Gegenübers. Sie deuten Gesichtszüge und Körpersprache, sie nehmen Änderungen der Stimmfarbe wahr, sie verstehen sprachliche Andeutungen. Beim Bau eines Empathiemoduls gilt es, zunächst diejenigen Charakteristika menschlicher Kommunikation herauszufinden, an denen ein Computer Gefühle zu erkennen vermag, und dann Algorithmen darauf zu trainieren, diese Charakteristika zu entdecken.

Um Maschinen den emotionalen Gehalt von Sprache zu erschließen, machten wir uns daran, ihnen die dem zu Grunde liegenden akustischen Regeln beizubringen, zusätzlich zu den Wortbedeutungen. Denn so funktioniert eben menschliche Kommunikation. Wenn wir fröhlich sind, sprechen wir schneller und mit höherer Stimme, unter Stress hingegen eintöniger und nüchterner. Mit intelligenter Signalverarbeitung vermag ein Computer solche akustischen Anzeichen zu entdecken – ähnlich wie ein Lügendetektor, der Stress physiologisch anhand von Blutdruck, Puls und elektrischer Leitfähigkeit der Haut misst. An meinem Institut, das die Studenten scherzhaft »Universität für Stress und Spannung« nennen, haben wir Lernalgorithmen gezielt darauf trainiert,

akustische Stresssymptome zu identifizieren. Zu diesem Zweck stellten wir den Studenten zwölf zunehmend stressende Fragen, nahmen ihre Antworten auf und sammelten auf diese Weise rund zehn Stunden natürlicher Stresssymptome in den Sprachen Englisch, Mandarin und Kantonesisch. Unsere lernfähigen Algorithmen konnten anhand dieses Materials schließlich in 70 Prozent aller Fälle Stress richtig erkennen – ähnlich gut wie menschliche Zuhörer.

Gespür für Zwischentöne

Unterdessen brachte ein anderes Team Maschinen bei, die Gefühlsstimmung eines Lieds nur anhand der Musik – ohne Beachtung des Textes – zu erkennen. Im Gegensatz zu einer vorübergehenden Emotion charakterisiert die Stimmung das gesamte Musikstück. Die beteiligten Forscher sammelten zunächst 5000 Lieder aller Art in den wichtigsten europäischen und asiatischen Sprachen. Musikexperten hatten zuvor einige hundert dieser Stücke in 14 Stimmungskategorien klassifiziert.

Wir bestimmten in jedem Lied elektronisch rund 1000 akustische Signaleigenschaften – Parameter wie Energie, Grundfrequenz und Harmonien – und trainierten mit der Musik 14 unterschiedliche, jeweils für eine spezielle Stimmung zuständige Programme, so genannte Klassifizierer. Zum Beispiel reagiert ein Klassifizierer nur auf fröhliche, ein anderer nur auf traurige Musik. Die 14 Programme arbeiten zusammen, indem jeder das Ergebnis der anderen berücksichtigt. Wenn ein »fröhlicher« Klassifizierer irrtümlich ein trauriges Lied fröhlich findet, wird er in der nächsten Lernrunde korrigiert. In jeder Runde lernt der jeweils schwächste Klassifizierer hinzu, und so wird das gesamte System klüger. Indem die Maschine vielen Musikstücken lauscht, lernt sie, welches Stück zu welcher Stimmung gehört, und kann mit der Zeit wie ein menschlicher Musikliebhaber durch bloßes Zuhören die Stimmung jedes Lieds angeben.

Auf Basis dieser Forschung haben frühere Studenten und ich die Firma Ivo Technologies gegründet, die empfindsamen Maschinen für den häuslichen Gebrauch entwickelt. Das erste Produkt namens Moodbox wird ein intelligentes Multimediale Gerät sein, das in jedem Zimmer Musik und Beleuchtung den Emotionen des Nutzers anpassen kann.

Um allerdings Humor, Sarkasmus, Ironie und andere komplexe Eigenschaften menschlicher Kommunikation zu verstehen, muss eine Maschine neben den rein akustischen Signalen auch verborgene emotionale Bedeutungen der Wörter und Sätze erkennen. Zunächst konnten wir für unsere Analyse auf bereits vorhandene Algorithmen zurückgreifen, die den Gefühlsgehalt von schriftlichen Onlinekommentaren erfassen. Solche Lernalgorithmen suchen im Text nach verräterischen Schlüsselwörtern wie »Sorge« oder »Furcht« und schließen daraus auf Einsamkeit. Wiederholter Gebrauch von Slangphrasen wie »c'mon« – etwa »los«, »mach schon« – verleiht wiederum Popsongs einen energiegeladen Charakter.

In unserem Bemühen, die Stimmung eines Liedes zu vermitteln, trainierten wir entsprechend die Algorithmen, nicht nur in der Musik, sondern auch im Text emotionale Hinweise aufzuspüren. Wir entnahmen dem Liedtext Wortketten – so genannte n-Gramme – und fütterten damit Textklassifizierer, die jeweils für eine der 14 Stimmungen zuständig sind. Die Wortketten markierten wir so, dass der Algorithmus sie als Teil des Liedtexts erkennt, den er klassifizieren soll. Computer können aus n-Grammen und Textteilmarkierungen statistische Näherungen für die grammatischen Regeln einer beliebigen Sprache bilden; mit diesen Regeln erkennen Programme wie Siri gesprochene Inhalte, und eine Software wie Google Translate übersetzt den Text in eine andere Sprache.

Verständnisvolle Roboter

Sobald eine Maschine den Inhalt versteht, kann sie ihn mit der Art und Weise vergleichen, in der er gesprochen wird: Antwortet jemand auf eine Frage sicher und deutlich oder zögernd, stockend und ausweichend? Sind die Antworten ausführlich und detailliert oder kurz angebunden? Wenn eine Person seufzt und sagt »Ich bin ja so froh, dass ich am Wochenende arbeiten muss«, dann entdeckt der Algorithmus den Widerspruch zwischen Emotion und Inhalt und rechnet die Wahrscheinlichkeit dafür aus, dass der Satz ironisch gemeint ist.

Außerdem kann die Maschine durch Vergleich des Gesprochenen mit anderen Informationen komplexere Absichten entdecken. Wenn jemand sagt »Ich habe Hunger«, ermittelt der Roboter die beste Antwort, indem er unter anderem Ort, Tageszeit und frühere Vorlieben des Nutzers berücksichtigt. Sind die beiden zur Mittagszeit daheim, könnte der Roboter antworten: »Soll ich dir ein Sandwich machen?« Wenn Roboter und Nutzer gerade unterwegs sind, fragt die Maschine vielleicht: »Soll ich ein Restaurant suchen?«

Anfang 2015 kombinierten Forscher in meinem Labor alle diese Module für Spracherkennung und Einfühlung, um einen Prototyp zu schaffen, den wir Zara nennen. Das Lernma-

terial für Zaras Training umfasste hunderte Stunden akustischer Daten, aber heute läuft das Programm auf einem einzigen Desktop-Computer. Zara ist derzeit ein virtueller Roboter, der als Comicfigur auf dem Bildschirm agiert.

Wenn man eine Unterhaltung mit Zara beginnt, sagt sie: »Bitte warte, während ich dein Gesicht analysiere.« Zaras Algorithmen bestimmen mit Hilfe der Computerkamera Geschlecht und ethnische Zugehörigkeit des Gesprächspartners. Dann testet sie, welche Sprache er spricht – Zara versteht Englisch, Mandarin und ein wenig Französisch – und stellt ein paar Fragen und Aufgaben: »Was ist deine früheste Erinnerung?«, »Erzähl mir von deiner Mutter!«, »Wie war dein letzter Urlaub?«, »Erzähl mir eine Geschichte mit einer Frau, einem Hund und einem Baum!« Auf Grund des Gesichtsausdrucks des Gegenübers, seiner Stimmeigenschaften und des Inhalts der Antworten lernt Zara, sich auf eine Weise zu unterhalten, die Empathie imitiert. Nach fünf Minuten Zwiesprache versucht Zara dann, die Persönlichkeit des Gesprächspartners zu erraten und fragt ihn, was er von empfindsamen Maschinen hält. Auf diese Weise sammeln wir Informationen über die Interaktion zwischen Menschen und Frühformen empathischer Roboter.

Zara ist ein Prototyp, doch da sie auf Lernalgorithmen beruht, wird sie mit jedem Gespräch klüger und empfindsamer. Gegenwärtig beruht ihre Datenbasis nur auf Ergebnissen aus Interaktionen mit Studenten meines Labors. Demnächst soll Zara einen Körper bekommen, indem wir sie in einem menschenähnlichen Roboter installieren.

Natürlich liegt das Zeitalter freundlicher Roboter noch in weiter Ferne. Wir entwickeln gerade erst die primitivsten Voraussetzungen für Maschinen mit emotionaler Intelligenz. Aber auch von Zaras verbesserten Nachkommen sollten wir keine Perfektion erwarten. Ich halte das gar nicht für erstrebenswert. Wichtig ist, dass unsere Maschinen den Menschen ähnlicher werden – und die sind bekanntlich nicht vollkommen. ~

DIE AUTORIN



Pascale Fung ist Professorin für Elektronik und Computertechnik an der Hong Kong University of Science and Technology. Als Spezialistin für Mensch-Maschine-Kommunikation wurde sie zum Mitglied des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sowie der International Speech Communication Association (ISCA) gewählt.

