www.Spektrum.de 9.16

9.16

Spektrum der Wissenschaft

Dunkle Energie

Nobelpreisträger Adam Riess über die rätselhafte Kraft, die unser All auseinandertreibt

8,20 € (D/A) • 8,50 € (L) • 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

TEILCHENPHYSIK Den Multiquarks auf der Spur

MULTIPLE SKLEROSE Nobelpreisträger Harald zur Hausen erklärt die Ursachen

NEUE SERIE **M**agie der Schrift – Teil 1: Der Indus-Kode

Spektrum DER WISSENSCHAFT
DIE WOCHE
DAS WÖCHENTLICHE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

Das Kombipaket im Abo: App und PDF

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

www.spektrum.de/abonnieren

DNA_ISTOCK56595590_SHUNYUFAN

EDITORIAL
EIN HEFT FÜR ALLE NEUGIERIGEN

Von Carsten Könneker, Chefredakteur
Koenneker@spektrum.de

Dieses Heft ist besonders. Besonders, weil gleich zwei Nobelpreisträger über ihre aktuelle Forschung berichten. Besonders, weil wir mit den Fotos noch näher an die Wissenschaft heranrücken. Besonders, weil Redakteure, Layouter und Illustratoren bereits seit vielen Monaten an just diesem Heft gearbeitet haben.

Neugierde ist das Wesen der Wissenschaft. Auch wir Redakteure sind stets gespannt auf neue Methoden, neue Erkenntnisse und neue Hypothesen, die sich daraus ableiten lassen. Was davon über den Tag und das eng umrissene Fachgebiet hinaus wichtig ist, bilden wir nach sorgfältiger Auswahl und inhaltlicher Prüfung jeden Monat in **Spektrum** ab. Dabei versuchen wir so nah wie möglich an der Forschung dran zu sein. Aus diesem Grund laden wir – seit 1978 – die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler selbst ein, ihre Arbeiten vorzustellen. Mit der überarbeiteten Gestaltung ab dieser Ausgabe möchten wir ebendieses **Spektrum**-Prinzip noch weiter stärken: am Puls der Forschung sein – und Neugierde wecken.

Im ersten Beitrag zum Titelthema (ab S. 12) beschreibt Physiknobelpreisträger Adam G. Riess gemeinsam mit dem Astronomen Mario Livio das Rätsel der Dunklen Energie – jener bis heute unverstandenen Kraft, die das Weltall auseinandertreibt. Danach erläutert der Kosmologe Joshua Freeman, Direktor des Dark Energy Survey, wie Forscher in einem Beobachtungsvorhaben nie gekannten Ausmaßes die verschiedenen Erklärungsansätze zur Dunklen Energie nun experimentell überprüfen wollen.

Ein weiterer Höhepunkt ist das Interview mit Harald zur Hausen (ab S. 38). 2008 erhielt der Mediziner den Nobelpreis für seine Erkenntnis, dass Papillomviren Gebärmutterhalskrebs auslösen können – eine Hypothese, die er bereits zwei Jahrzehnte zuvor aufgestellt hatte. Jetzt treibt den Forscher ein anderer Verdacht um: Virale DNA-Moleküle aus Kuhmilch oder Rindfleisch könnten den Ausbruch von multipler Sklerose herbeiführen. Diese Forschung wird vielleicht einmal in die weltweite Impfung aller Milchkühe münden.

Schreiben Sie uns, wie Ihnen das neue **Spektrum** gefällt! Wir sind gespannt auf Ihre Meinung.

Herzlich Ihr

SIMON KUMM & SUSANNE SCHUE (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/BILDER.HTML) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/LEGALCODE)

NEU: FREISTETTERS FORMELWELT

Ab sofort porträtiert der Astronom und Publizist Florian Freistetter in jedem Heft eine naturwissenschaftliche Formel – mal eine berühmte, mal eine eher unbekannte, aber stets eine wichtige! (S. 65)

IN DIESER AUSGABE

BIANCA FIORETTI, HALLBAUER & FIORETTI (COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/FILE:EMMANUELLE_CHARPENTIER.JPG) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

EMMANUELLE CHARPENTIER

Die von der Französin entwickelte CRISPR/Cas-Technik zur gezielten Genveränderung revolutioniert derzeit die Biomedizin. Wir stellen die Ausnahmeforscherin in einem Porträt vor (S. 60).