QUELLEN

Su, D. et al.: Multimodal Music Emotion Classification using AdaBoost with Decision Stumps. In: 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2013), Vancouver, Mai 2013

Zuo, X. et al.: A Multilingual Database of Natural Stress Emotion. In: Eighth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2012), Istanbul, Mai 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1382049

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

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



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

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



1916

Das Kreuz mit der Intelligenz

»Nicht mit der Herkunft der Schädel wollen wir uns beschäftigen, sondern die überraschende und in ihrer Vollkommenheit seltene Aus-

bildung der Naht am Stirnbein soll bekannt gemacht werden. Mit der zwischen Stirnbein und Scheitelbein verlaufenden Naht bildet die Stirnnaht ein Kreuz. Der Volksglaube hält die Kreuznaht für ein Zeichen besonderer geistiger Fähigkeiten. Zur Ehre der deutschen Nation behauptet Welcker, daß an ihren Köpfen die Stirnnaht am häufigsten vorkomme. Mich will es aber dün-

ken, daß diese Häufigkeit weniger in der geistigen Begabung als in dem Umstande begründet ist, daß man in den deutschen Museen die Schädel mit den Stirnnahten aufbewahrt, während man von Schädeln ohne Stirnnahten nur so viele behält, als man eben braucht.« Kosmos 3, 1916, S. 48–50

Menschlicher Schädel mit Kreuznaht.



Die Ameise als Wasserratte

»Bisher war man der Meinung, daß diese Baumeister sich nur an das trockene Land halten. Da kommt die Kunde überraschend, daß man Ameisen gefunden hat, die die Feuchtigkeit suchen. W. Bönner fand auf einem schwer zugänglichen Moore eine Art, welche sich aus den Blättern des Torfmooses kleine Hügel erbaut und den Verkehr mit dem festen Land zu meiden scheint. Die Ameisen zeigten sich als schlanke kleine Geschöpfe von der Farbe altgewordenen Torfspeckes, sie glänzten wie eingeölt und waren stellenweise mit weißen, seidig schimmernden Haaren bedeckt, zwischen denen sich goldgelbe Borsten erhoben.« Prometheus 1371, 1916, S. 304

Jetzt knallt's!

»Eine während des gegenwärtigen Krieges vielfach bemerkte Erscheinung besteht in der Verdoppelung des Knalles von Gewehr- und Kanonenschüssen. Dies beruht, wie Agnes ausführt, darauf, daß die modernen Geschosse eine größere Geschwindigkeit als der Schall besitzen. Das Geschosß zieht auf seiner Bahn durch die Luft eine Erschütterungswelle mit sich, welche nahezu die Gestalt eines Kegels besitzt. Diese gelangt zuerst zum Ohr des Beobachters und darauf erst die Schallwelle, welche von der Mündung des Gewehrs oder des Geschützes ausgeht. So kommen zwei Schallempfindungen nacheinander zur Wirkung.« Die Umschau 6, 1916, S. 116

Energie aus Granit

»Während sich die Menschheit Sorgen wegen der früher oder später unvermeidlichen Erschöpfung der Kohlen- und Oelvorräte der Erde macht, glauben amerikanische Forscher eine neue

Quelle gefunden zu haben. Dr. William F. Libby von der Kommission für Atomenergie erklärte, die jüngsten Forschungen liessen erhoffen, dass der allenthalben in reichen Mengen vorhandene

Granit die Energiequelle der Zukunft sein werde. Durch eine Methode der Atomspaltung könne der Granit eine Heizkraft entwickeln, die etwa den fünfzigfachen Wert einer gleichen Gewichts-

1966

menge Kohle besitze.« Neuheiten und Erfindungen 356, 1966, S. 15

Von hinten betrachtet

»Nachdem von ›Lunik 3‹ 1959 erstmals Teile der Rückseite des Mondes aufgenommen worden waren, hat der sowjetische Raumflugkörper ›Sonde 3‹ weitere 5 Millionen km² fotografiert. Die Lunik-Photos bewiesen, daß die ›Rückseite‹ des Erdtrabanten von der ›Vorderseite‹ nicht grundsätzlich verschieden ist. Die Sonde-Bilder ergänzen das Bild über den Westrand hinaus. Man erkennt eine Fülle von Kratern verschiedener Größenordnungen, alle zeigen die gleichen Formen, wie von der Vorderseite bekannt.« Kosmos 2, 1966, S. 38–41



Die erste veröffentlichte Aufnahme der Mondrückseite.

Der richtige Riecher

»Das Geruchsvermögen des Fuchses gestattet ihm, seine Beute zu vergraben und nach längerer Zeit wieder aufzuspüren. Dabei riecht er eingesandete Vögel oder Kaninchen etwa 10 m, Eier maximal 3 m gegen den Wind. In den Dünen von Revenglass wurden von einem Forscherteam in Abständen von 10 m hundert nahezu frische Hühnereier eingegraben und dazu ebensoviel ›Scheinverstecke‹ angelegt, in denen keine Eier lagen. Einen Monat später gruben zwei Füchse acht Verstecke aus, rührten jedoch kein einziges Scheinversteck an. Zum Vergleich konnten Igel beobachtet werden, die im gleichen Zeitraum 12 Eier ausgegraben hatten. Ihr Geruchsvermögen war aber geringer; sie konnten die Eier höchstens aus 50 cm Entfernung aufspüren.« Die Umschau 3, 1966, S. 95



Armin Eich

Die Söhne des Mars**Eine Geschichte des Krieges von der Steinzeit bis zum Ende der Antike**

C.H.Beck, München 2015

281 S., € 24,95

GESCHICHTE

Krieger-Gene gibt es nicht

Eine historische Aufarbeitung militärischer Auseinandersetzungen belegt: Krieg als soziales Verhalten entstand erst relativ spät.

Für den englischen Philosophen und Staatstheoretiker Thomas Hobbes (1588–1679) war unsere Entwicklung von Anfang an ein »Krieg aller gegen alle«, in dem »der Mensch ... dem Menschen ein Wolf (ist)«. Diese Ansicht teilt Althistoriker Armin Eich im vorliegenden Buch nicht. Schlachtenschilderungen oder Studien über große Feldherren sucht man in seinem Werk vergebens. Eich, der an der Bergischen Universität Wuppertal lehrt, geht es vielmehr darum, »die Umstände und Dynamik nachzuvollziehen, die im

mit Waffen ausgetragene kollektive Gewaltanwendung zwischen Staaten beziehungsweise zwischen sozialen Gruppen.

Nach Eichs Definition gibt es für die frühen Jahrtausende keine Nachweise für »regelrechte Kriege«. Dennoch stelle diese Ära – vor allem die Bronzezeit (2200–800 v. Chr.) – eine wichtige Vorlaufphase dar, in der sich die entfesselte Gewalt späterer Zeiten sowohl ökonomisch als auch technologisch anbahnte. In der Antike dann wurde der Krieg zum »Vater aller Dinge« und dominier-

Die ältesten Belege für eine Schlacht in Mitteleuropa datieren dem Autor zufolge auf 1300 bis 1250 v. Chr. Damals kämpften im Tollensetal offenbar hunderte Menschen gegeneinander

Laufe einiger Jahrtausende den Krieg zu einem den Alltag der Menschen dominierenden Phänomen machten«.

Der Autor geht von der These aus, dass Krieg nicht etwa der menschlichen Natur genuin innewohnt, sondern historisch erst relativ spät als soziales Verhalten entstand. Vor diesem Hintergrund untersucht er verschiedene Formen menschlicher Gewalt vom Neolithikum bis in die Spätantike (6. Jahrtausend v. Chr. – 1. Jahrtausend n. Chr.). Dabei unterscheidet er zwischen spontaner Aggressivität in prähistorischen Gesellschaften und geplantem Krieg in den Staaten der klassischen Antike. Letzteren versteht er als organisierte,

te alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens.

Fundiert erläutert der Autor die einschlägigen Forschungsergebnisse, beschreibt die Auswirkungen verbesserter Waffentechnik und Strategie in der Bronzezeit. Dabei spürt er jenen Triebkräften nach, die die Entwicklung militärischer Gewalt wesentlich vorantreiben und die kriegerische Dynamik forcierten.

Die ältesten Belege für eine Schlacht in Mitteleuropa datiert er auf 1300 bis 1250 v. Chr.: Im Tollensetal in Mecklenburg-Vorpommern (Landkreis Demmin) haben Archäologen die Knochen hunderter Personen gefunden, die

Spuren von Hieb- und Stichwaffen aufweisen. An ihnen sind Verletzungen erkennbar, die von Pfeilspitzen aus Bronze oder Feuerstein herrühren; zudem tauchten Reste von Keulen, Lanzen und Schwertern auf. Die Überbleibsel mehrerer Pferde belegen, dass einige Kontrahenten beritten waren.

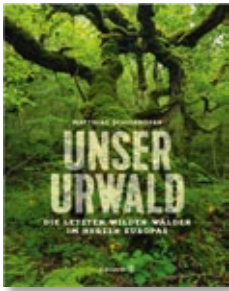
Scharfsinnig und kompetent untersucht Eich die Zusammenhänge zwischen dem sich entwickelnden Rohstoffhandel, der frühen Staatlichkeit und der Monetarisierung des Kriegsgeschehens in klassischer Zeit. Er zeigt Ursachen für die intensiver werdende Gewalt in den militaristischen Staaten der Antike auf und erläutert am Beispiel unterschiedlicher Arten zu kämpfen die zunehmende Professionalisierung des Krieges.

Von den Streitwagenarmeen der späten Bronzezeit geht der Autor auf die schwerbewaffnete, kompakte Hoplitaphalanx über – eine Schlachtformation, die seit dem 6. Jahrhundert v. Chr. überall in der griechischen Poliswelt dominierte. Eine kriegstaktische Neuerung war der »dynamisierte Infanteriekrieg in nachklassischer Zeit«, Mitte des 4. Jahrhunderts v. Chr. erstmals unter dem Makedonenkönig Philipp II. praktiziert. Er zeichnete sich durch kombinierten Einsatz verschiedener Waffengattungen aus. Noch mehr Schlagkraft und Disziplin erreichten die Römer im 2. Jahrhundert v. Chr., indem sie flexible Kampfverbände (Manipel) innerhalb von Legionen einführten (Manipulartaktik) und Torsionsgeschütze wie Belagerungsmaschinen einsetzten. Schließlich befasst sich der Autor mit den traumatisierenden Verhältnissen eines dauerhaften, entgrenzten Kriegszustands, der organisierte Gewalt in der Antike zu einem ausweglosen Schicksal machte.

In einer Zeit, in der laut Stockholmer Friedensforschungsinstitut SIPRI weltweit Kriege und militärische Aufrüstung zunehmen, ist Eichs spannendes Buch, das auf der Höhe der wissenschaftlichen Forschung steht, hochaktuell.

Theodor Kissel

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



Matthias Schickhofer

Unser Urwald

Die letzten wilden Wälder im Herzen Europas

Brandstätter, Wien 2015

208 S., € 34,90

ÖKOLOGIE

Botschafter einer alten Welt

Naturfotograf Matthias Schickhofer lädt in diesem Band zu einer bildgewaltigen Rundreise durch die letzten europäischen Urwälder.

Vor rund 12000 Jahren verbreitete sich der sesshafte Lebensstil. Damit begann die Geschichte der großen Kahlschläge des Landes, und damit beginnt auch das vorliegende Buch. Der Umweltschützer und Naturfotograf Matthias Schickhofer nimmt seine Leser mit auf eine Zeitrafferreise durch die Geschichte der europäischen Wälder. Über Pioniergehölze wie Birke,

Kiefer, Ulme und Erle tastet er sich an den natürlichen Eichenmischwald heran und kommt schließlich auf den »neuen Wald« zu sprechen, womit er den allgegenwärtigen Nadelbaumforst meint. Der ist, anders als die hiesigen

Ein Urwaldrelikt in Hessen, im Nationalpark Kellerwald-Edersee. Steilhänge haben manche Buchen- und Eichenwälder davor bewahrt, gerodet zu werden.

Urwälder, von Instabilität geprägt: Borkenkäferplagen und Stürme verursachen in ihm verheerende Schäden, und zwar mit zunehmender Häufigkeit.

Dass diese Entwicklung keine gute ist, darauf kommt Schickhofer schon früh zu sprechen und positioniert sich damit politisch und wirtschaftskritisch. Er warnt vor dem »Biomasseboom«, der gefährliche Kippeffekte in der Erderwärmung auslösen könne, und führt illegale Rodungen in den letzten Urwäldern Mittelosteuropas, vor allem in Rumänien und der Westukraine, auf Korruption zurück.

Schickhofer macht anhand von Zahlen und Fakten deutlich, dass der Schutz der europäischen Urwälder stärker in den Fokus rücken sollte. Seine Erörterungen sind aufschlussreich, sieht man einmal davon ab, dass weltweit zwischen 2000 und 2013 natürlich nicht »ganze 230 Millionen Quadratkilometer an Wald« ausgelöscht worden sind, wie



MATTHIAS SCHICKHOEFER, AUS: MATTHIAS SCHICKHOEFER, UNSER URWALD, MIT FRIEDLICHEN DES BRANDSTÄTTERVERTRAGS, WIEN



Paul D. Taylor, Aaron O'Dea

Die Geschichte des Lebens in 100 Fossilien

Aus dem Englischen von Gudrun Kräbs

Theiss, Darmstadt 2015. 224 S., € 39,95

Die Paläontologen Paul D. Taylor und Aaron O'Dea stellen ihre persönliche Auswahl der bedeutendsten Fossilien vor. Anhand von 100 Zeugnissen der Erdgeschichte zeigen sie, wie sich Mikroben, Pflanzen, Tiere und Pilze entwickelt haben, während die Umwelt immer wieder massive Veränderungen erfuhr. Das Buch führt den Leser gut verständlich durch mehrere Milliarden Jahre Lebensgeschichte und überspannt das Spektrum von den ersten Mikroorganismen bis zu unseren vermutlichen Vorfahren. Jedem Fossil widmen die Autoren eine Doppelseite, auf der sie beeindruckende Fotos und erklärenden Text präsentieren. Manche Aufnahmen sind wunderschön und bezaubernd, andere bizarr bis grotesk; die optische Gestaltung aber bleibt in jedem Fall klar und modern. Ein spannendes Werk für alle, die sich für die Entwicklung des Lebens interessieren – auch wenn sie nur über wenig Vorwissen verfügen.

FRANZISKA MÜSCHENICH



Kultur- und Stadthistorisches Museum Duisburg, Mercator-Gesellschaft (Hg.)

Häuser der Weisheit – Wissenschaft im Goldenen Zeitalter des Islam

Nünnerich-Asmus, Mainz 2015. 80 S., € 17,90

Die (Universal-)Gelehrten im »goldenen Zeitalter des Islam« (750–1258) nahmen Wissen aus unterschiedlichsten Kulturen und Epochen auf und entwickelten es weiter. Dabei entstand eine Wissenschaft, die nicht nur den islamischen Kulturkreis, sondern auch Europa prägte. Die Autoren bieten einen umfassenden Blick auf diese faszinierende Zeit und lassen eine hier zu Lande weit gehend unbekannte Wissenschaftstradition lebendig werden. Dabei befassen sie sich mit den Gebieten der Astronomie, Geografie, Numismatik, Chemie, Mathematik, Alchemie und Astrologie. Zahlreiche ansprechende Bilder machen das Buch lebendig. Das Werk ist nicht nur für wissenschaftshistorisch, sondern auch für religionshistorisch Interessierte lesenswert, indem es das reiche kulturelle Erbe der islamischen Welt beleuchtet.

CHRISTIAN HELLMANN



Leopold Mathelitsch, Sigrid Thaller

Physik des Sports

Wiley-VCH, Weinheim 2015. 198 S., € 24,90

Welche Kraft wirkt auf einen Turner beim Felgumschwung oder auf einen Skispringer beim Verlassen der Schanze? Warum versuchen Ballsportler, ihren Schüssen oder Würfeln einen Drehimpuls zu verleihen? Über solche Fragen haben die Sportwissenschaftlerin Sigrid Thaller und der Physiker und Didaktiker Leopold Mathelitsch zwischen 2006 und 2015 immer wieder Artikel in der Zeitschrift »Physik in unserer Zeit« veröffentlicht. Im vorliegenden Buch haben sie diese zusammengetragen und überarbeitet. Entstanden ist ein gelungenes Sachbuch. Die Texte richten sich nicht an Laien, sondern an Sportinteressierte mit solider Vorbildung in Physik. Sportliche Themen werden detailliert betrachtet und sowohl physikalisch berechnet als auch aus Perspektive der Sportwissenschaft behandelt. Wem das noch nicht ausreicht, der findet zusätzlich Literaturverweise zu Fachpublikationen.

KATRIN HOCHBERG



Florian Werner

Schnecken. Ein Portrait

Matthes & Seitz, Berlin 2015. 151 S., € 18,-

Ihr Name lässt anderes vermuten, aber die Zahnlose Schließmundschnecke (*Balea perversa*) ist ein recht hübsches Tier. Porträts von ihr und vielen anderen Weichtieren finden sich im neuen Band der bibliophilen Buchreihe »Naturkunden«. Der Literaturwissenschaftler Florian Werner schreibt darin kurzweilig über die große Klasse der Schnecken, die mit bewundernswerter Beständigkeit mehrere Massenaussterben überlebte und schon länger existiert als die Faltengebirge dieser Erde. Das Büchlein, fein und farbig bebildert, bietet süffigen Feuilletonstil und gut dosierte biologische Fakten. Man erfährt, dass Schnecken unterschiedlichen Schleim produzieren, je nachdem, ob sie gleiten oder haften möchten. Man liest, warum sie sich beim Liebesspiel Kalkpfeile in den Körper rammen. Und man lernt, dass sie die moderne Architektur stärker beeinflussten als alle anderen Tiere.

ILONA JERGER

es im Buch heißt. Da die gesamte Landfläche der Erde nur rund 150 Millionen Quadratkilometer beträgt, kann der Autor hier nur Hektar meinen, wie auch der weitere Kontext vermuten lässt.