MARKUS MARCETIC

ADAM G. RIESS

Der amerikanische Astronom untersucht weit entfernte Supernovae und vermisst so Entfernungen im Kosmos. 2011 erhielt er den Nobelpreis für die Entdeckung, dass sich das All beschleunigt ausdehnt (S. 12).

KLAUS BADUR

Der Ingenieur aus Garbsen bei Hannover hat in jahrelanger Kleinarbeit zwei von Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) erdachte Maschinen nachgebaut und zum Laufen gebracht (S. 76).

INHALT

6 SPEKTROGRAMM

Schweißarbeit der Superlative

Tausende Baumarten in Amazonien

Bänderriss in Graphenfilmen

Herzmuskelzellen treiben Roboterrochen an

Panzer diente ursprünglich zum Graben

Ein Ozean auf Pluto?

Bessere Schutzgebiete für Haie

Menschen sehen einzelne Photonen

28 FORSCHUNG AKTUELL

Brüder, zur Sonne!
Zyanobakterien nutzen ihren Zellkörper als Mikrolinse

Teilchenphysik-Simulator
Fundamentale Prozesse im Quantencomputer untersucht

Einladung zum Mogeln
Raffinierte psychologische Versuchsanordnungen haben paradoxe Effekte

Angeklagt und überführt
Zika-Viren verursachen tatsächlich Missbildungen des Gehirns

37 SPRINGERS EINWÜRFE

Dringend gesucht: Intelligente Energienetze
Wie lässt sich die Unzuverlässigkeit von Wind und Sonne kompensieren?

53 ZEITREISE

Von antiker Kosmetik zum Gezeitenkraftwerk

65 FREISTETTERS FORMELWELT

Keine Angst vor dem Logarithmus!
Denn er kann das Rechnen mit großen Zahlen extrem vereinfachen

12 KOSMOLOGIE **BRISANTE DUNKLE ENERGIE**

Eine Kraft treibt das Universum auseinander. Aber wie? Auch zwei Jahrzehnte nach der Entdeckung verstehen Theoretiker das Phänomen nicht. Nun sollen neue Experimente Klarheit schaffen.
Von Adam G. Riess und Mario Livio

18 ASTRONOMIE **DAS DUNKELSTE GEHEIMNIS**

Physiker vermessen in nie gekannter Präzision die Tiefen des Alls. Ihre Sehnsucht: eine Erklärung für die beschleunigte Expansion des Kosmos.
Von Joshua Frieman

38 INTERVIEW **»WIR SIND ALLE INFIZIERT«**

Nobelpreisträger Harald zur Hausen hegt einen spektakulären Verdacht: Virale DNA in Milch und Rindfleisch kann multiple Sklerose und andere neurodegenerative Krankheiten auslösen.

44 NACHHALTIGKEIT **RETTUNG FÜR AFRIKAS ERDE**

Wie lassen sich ausgelaugte Ackerböden regenerieren, damit sie wieder gute Erträge liefern? Indem die Bauern zwischen ihre Nutzpflanzen Bäume, Sträucher und andere ausdauernde Gewächse setzen.
Von John P. Reganold und Jerry D. Glover

48 CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN **DIAMANTENFIEBER**

Mit einem spektakulären Experiment versetzte der Begründer der modernen Chemie seine Zuschauer einst in Staunen.
Von Matthias Ducci und Marco Oetken

54 FRÜHGESCHICHTE **RÄTSELHAFTER INDUS-KODE**

Serie: Magie der Schrift (Teil 1) Eine 4000 Jahre alte Kultur hat nichts weiter an Aufzeichnungen hinterlassen als Steintafeln mit extrem kurzen Texten. Bis heute harren sie ihrer Entzifferung.
Von Andrew Robinson