Fest steht, dass mit dem Waldschwund zahllose Tier- und Pflanzenarten verloren gehen. Schickhofer möchte darauf aufmerksam machen und spricht die Probleme an, ohne jedoch allzu sehr in die Tiefe zu gehen. Stattdessen versucht er die Leser emotional abzuholen. Seine fantastischen Fotos zeigen märchenhafte Waldwelten, die faszinieren, neugierig machen und Sehnsüchte auslösen. Der Autor fördert das, indem er in seinen Texten beinahe poetische Töne anschlägt: »Im Wald wachsen riesenhafte Buchen über grünen Hallen, in Auslichtungen wachsen die jungen Buchen um die Wette.«

Immer wieder sind Fakten eingestreut wie wissenschaftliche Namen, Bestandszahlen, Hektarangaben und Auszüge aus Studien. Besonders reiz-

voll ist, dass der Autor klar benennt, wo heute noch Rotbuchen-, Fichten- und andere Wälder in weit gehend urwüchsiger Form zu finden sind. Wenn er davon berichtet, was er an diesen Orten erlebte, nimmt das mitunter reportage-

In Urwäldern gibt es nicht nur Baumriesen zu sehen, sondern auch andere wenig vertraute Organismen: Leberblümchen, Zunderschwämme, Feuersalamander oder Tausendfüßer

ähnlichen Charakter an. Schickhofer präsentiert Links zu Internetseiten, auf denen man mehr über die europäischen Urwälder erfährt. Er hat dort nicht nur Baumriesen abgelichtet, sondern auch eher unscheinbare Organismen, die kaum noch jemand aus direkter Anschauung kennt: Leberblümchen, Zunderschwämme, Feuersalamander oder Tausendfüßer.

In dem hochwertig verarbeiteten Buch lösen sich Texte und Bilder in dichter Folge ab. Die Sprache ist für je-

den verständlich und nicht mit Fakten überladen. Hier und da wünscht man sich mehr Ausführlichkeit; manchen Orten widmet der Autor nur eine Drittelseite. Dennoch bietet das Werk eine sinnlich anregende und erfreuende

Lektüre. Wen beim Lesen die Abenteuerlust packt, der findet im Kapitel »Verwünschte Wege« viele Reiseziele, -tipps und Adressen für eigene Expeditionen, zum Beispiel in den Uholka-Urwald der Ukraine. Ein lohnendes und farbenfrohes Werk, das Einblicke in die letzten Wildnisgebiete Europas gewährt.

Rosana Erhart

Die Rezensentin ist Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



Arnold van de Laar

Schnitt!

Die ganze Geschichte der Chirurgie erzählt in 28 Operationen

Aus dem Niederländischen von Bärbel Jänicke

Pattloch, München 2015

432 S., € 19,99

MEDIZIN

Vom Öffnen des Körpers

Ein Chirurg erklärt, wie sich sein Fach über Jahrhunderte hinweg verändert hat – Schnitt für Schnitt.

Der niederländische Chirurg Arnold van de Laar beschreibt im vorliegenden Buch seine Profession. Das tut er sehr anschaulich, so dass man während des Lesens das Gefühl bekommt, im Operationssaal dabei zu sein. Auch schildert er, wie seine Kollegen in vergangenen Jahrhunderten ihren Beruf ausübten. Angesichts seiner plasti-

schen Erzählweise macht sich ein seltsames Gefühl in der Magengegend breit, wenn er zum Besten gibt, wie Chirurgen früher Beine amputierten: Mit Schlachtermesser und Schaber – und ohne Narkose. Zum Glück sind solche Szenen in modernen Operationssälen unvorstellbar. Wie sich die blutigen »Massaker« von einst zur minuziösen

Präzisionschirurgie von heute entwickelt haben, stellt van de Laar im Zeitraffer dar.

Im Mittelalter gehörten Chirurgen noch in dieselbe Gilde wie Haarschneider, Schlittschuh- und Holzschuhmacher. Heute zählen sie zwar zu den angesehensten Berufsgruppen, doch Handwerker sind sie immer noch: Die Geschicklichkeit ihrer Hände entscheidet über Leben und Tod der Patienten.

Komme es bei einer OP zu Komplikationen, sei der behandelnde Chirurg durch das moderne Medizinrecht geschützt, schreibt van de Laar. Zumindest so lange, wie er seiner »Bemühungspflichtung« hinreichend nachgekommen sei. Vor rund 4000 Jahren dagegen galten in Babylonien die Gesetze des Hammurabi, laut denen die Arbeit des Chirurgen als ergebnisorientiert galt: Er unterlag dem Prinzip »Auge um Auge, Zahn um Zahn«. Das konnte für ihn schnell lebensgefährlich werden.

Nach einer langen, von vielen Rückfällen geprägten Entwicklung in Antike, Mittelalter und früher Neuzeit führte

man im 19. Jahrhundert die Narkose ein und erkannte die Bedeutung der Hygiene. Neue Methoden wie die Endoskopie setzten sich durch. Mit der Zeit konnten Chirurgen so mehr und mehr Menschen retten. Die Geschichten einzelner Patienten – ob Berühmtheiten oder »einfache« Bürger – nehmen einen großen Teil des Buchs ein. Van de Laars detaillierte Beschreibungen der Verletzungen und ihrer jeweiligen chirurgischen Behandlung sind teils skurril, teils überraschend und manchmal erschreckend, zumindest wenn man als Leser über ausreichend Fantasie verfügt, sich in die Patienten von damals hineinzusetzen.

Das Buch besticht durch eine spannende Mischung aus medizinischem

Fachwissen, historischen Fakten und Anekdoten. Es ist lehrreich, unterhaltend und hochspannend zugleich. Einzelne Fremdwörter erklärt der Autor in separaten Textboxen, ebenso wie weitere wissenswerte Informationen, die zum Verständnis des Texts beitragen. Ein ausführliches Glossar enthält alle verwendeten Fachausdrücke.

»Schnitt!« entpuppt sich als Gewinn für alle am Thema Interessierten. Nicht zuletzt deshalb, weil es viele medizinische Rätsel auflöst: Wieso wies John F. Kennedys Leiche bei zwei Durchschüssen nur drei Schusswunden auf? Weshalb schaffte es Kaiserin Sissi, ihr Schiff nach Montreux rechtzeitig zu erreichen, obwohl ihr eine Feile ins Herz gestoßen wurde? Warum stand der ange-

schossene Papst Johannes Paul II. bei seiner Bauchoperation buchstäblich Kopf?

Die »Top 10« fiktiver Chirurgen schließt den gelungenen Band ab. Darunter sind Viktor Frankenstein, Dr. Leonard »Pille« McCoy sowie Ash, der Wissenschaftsoffizier an Bord des Raumschiffs Nostromo in Ridley Scotts »Alien«. Mit Blick auf die Sciencefiction und ihre abgehobenen Visionen für die Medizin verspricht van de Laar, dass niemals ein Roboter den Chirurgen ersetzen könne. Ein beruhigendes Fazit.

Franziska Müschenich

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



Adalbert W. A. Pauldrach

Das dunkle Universum

*Der Wettstreit Dunkler Materie und Dunkler Energie:
Ist das Universum zum Sterben geboren?*

Springer Spektrum, Berlin 2015

527 S., € 29,99

KOSMOLOGIE

Eine eigenwillige Darstellung der modernen Astrophysik

Das Universum besteht zum Großteil aus zwei »dunklen« Komponenten, deren Wesen noch ungeklärt ist. Dennoch sind sie aus der modernen Kosmologie nicht wegzudenken.

Ende der 1990er Jahre machten Astronomen eine Entdeckung, die unser Bild des Universums radikal verändert hat: Die scheinbare Helligkeit weit entfernter Supernovae des Typs 1a ist geringer, als sie eigentlich sein sollte. Da die absolute Helligkeit dieser Himmelsobjekte so genau bekannt ist, dass sie als »Standardkerzen« zur astronomischen Entfernungsbestimmung dienen, konnte das nur bedeuten, dass man ihre tatsächliche Entfernung un-

terschätzt hatte. Daraus wiederum folgt: Das Universum dehnt sich schneller aus als angenommen – die kosmische Expansion verläuft beschleunigt.

Der Grund dafür ist nicht bekannt und hat den Namen »Dunkle Energie« bekommen. Sie macht zusammen mit der seit den 1930er Jahren postulierten »Dunklen Materie«, welche sich nur durch ihre Schwerkraft verrät, den größten Teil des Universums aus. Im vorliegenden Buch liefert der Astro-

physikprofessor Adalbert Pauldrach, der an der Ludwig-Maximilians-Universität München wirkt, eine gründliche Darstellung des derzeitigen Wissens über die »dunklen« Kräfte – und wagt am Ende eine kühne Hypothese über deren Wesen.

Sehr ergiebig ist Pauldrachs detaillierte Erklärung, inwieweit sich Supernovae 1a als Standardkerzen eignen, denn davon hängt ja der Nachweis der beschleunigten Expansion ab. Hier spricht ein Fachmann, und der interessierte Leser lernt Details kennen, über die populäre Bücher sonst gern hinweggehen.

Eine große Rolle für Pauldrachs Erklärung der »dunklen« Bestandteile des Kosmos spielt der Begriff des negativen Drucks. Kosmologen nennen einwärts wirkenden Druck positiv – zum Beispiel den der Atmosphäre, welcher durch das Gewicht der Lufthülle auf irdische Objekte ausgeübt wird. Die Definition verwirrt auf den ersten Blick, da wir im Alltag Luftballons aufblasen oder den Reifendruck messen und darum Druck normalerweise als auswärts wirkenden (Gegen-)Druck erleben.

Indem die Gravitation alle Massen zusammenzieht, übt sie also einen positiv nach innen wirkenden Druck aus, der im kosmologischen Maßstab be-

strebt ist, die Expansion des Weltalls zu bremsen. Wenn das Universum nun beschleunigt expandiert, wie es die Beobachtungen nahelegen, entspricht der dafür verantwortlich gemachten Dunklen Energie ein negativer Druck.

Pauldrach mutmaßt, der negative Druck der Dunklen Energie habe etwas mit Anti-Higgs-Teilchen zu tun

Die große Frage ist: Woher stammt er? Als hypothetische Antwort greift Pauldrach eine Vermutung auf, die Geraldine Servant von der Universität Autonoma de Barcelona (Spanien) und Sean Tulin von der University of York (England) eigentlich zur Beantwortung eines ganz anderen Problems vorgeschlagen haben. Ihnen ging es um die Dunkle Materie, die sie mit dem Zusammenspiel der kürzlich nachgewiesenen Higgs-Teilchen und deren – vorderhand rein hypothetischen – Antiteilchen erklären. Pauldrach mutmaßt nun, auch der negative Druck der Dunklen Energie habe etwas mit diesen Anti-Higgs-Teilchen zu tun. Er vertritt seine Ansicht gegen Ende des Buchs mit solchem

Nachdruck, dass der Verlag in einer Vorbemerkung eigens auf ihren rein hypothetischen Charakter hinweist.

Insgesamt hinterlässt Pauldrachs Werk einen zwiespältigen Eindruck. Auf jeder Seite vermittelt der Autor große

Begeisterung für die moderne Kosmologie und versorgt vorgebildete Leser, die bereits einschlägige populäre Darstellungen kennen, mit interessanten, auch optisch hervorragend aufbereiteten Details. Doch oft tut er des Guten zu viel, wenn seine Begeisterung zu einer Inflation von Ausrufezeichen, tollkühnen Vergleichen und unnötigen Wiederholungen ausufert. Ob seine Überzeugung zutrifft, dass sowohl Dunkle Materie als auch Dunkle Energie auf Higgs- und Anti-Higgs-Teilchen beruhen, muss die Zukunft zeigen.

Michael Springer

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



Andreas Wagner

Arrival of the Fittest

Wie das Neue in die Welt kommt. Über das größte Rätsel der Evolution

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel

S. Fischer, Frankfurt 2015

416 S., € 24,99

BIOLOGIE

Die verborgene Architektur des Lebens

Was ist das Geheimnis evolutionärer Neuerungen?

Ob die Entstehung des Neuen »das größte Rätsel der Evolution« ist, wie es im Untertitel des Buchs heißt, sei dahingestellt. Es gibt noch andere, ebenfalls nicht kleine Rätsel der Evolu-

tion, etwa wie sich die ersten Lebensformen, das Bewusstsein oder der Mensch herausbildeten. Das sind zwar ebenfalls Neuerungen, die aber jeweils mit dem Auftauchen neuer Kategorien einher-

SPEKTRUM SAMMELKASSETTE



Die Sammelkassette aus schwarzem Kunststoff bietet Platz für 12 bis 15 Hefte. Sie können darin alle Ihre *Spektrum-der-Wissenschaft*-Hefte und -Sonderhefte aufbewahren. Die Sammelkassette kostet € 9,50.

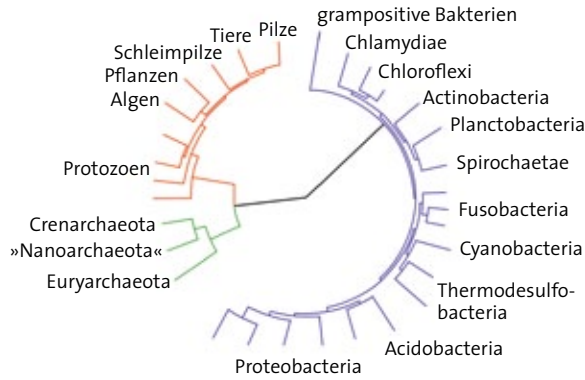
So erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/sammeln

E-Mail: service@spektrum.de

Ein möglicher Stammbaum des Lebens, erstellt auf Basis von Genomsequenzen. Er zeigt, wie die heutigen Lebensformen während der Evolution aus ursprünglichen Organismen hervorgegangen sein könnten.



gingen. Dies zu erklären, zieht der Autor Andreas Wagner, Evolutionsbiologe an der Universität Zürich, erst gar nicht in Erwägung.

Die von Wagner untersuchten Innovationen betreffen ausschließlich den molekularen Bereich. Ein wenig übereifrig wirkt daher die Formulierung im Klappentext, der Autor würde »den letzten Baustein der Darwinschen Theorie« präsentieren. Schön wärs, wird da wohl mancher Biologe denken! Davon unbenommen stellt die Wandlungsfähigkeit des Lebens, das seit Jahrmilliarden ständig neue Strukturen, Formen und Eigenschaften hervorbringt, tatsächlich ein großes Mysterium dar. Diesem widmet sich der Autor auf gut 400 nicht immer leicht zu lesenden Seiten.

Wagner kritisiert, die Biologie habe ihren Fokus bisher zu sehr darauf gelegt, Genotypen zu untersuchen, und darüber die Phänotypen vernachlässigt. »Wenn wir die Innovationsfähigkeit verstehen wollen, dürfen wir die Komplexität der Phänotypen nicht außer Acht lassen (...).« Zugleich ist er sich der Tatsache bewusst, dass »die Zusammenhänge zwischen Genotyp und Phänotyp ... so kompliziert (sind), dass es unser Vorstellungsvermögen überschreitet.«

Folgt man dem Autor, muss man Aufbau und Wirkung der Moleküle innerhalb eines Organismus genau kennen, um zu verstehen, wie es während der Evolution zu Neuerungen kommen kann. Wagner wendet sich bei seinen Untersuchungen drei Bereichen zu: dem Stoffwechsel, den Proteinen sowie der Steuerung der Genaktivität. Angesichts der ungeheuren Vielzahl möglicher Strukturen und Wirkungsweisen wären derartige Untersuchungen bis vor Kur-

zem eine hoffnungslose Aufgabe gewesen. Mit Hilfe leistungsfähiger Computer ist es mittlerweile aber möglich, zumindest einen kleinen Einblick in die Architektur des Lebens zu bekommen.

Unter anderem fragt der Evolutionsbiologe, wie viele Aminosäuren man in einem Protein verändern kann, ohne dass es seine spezifische Funktion einbüßt. Das überraschende Ergebnis: sehr viele. Dies geht aus Computermodellen hervor, mit denen sich die Auswirkungen von Mutationen simulieren lassen. Mutationen sind auch für Wagner der Motor aller Neuerungen, da sie die – im besten Fall – vorteilhaften (phänotypischen) Veränderungen verursachen, welche die natürliche Selektion anschließend lediglich bewahrt.

Wagner verdeutlicht das am Beispiel sauerstoffbindender Proteine, der Globine. Diese kommen in vielen Lebewesen vor (in unserem eigenen Blut in Form von Hämoglobin) und können trotz unterschiedlicher Aminosäuresequenzen alle Sauerstoff binden und transportieren. Selbst Globine aus so verschiedenen Lebewesen wie Lupinen und Insekten, deren Aminosäuresequenzen nur noch zu zehn Prozent übereinstimmen, haben diese Fähigkeit.

Der Autor bezeichnet das als Robustheit und sieht diese eng an Komplexität gebunden. Je komplexer ein Lebewesen, schreibt er, desto größer sei seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Veränderungen. Was im ersten Moment wie ein Widerspruch klingt, bildet Wagners Kernthese. Die Robustheit, schreibt er, ermögliche den Lebewesen, die Netzwerke ihrer Proteinsynthese, ihrer Genregulation oder ihres Stoffwechsels stark zu modifizieren – nämlich jeweils inner-

halb von Scharen strukturverschiedener, aber funktionsähnlicher Varianten. Wagner nennt das »unterschiedliche Strukturen mit gleicher Bedeutung«. Lebewesen könnten somit unzählige Möglichkeiten »durchspielen«, ohne ihre Lebensfähigkeit einzubüßen.

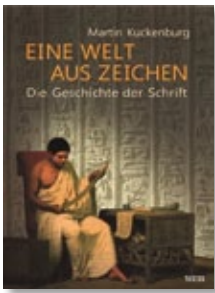
Das heißt, Veränderungen im Genotyp müssen nicht zwangsläufig mit einem veränderten Phänotyp einhergehen. Die Robustheit der Organismen »duldet« also ein gewisses Maß an Unordnung, und die wiederum ist unabdingbare Voraussetzung für Neuerungen. Daraus folgt auch, dass es für jedes zu überwindende Problem, etwa in Form veränderter Umweltbedingungen, eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten gibt, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass eine davon realisiert wird.