60 PORTRÄT **DIE WEGBEREITERIN**

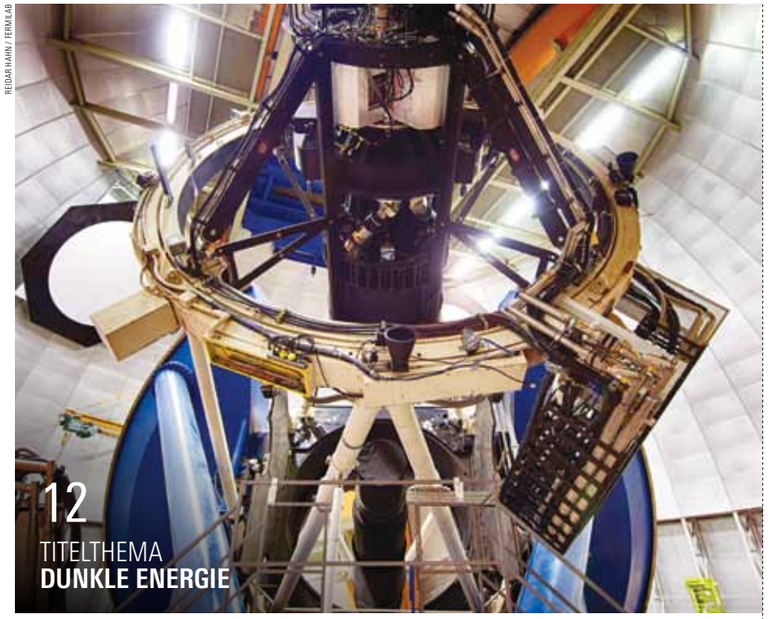
Jahrelang zog Emmanuelle Charpentier von Ort zu Ort und forschte still vor sich hin. Dann veränderte die Entdeckung des CRISPR/Cas-Systems ihr Leben radikal.
Von Alison Abbott

66 TEILCHENPHYSIK **DEN MULTIQUARKS AUF DER SPUR**

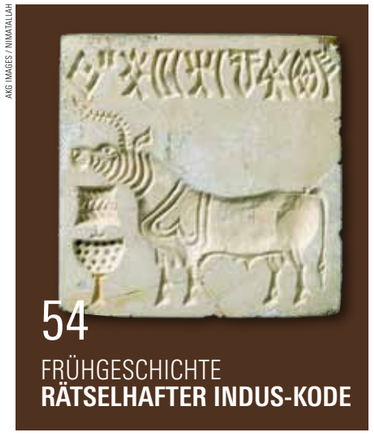
Protonen und Neutronen bestehen aus jeweils drei Quarks. Theoretisch kann es auch Systeme aus vier, fünf oder mehr dieser Bausteine geben. Neue Experimente am Large Hadron Collider in Genf stützen diese Vermutung.
Von Georg Wolschin

76 TECHNIKGESCHICHTE **LEIBNIZSCHE MASCHINEN**

Serie: Gottfried Wilhelm Leibniz (Teil 4) Der Universalgelehrte ersann mechanische Wunderwerke, die er selbst nie voll funktionsfähig erlebte. Seit wir sie rekonstruiert haben, wissen wir: Die Ideen dazu waren ihrer Zeit um Jahrhunderte voraus.
Von Klaus Badur


REIDAR HAHN / FERMILAB

DEUTSCHES KREBSFORSCHUNGSZENTRUM (DKFZ) / TOBIAS SCHWERDT


AKG IMAGES / NIMATALLAH

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ BIBLIOTHEK, NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK, HANNOVER (DIE VIER-SPEZIES-RECHENMASCHINE)

76
TECHNIKGESCHICHTE
LEIBNIZSCHE MASCHINEN

74 SCHLICHTING!

Vorsicht – explodierende Samenkapseln!
Das Indische Springkraut schleudert seine Samen meterweit

88 REZENSIONEN

u. a. mit **Monique Berger, Michelle Gaudichon:** Das geheime Leben der Insekten
Thomas Rid: Maschinendämmerung
Klaus Echle, Joachim Wimmer: Nationalpark Schwarzwald
Jeanine Daems, Ionica Smeets: Mit den Mathemädels durch die Welt
Stephen Petranek: Unser Leben auf dem Mars