Das Netzwerk aus Wegen, die Strukturen mit gleicher Bedeutung verbinden, existiert nach Wagner im »zeitlosen, ewigen Bereich der Bibliotheken der Natur. ... Es verbirgt sich hinter der sichtbaren Pracht aller Lebewesen, und doch geht alle diese Pracht von ihm aus.« Wenn Wagner erörtert, dass sich diese Netzwerke durch »Selbstorganisation« gebildet haben, dann ist das keine wirkliche Erklärung für ihre Entstehung. Wenn er am Ende gar schreibt, »dass die Kreativität des Lebendigen sich aus einer Quelle speist, die älter als das Leben ist, ja sogar älter als die Zeit«, trägt das schon metaphysische Züge. Hier verlässt Wagner den Bereich des empirisch Prüfbareren.

Wagners Forschung hat viel mit Bioinformatik und wenig mit traditioneller Biologie zu tun. Sein Buch ist zum Teil schwer verständlich und bleibt oft merkwürdig abstrakt. Auch er kann keine echte Erklärung für die Entstehung des Neuen liefern, sondern lediglich beschreiben, was auf molekularer Ebene während eines Neuerungsprozesses geschieht. Davon abgesehen gewährt er uns interessante Erkenntnisse und Einblicke in Genetik und Bioinformatik.

Eckart Löhr

Der Rezensent hat Philosophie und Germanistik studiert. Er lebt in Essen und arbeitet unter anderem als Fachjournalist.



Martin Kuckenburger
Eine Welt aus Zeichen
Die Geschichte der Schrift
Theiss, Darmstadt 2015
288 S., € 39,95

KULTURGESCHICHTE

Rückkehr zum Piktogramm

Wissenschaftsjournalist Martin Kuckenburger beschreibt die Entwicklung der Schrift – und konstatiert, das Internetzeitalter bringe eine »hieroglyphische Kommunikation« zurück.

Der deutsche Soziologe und Nationalökonom Max Weber (1864–1920) hat die Kulturentwicklung als einen Prozess der Entzauberung beschrieben: von der religiösen Aufladung der Naturgewalten zur rationalen kapitalistischen Buchführung. Doch Buchhalter benötigte man bereits vor über 5000 Jahren im Zweistromland zwischen Euphrat und Tigris. Die Region versinkt heute im Bürgerkrieg, dabei war sie – neben Ägypten – nicht nur die Wiege der abendländischen Kultur, sondern spielte auch in der Entwicklung der Schrift eine maßgebliche Rolle.

Beim Entstehen des geschriebenen Worts in Vorderasien stand die Buchhaltung im Vordergrund, wie Wissenschaftsjournalist und Sachbuchautor Martin Kuckenburger zeigt. Sumerer, Assyrer und Babylonier benötigten sie, um Fernhandel zu betreiben. Auch um die großen Städte an Euphrat und Tigris zu bauen, waren Instrumente der Dokumentation, der Datenspeicherung wie der angewandten Statistik erforderlich. Zunächst bedienten sich die Menschen dazu kleiner Tonformen und Täfelchen mit Markierungen und Zahlen. Ab etwa 3300 v. Chr. begannen sie damit, den Zahlen Bildsymbole hinzuzufügen, mit denen sich weitere Angaben machen ließen, etwa über Zeiten oder Personen. Hierin sieht der Autor den Anfang des geschriebenen Worts: »Der Wunsch zu zählen, nicht zu erzäh-

len, war das ausschlaggebende Motiv für die Erfindung der Schrift in Vorderasien.«

Im Gegensatz dazu, so Kuckenburger, lagen den bildreichen ägyptischen Hieroglyphen vor allem religiös-politische Motive zu Grunde. Aus dem Land am Nil sind eine Fülle alter Texte überliefert – von Liebesgedichten bis zu Gerichtsakten. Der Autor beleuchtet viele kulturelle Aspekte der Schriftentwicklung im alten Ägypten, etwa die Entstehung der ägyptischen Schreiberkaste, deren Vertreter bereits eine geregelte Ausbildung durchliefen. Die Tätigkeit als Schreiber konnte ihnen eine beamtenähnliche Anstellung, Ansehen und Vermögen einbringen.

Reich bebildert und üppig erläutert stellt das Buch die wichtigsten Etappen

der Schriftgeschichte dar, von den Malereien in der Höhle von Lascaux bis zu den Smileys der Internetkommunikation. Schwerpunkte sind dabei die Keilschrift in Mesopotamien, die Hieroglyphen im alten Ägypten, die griechische Antike mit der Verbreitung der phonetischen Buchstabenschrift und das lateinische Alphabet. Der Schriftentwicklung während des Mittelalters bis zum Buchdruck im 15. Jahrhundert, vor allem der Differenzierung in Groß- und Kleinbuchstaben, räumt Kuckenburger erheblich weniger Platz ein. Die Schriftbildung in Asien, Mittel- und Südamerika behandelt er nur am Rand.

Als Leser erfährt man unter anderem, wie früher geschrieben wurde: in der Antike zunächst, indem die Menschen in Ton und andere Materialien ritzten, und später, indem sie auf Papyrusrollen notierten. Ab dem 2. Jahrhundert v. Chr. trat Pergament in den Vordergrund, das man aus Tierhäuten herstellte. An die Stelle meterlanger Rollen, in denen man nicht blättern konnte und die bei häufiger Benutzung auch schneller verschlissen, traten handlichere und robustere Pergamentbücher. Das Papier, eine chinesische Erfindung, verbreitete sich im christlichen Abendland erst während des Hochmittelalters, nachdem es über die Araber nach Europa gelangt war.

Im Internetzeitalter ist laut Kuckenburger die Schrift mitnichten bedeutungslos geworden. Gebloggt, gechattet oder in sozialen Netzwerken kommuniziert werde vor allem schriftlich. Andererseits laufe Kommunikation zunehmend über Bilder, nicht nur in Form kleiner Piktogramme, sondern auch mit Fotos aller Art. Dadurch kehre eine Art hieroglyphische Kommunikation zurück, die man längst hinter sich glaubte. Ob sie eines Tages in eine dominierende »Weltsprache« münden könnte, darüber spekuliert der Autor glücklicherweise nicht.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:
www.spektrum.de/rezensionen

Hans-Martin Schönherr-Mann

Der Rezensent ist Essayist und lehrt politische Philosophie an der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie Theorie der Bildung an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.

Dominantes Aggressionsgen

Unsere nächsten Verwandten hatten unerwartet hohe geistige Fähigkeiten, wie neue archäologische und genetische Funde belegen (»Verkannter Neandertaler«, Oktober 2015, S. 28).

Wilhelm Waidmann, Großenseebach:

Das Aussterben der Neandertaler fällt anscheinend zeitlich unmittelbar mit dem Auftauchen des *Homo sapiens* zusammen, hat also vermutlich etwas mit einem »nicht harmonischen« Zusammenleben der beiden Arten zu tun, bei welchem der Neandertaler den Kürzeren gezogen hat. Vielleicht war der Neandertaler ein etwas grobschlächterer, aber eher gutmütiger Geselle, der einem rücksichtslosen und gewaltbereiten *Homo sapiens* nicht gewachsen war. Offenbar scheuen sich Wissenschaftler aller Sparten, das Bild eines intelligenten und edlen *Homo sapiens*, der plötzlich aus der afrikanischen Savanne auftaucht und friedlich die Erde bevölkert, zu zerstören. Dabei lehren uns schon die ältesten schriftlichen Aufzeichnungen, dass gerade beim *Homo sapiens* Mord

und Totschlag schon immer ein Mittel der Machtpolitik im Großen und im Kleinen war. Man kann wohl davon ausgehen, dass ein dominantes »Aggressionsgen« schon sehr früh in der Menschheitsgeschichte angelegt war.

Die Frage der Willensfreiheit

Der Philosoph Eddy Nahmias bezweifelt, dass der Mensch nur ein biochemischer Automat ist (»Wie frei ist der Mensch?«, September 2015, S. 60).

Tilo Strutz, Leipzig: Der Karikaturist hat den Nagel auf den Kopf getroffen. Die Diskussion um den freien Willen des Menschen ist längst keine philosophische, sondern eine religiöse Diskussion. Die Ehre der »Krone der Schöpfung« muss gerettet werden.

Solange wir uns jedoch auf das Kausalitätsprinzip einigen können – Ursache und Wirkung folgen chronologisch aufeinander –, ist jede Handlung oder Entscheidung eines Lebewesens ein Ergebnis einer Informationsverarbeitung.

Betrachten wir den Menschen als System, das über vorhandene Eingänge



(zum Beispiel Sinnesorgane) mit Informationen gefüttert wird. Außerdem ist unter Umständen bereits Information durch die Struktur des Systems selbst vorhanden. In Abhängigkeit von dessen Arbeitsweise wird die Information prozessiert. Das Ergebnis hängt somit von allen Informationen ab, die bis zum aktuellen Zeitpunkt gesammelt und gespeichert wurden.

Selbst wenn wir nahezu identische informationsverarbeitende Systeme hätten, sagen wir die Gehirne von einiigen Zwillingen, dann wird sich das Handeln der Zwillinge unterscheiden.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

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

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Hanna Hillert

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

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit:

Dr. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Dr. Ursula Loos,

Dr. Tina Schlafly, 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 Nationale Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90, Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBIO) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 37 vom 1.1.2016.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2016 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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



Es gibt zwar eine hohe Korrelation, da auch der Input im Kindesalter sehr ähnlich ist, aber das Handeln und Entscheiden ist nicht identisch und kann auch gegensätzlich sein. Auf Grund seiner biologischen Natur ist das menschliche Gehirn kein starres, sondern ein sich veränderndes System.