94 LESERBRIEFE

96 FUTUR III

Alle Blumen brauchen Wasser …
selbst wenn sie aus Kunststoff sind

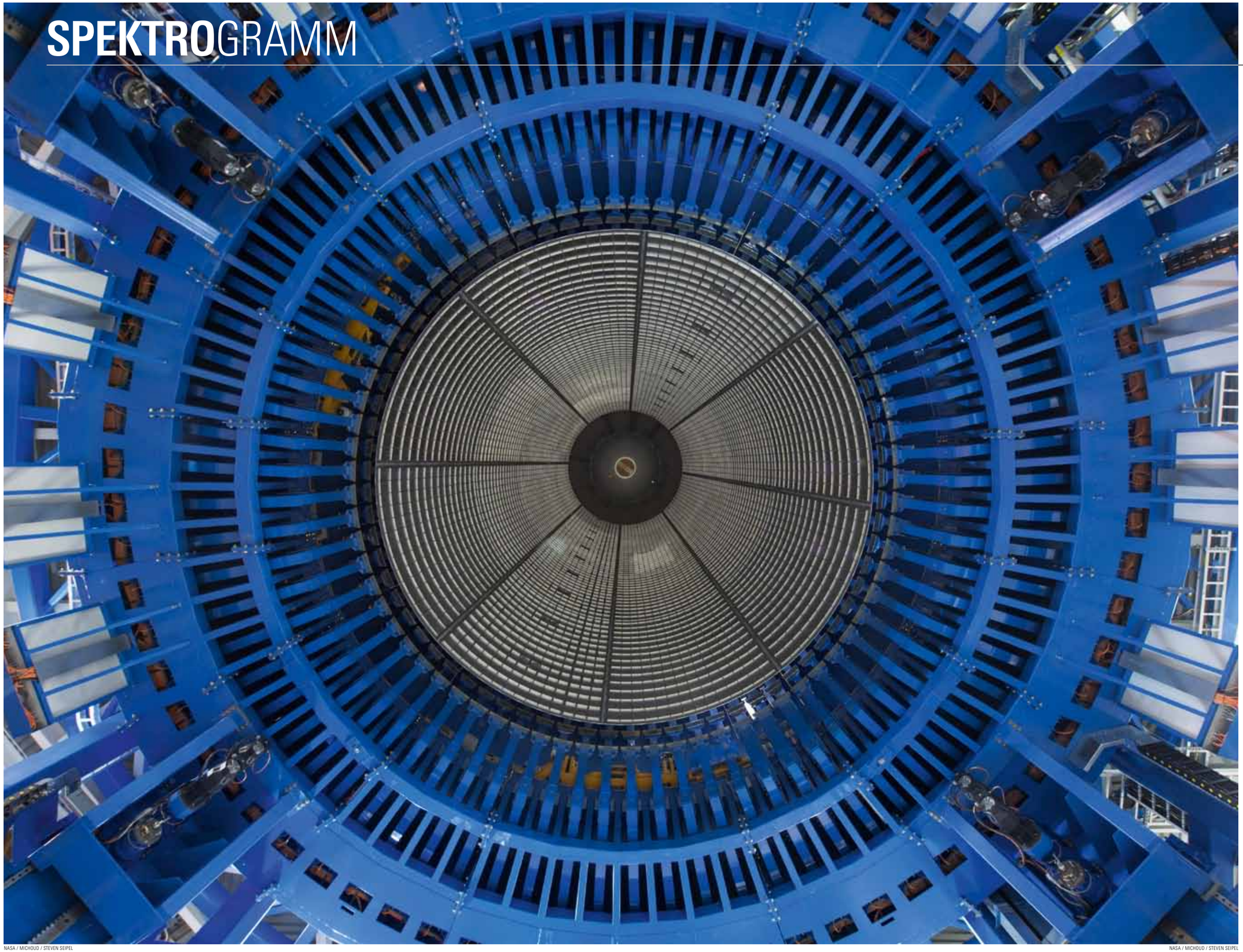
97 IMPRESSUM

98 VORSCHAU

Titelbild: Getty Images / Jun Nasaka; im Ballon: NASA / ESA / STScI, Steven Beckwith und das HUDF Team; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

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

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



NASA / MICHOUD / STEVEN SEIPEL

SCHWEISSARBEIT DER SUPERLATIVE

Noch fehlt der Deckel: Blick in den 40 Meter hohen Wasserstofftank des »Space Launch System« während der Montage. Mit dieser Trägerrakete will die Raumfahrtbehörde NASA künftig bemannte Missionen in den Weltraum schicken. Die Aluminiumkonstruktion wird mehr als zwei Millionen Liter flüssigen Wasserstoff fassen. Zahlreiche Metallarme (blau) fixieren die einzelnen Segmente (grau), während ein Roboter die Fugen mit einer Technik namens Rührreibschweißen hochpräzise und absolut dicht verbindet.

NASA

NASA / MICHOUD / STEVEN SEIPEL

FOTOLIA / GUSTAVOFRAZAO

Der Amazonas-Regenwald ist außerordentlich artenreich. Frühere Schätzungen, wonach er deutlich mehr als 10 000 Baumarten enthält, haben sich jetzt bestätigt.