Gerade das sehr unterschiedliche Handeln bei ähnlichem Input und ähnlichem System befeuert die Hoffnung auf einen freien Willen. Das gegensätzliche Entscheiden kann aber zum Beispiel auch mit der Chaostheorie begründet werden, welche sich mit dynamischen Systemen befasst, deren zeitliche Entwicklung unvorhersehbar erscheint, obwohl die zu Grunde liegenden Gleichungen deterministisch sind. Für identische Inputwerte ist hier das Ergebnis der Berechnung immer dasselbe. Sobald sich der Input aber nur um einen verschwindend geringen Betrag ändert, kann das System etwas völlig anderes ausgeben. Freier Wille ade! Das Leben kann aber trotzdem lebenswert sein. Und das Handeln unserer Mitmenschen ist doch erfahrungsgemäß mehrheitlich voraussagbar und nicht chaotisch. Zum Glück.

Dieter Eichrodt, Glengarriff (Irland): Das synaptische Netzwerk unseres Gehirns bestimmt die Muster der elektrochemischen Erregungsprozesse, die in ihm ablaufen können – also unsere Gefühle und Gedanken. Diese Erregungen wirken verstärkend oder abschwächend auf die Synapsen zurück. Dabei wirken durch äußere Sinnesreize stimulierte »Fremderregungen«, die uns im allgemeinen bewusst werden, parallel zu internen »Selbsterregungen«, die uns meist nicht bewusst sind und dem »Housekeeping« unseres Denkorgans dienen: Gedächtnis, Vergessen und andere lebensnotwendige Funktionen. Bei uns nehmen Letztere den weitaus größten Teil der Aktivität in Anspruch: Das menschliche Gehirn beschäftigt sich in erster Linie mit sich selbst – was einen wesentlichen Unterschied zum Gehirn der Tiere ausmachen mag. Diese Selbstbezüglichkeit ist es, die uns Autonomie verleiht! Und diese unbewusste Auto-

nomie ist es, die uns die Illusion eines »Ichs« und eines »freien Willens« vorgaukelt. Könnten die Philosophen und die Neurowissenschaftler sich darauf einigen, dass freier Wille nur ein anderes Wort für Autonomie ist, wäre ein lang anhaltender Streit aus der Welt.

Kein Aufstand der Maschinen

Michael Springer warnte vor der Entwicklung autonomer Waffen (»Wächst uns die künstliche Intelligenz über den Kopf?«, Springers Einwürfe, September 2015, S. 20).

Günter Jantzen, Hannover: Es ist sehr erfreulich, dass Michael Springers Einwurf die Initiative der KI-Forscher, vor den Gefahren autonomer Waffen zu warnen, aufnimmt und verbreitet. Es gibt gute Gründe, vor einem Wettüsten mit AI-Waffen zu warnen. Der offene Brief der KI-Forscher (http://futureoflife.org/AI/open_letter_autonomous_weapons) benennt einige davon. Beunruhigend ist, dass diese Waffen viel leichter und kostengünstiger herzustellen sind als Nuklearwaffen und daher bald allgegenwärtig in den Händen von Terroristen und Warlords ihre destruktive Kraft entwickeln könnten.

Nicht in dem offenen Brief genannt und für mich auch nicht so plausibel, ist das Gefahrenszenario, dass einleitend in diesem Einwurf entwickelt wird. Die Sorge, dass Maschinen dem menschlichen Geist das Wasser reichen können, dass künstliche Intelligenz (KI) den Fähigkeiten unseres Denkens nahekommen wird, Ray Kurzweils antihumane Vision einer »Singularität«, bei der das menschliche Denken auf intelligente Maschinen übergehen wird.

Michael Springer begründet diese Sorge damit, »dass unser Gehirn als Resultat der biologischen Evolution Bewusstsein entwickelt hat ... Sofern unser Denkvermögen aber das Ergebnis einer gewöhnlichen Anpassung durch Versuch und Irrtum über geologische Zeiträume hinweg ist, gibt es keinen prinzipiellen Grund, warum es mit zielgerichteter Forschung und Entwicklung nicht

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

gelingen sollte, binnen einer historisch messbaren Zeitspanne Vergleichbares hervorzubringen.«

Die biologische Evolution ist die Milliarden Jahre alte Geschichte des Lebens auf unserem Planeten. Prinzipiell ist natürlich denkbar, dass Menschen diese »natürliche Zuchtwahl« in künstlicher Weise beschleunigt nachvollziehen und dass dabei Lebewesen mit Bewusstsein entstehen könnten. Das hat jedoch nichts mit KI-Systemen zu tun. Diese werden zwar gern als »autonome Agenten« bezeichnet. Es sind aber Maschinen, die stumpf nach festgelegten Spezifikationen Programme ausführen. Sie fühlen und empfinden nichts. Wenn ihr Verhalten auf uns überraschend wirkt, dann spielt uns unser Einfühlungsvermögen einen Streich.

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

DER SPRINGENDE PUNKT

VON HEATHER E. ROULO

Studenten strömten aus der Geologievorlesung, rollten ihre weichen Bildschirme zusammen und stopften sie in den Rucksack. Yvonne blieb zögernd stehen. Sie fürchtete sich vor dem, was jetzt kam: Sie musste auf den Knopf drücken.

Das Bestattungsinstitut hatte ihr soeben eine mikrofluide Kurzwahltaste gesendet, die nun auf den Knopfdruck wartete. Die Taste ragte wie eine Blase aus dem Armband der Smartwatch an Yvannes Handgelenk. Beschleunigter Puls und feuchte Haut zeigten ihre Beklemmung an; mit jeder Sekunde, die Yvonne zögerte, verlor sie Punkte – aber ihr Finger verweigerte den Dienst.

Peggy flitzte um die Ecke; ihre blonde Mähne streifte das selbst gemalte Wolfsporträt auf ihrem T-Shirt. Sie grinste Yvonne an. »Wie geht's uns denn heute?«

Yvonne tat, als würde sie erst jetzt auf ihre Smartwatch schauen. »Ich gewann Punkte für einfaches Lernen und Selbstverwirklichung. Bloß ein weiterer Vorlesungstag.«

Peggy runzelte die Stirn. »Kein Bonus für aktive Mitarbeit? Das sieht dir nicht ähnlich. Komm, wir nehmen einen Umweg zu den Schlafsälen. Mir fehlen noch ein paar Punkte für körperliche Betätigung.«

Drüben auf dem Hochschulgelände spielten Studenten Frisbee oder saßen unter einem Baum und lauschten

einer Gitarre. Sie alle sammelten auf diese Weise Gemeinschaftspunkte; obendrein schienen sie Spaß zu haben. An einem anderen Tag und in einer anderen Stimmung hätte sich Yvonne vielleicht einer Gruppe angeschlossen.

»Hallo? Wo bist du mit deinen Gedanken?« Peggys Berührung ließ sie hochschrecken.

»Brian ...« Yvonne schluckte, als sie den Namen ihres Bruders aussprach. Drüben flog das Frisbee ins Gebüsch. »Seine Asche soll verstreut werden.«

Ein sportlich wirkendes Mädchen fischte im Gebüsch nach der Scheibe; sie stieß einen Freudenschrei aus und schwenkte stolz ein Stück Plastikmüll. Ihr Partner stöhnte, anscheinend vor Neid. Das Mädchen warf den Müll in einen Abfallkorb; ihr Messgerät klingelte.

Peggy schmollte. »Verdammt, die Uni hat eine Umweltinitiative angekündigt und spendet Bonuspunkte für Campusverschönerung. Wahrscheinlich kriegt das Mädchel 500 extra. Ich bin schon den ganzen Tag im Rückstand: zu spät aufgestanden und das Frühstück ausgelassen. Für Freitagabend hatte ich zur Belohnung Pizza gewählt – aber das wird wohl nichts.«

»Dafür musst du dich nicht um die sterblichen Überreste deines Bruders kümmern«, meinte Yvonne. »Wenn das kein Bonus ist ...« Sie kniff die Lippen zusammen. Seit Brians Unfall hatte sie

lernen müssen, dass die Welt weiterging, als wäre nichts geschehen. Für alle anderen hatte sich ja wirklich nichts geändert.

Peggy zuckte bloß mit den Achseln.

Auf Umwegen näherten sich die beiden dem Schlafsaal; Yvonne ging es viel zu langsam, und sie wäre am liebsten sofort unter ihre Decke gekrochen. Aber das gab natürlich Strafpunkte. Seit Beginn des Studiums fütterte sie ihre Smartwatch mit Pluspunkten für lohnende Bildung und neue Erfahrungen. Peggy sammelte Fitnesspunkte. Die Jagd nach Punkten schweißte die beiden zusammen. Nichts war schöner als der Klingelton, der einen neuen Rekord belohnte.

»Möchte deine Mutter nicht Brians Asche entsorgen?«, fragte Peggy. »Das ist ein wichtiger emotionaler Meilenstein. Brächte ihr sicher einen Riesebonus!«

»Mama würde die Punkte verfallen lassen. Sie hat nur ein Handy. Ich habe versucht, ihr eine Smartwatch einzurichten, aber sie sagt, ihr Onlinespiel macht mehr Spaß.«

»Wie altmodisch! Eine ganz andere Generation! Hängt online mit Freunden herum. Ich finde, Erfolge in der wirklichen Welt sind befriedigender.«

Sie hielt kurz inne und schaute auf ihre Smartwatch. »So, jetzt habe ich mein Punkteziel erreicht. Gehen wir über die Straße, das ist kürzer.«

Ein Radfahrer surrte zügig vorbei; das verschaffte ihm Punkte für Fitness und soziale Verantwortung.

»Mama nahm sich Brians Tod so zu Herzen«, erklärte Yvonne, »dass ich ihr anbot, das Entsorgen zu übernehmen. Ich weiß nicht, warum es mir so schwerfällt. Ist doch nur ein Knopfdruck.«

Sie hob die Hand. Warum zögerte sie? Es gab keine Extrapunkte, wenn man die Asche persönlich verstreute. Ihr Magen krampfte sich zusammen, der Zeigefinger schwebte wie gelähmt über der Taste. Bei der in einer virtuellen Kirche abgehaltenen Gedenkfeier – damit Freunde von überall zusammen trauern konnten – hatte sie schon Lebewohl gesagt, aber erst dieser Knopfdruck wäre real und endgültig.

Peggy blieb stehen. »Ich habe noch kein Familienmitglied verloren; sicher ist so etwas hart. Du bist stark, und du hilfst deiner Familie, wenn du das auf dich nimmst.«

In Yvones Augen stiegen Tränen auf. Sie umarmte Peggy. Die schniefte gerührt und wischte sich die Nase ab. Ihre Smartwatch klingelte, und sie strahlte.

»Soziale Bindung! Ich war total für eine Freundin da. Schau nur, ich habe für heute einen Vorsprung.« Sie drückte nochmals Yvones Schultern. »Dabei kriege ich normalerweise kaum Punkte für Empathie. Bis bald. Danke, dass du meinen Tag gerettet hast!«

Peggy summte vor sich hin und hüpfte zum Schlafsaal.

Yvones Finger streichelten die blasenförmige Taste an ihrer Smartwatch. Ein Knopfdruck, und sie würde eine Megalebensaufgabe vollenden. Ihr Guthaben würde sprunghaft steigen. Manche Leute wurden reich geboren, und exotische Reisen schenkten ihnen kostbare Erfahrungspunkte. Aber mit einer Fingerbewegung läge Yvonne weit vorne. Sie könnte einem schmerzlichen Schicksalsschlag etwas Gutes abgewinnen. Brian würde das gefallen.

So wollte sie keine Punkte machen, nicht so!

»Peggy, warte!«, rief sie. Die Freundin blieb auf den Stufen stehen.

Yvonne streifte die Smartwatch vom Handgelenk, warf sie ins Gebüsch und hörte ein trauriges Klingeln – verlorene Punkte.

»Um Himmels willen, was machst du?«, schrie Peggy.

Yvonne wurde schwindlig. Ihre Knie drohten einzuknicken, als sie versuchte, ohne die Hilfe ihrer Smartwatch den Weg zur Leichenhalle zu finden. Vormal vertraute Gebäude verwirrten sie, als wäre sie eine eben erwachte Schlafwandlerin. Doch schon beim zweiten Schritt wurde Yvonne selbstsicherer. Über die Schulter rief sie: »Im Gebüsch liegt Müll, wenn du willst!«

Peggy kreischte begeistert. Eine Smartwatch klingelte. 🐼

DIE AUTORIN

Heather E. Roulo ist eine Schriftstellerin aus Seattle (US-Bundesstaat Washington), deren Geschichten in Podcasts, Zeitschriften und Anthologien erschienen sind. Siehe www.heroulo.com.

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.

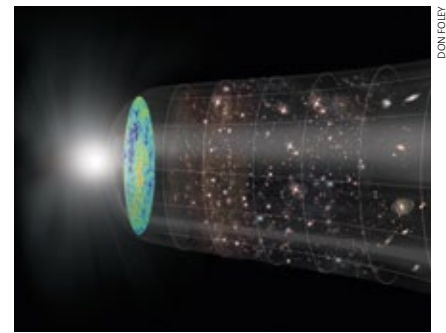
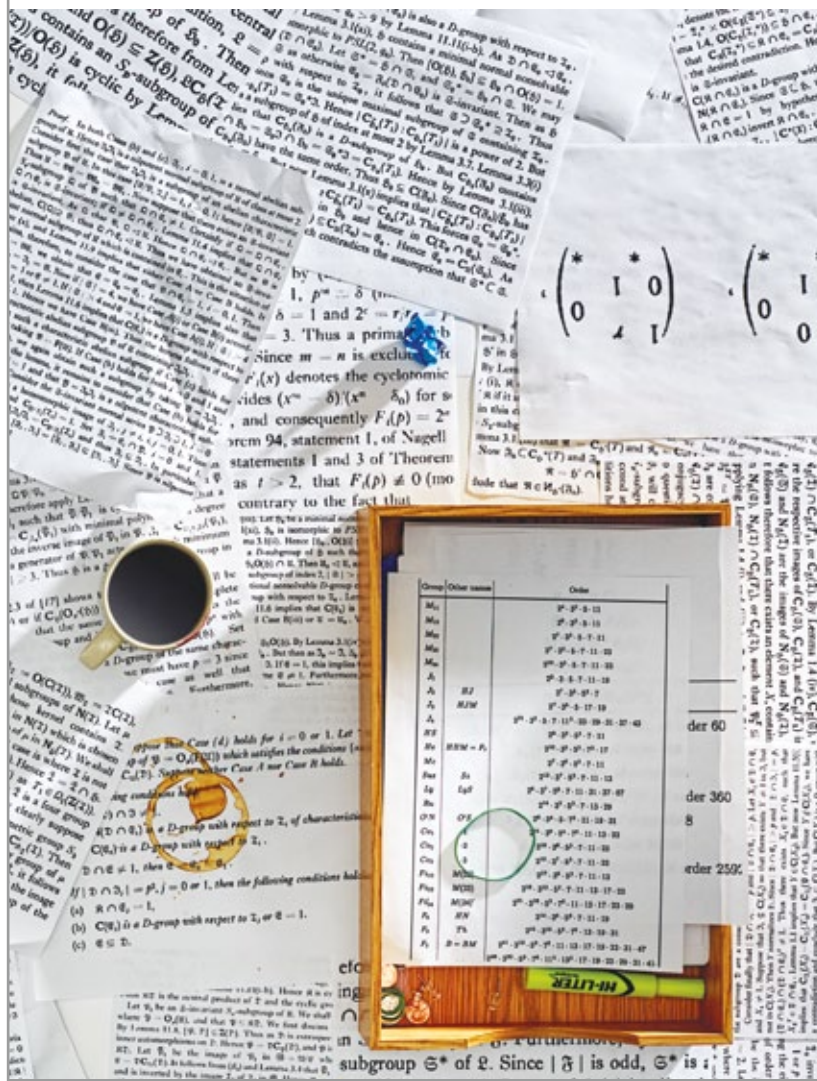
© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 503, S. 158, 7. November 2013

Rettet das Riesentheorem!

Vier in Ehren ergraute Experten bemühen sich, den längsten Beweis der Mathematik von 15 000 Seiten auf ein sinnvoll nutzbares Maß zu komprimieren – bevor der in Jahrzehnten mühsam erarbeitete Überblick über die Klassifikation der »endlichen einfachen Gruppen« mit ihnen zu Grabe getragen wird.



Das Licht zwischen den Galaxien

Fast seit Anbeginn der Zeit durchfluten die von unzähligen Galaxien ausgesandten Photonen den Weltraum. Doch erst jetzt beginnen Astronomen, die im extragalaktischen Hintergrundlicht versteckten Informationen wirklich zu verstehen.



Fluss vor dem Umbruch

Das umstrittene Projekt für einen Megastaudamm am Rio Xingu, einem Nebenfluss des Amazonas in Brasilien, gefährdet eines der weltweit größten Vorkommen strömungsliebender Fische sowie eine Region mit bemerkenswerter Biodiversität.

Psychische Störungen durch die Darmflora

Eine Reihe von Erkrankungen – von Autismus bis zu Depression – hängen unter anderem mit der Balance der Darmbakterien zusammen. Sie liefern dem Gehirn verschiedene wichtige Moleküle, darunter Botenstoffe wie Dopamin und Serotonin sowie Nervenzellwachstumsfaktoren.

Sind Zeitreisen möglich?

Wer sich schnell bewegt, altert langsamer als seine ruhende Umgebung. Das entspricht einer Reise in die Zukunft. Strukturen in der Raumzeit erlauben darüber hinaus theoretisch auch, einen Ort in der Vergangenheit zu besuchen. Die Naturgesetze könnten aber verhindern, dass letzteres Phänomen in der Realität auftritt.

NEWSLETTER

Möchten Sie immer über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter: www.spektrum.de/newsletter

JETZT BESTELLEN:
DAS ABO VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



1. DIE VERBORGENE WIRKLICHKEIT:

Brian Greene zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind.

JAHRES- ODER GESCHENKABO

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10% günstiger als der Normalpreis.

+ WUNSCHGESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

+ PÜNKTLICHE LIEFERUNG:

Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.

+ KEINE MINDESTLAUFZEIT:

Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



2. 54 BIT DRIVER KIT :

Das umfassende Standardset mit Präzisionsschraubensätzen enthält 54 ausgewählte 4-mm-Bits.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

E-Mail: service@spektrum.de



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



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