BOTANIK

TAUSENDE BAUMARTEN IN AMAZONIEN

Es ist eine Fleißarbeit, die Hans ter Steege vom Naturalis Biodiversity Center in Leiden und seine Kollegen geleistet haben. Sie analysierten mehr als 530 000 digitalisierte Einträge mit Informationen über Samen, Früchte und Blätter, die zwischen 1707 und 2015 in Amazonien gesammelt worden waren. Am Ende erhielt das Team die zurzeit vollständigste Liste der dortigen bekannten Baumarten. Sie umfasst exakt 11 676 Spezies aus 1225 Gattungen und 140 Familien – ein Beleg für den enormen Artenreichtum des Amazonas-Regenwalds.

Die Zahl kommt der Schätzung von insgesamt etwa 16 000 Baumarten in Amazonien nahe, die ter Steege und Kollegen vor einigen Jahren publiziert hatten. Die Veröffentlichung stieß damals auf Kritik, da sie auf einer Hochrechnung basierte.

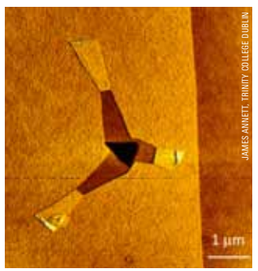
Weil bisher weder die gesamte Region noch sämtliche Pflanzenteile in derzeit existierenden Sammlungen systematisch untersucht wurden, harren wahrscheinlich noch tausende weitere Baumarten im Amazonas-Regenwald ihrer Entdeckung. Größere »weiße Flecken« gibt es nach wie vor im westlichen Amazonasgebiet Brasiliens, in Bolivien und im Bergland von Guayana.

Sci. Rep. 6, 29549, 2016

MATERIALFORSCHUNG

GEWOLLTER BÄNDERRISS

Durchsticht man die ein Atom dicke Kohlenstoffstruktur Graphen mit einer Diamantnadel, führt dies dazu, dass nanometerbreite Bänder des Materials einreißen, sich abschälen und übereinanderlegen – ein ebenso ungewöhnliches wie unerwartetes Verhalten. Im Zuge des Vorgangs entstehen mehrlagige Schichtstrukturen, die gegenüber dem einlagigen Graphen energetisch begünstigt sind, schreiben James Annett und Graham Cross vom Trinity College in Irland – die Entdecker des Phänomens. Das Durchstoßen der Graphenschicht setzt einen Prozess in Gang, bei dem teils über mehrere Mikrometer (millionstel Meter) hinweg die Kohlenstoffbindungen brechen und sich das Material übereinanderschiebt. Schwingungen der Diamantnadel helfen anscheinend dabei, den Vorgang gezielt anzustoßen.



JAMES ANNETT, TRINITY COLLEGE DUBLIN

Von durchstochenem Graphen schälen sich Bänder ab.

Mit Modellrechnungen können Annett und Cross nachvollziehen, welche thermodynamischen Kräfte dieses Verhalten antreiben. Ihr Ziel lautet, das Einreißen des Kohlenstofffilms gezielt zu steuern, um es technisch nutzen zu können. Dann ließen sich mehrlagige Graphenband-Strukturen ohne aufwändige Laser- oder Plasmamethoden herstellen. Eine Anordnung feiner, schwingender Nadeln reicht vielleicht schon, um entsprechende selbstorganisierende Prozesse in Gang zu setzen.

Graphenbänder unterscheiden sich von Graphenfilmen unter anderem in ihren elektrischen Eigenschaften. Sie eignen sich dadurch beispielsweise besser für den Einsatz als Schalter (Transistor) in der Computertechnik. Auch extrem feine Kondensatoren könnten sich mit aufgerollten Graphenbändern herstellen lassen.

Nature 535, S. 271–275, 2016

BIONIK

MUSKELZELLEN TREIBEN ROBOTERROCHEN AN

Rochen gleiten nicht nur elegant, sondern auch äußerst energieeffizient durchs Wasser. Das macht sie für Bioniker interessant. Nach dem Vorbild der Tiere haben Wissenschaftler um Kevin Kit Parker von der Harvard University einen etwa 16 Millimeter großen Softroboter konstruiert. Er bewegt sich mit wellenförmigen Flossenbewegungen vorwärts und wird mit Lichtsignalen gesteuert. Als Antriebseinheit dient ein Gewebe aus genetisch veränderten Herzmuskelzellen.

Der künstliche Rochen besteht aus vier Lagen eines weichen, transparenten Kunststoffs. Ein elastisches Skelett aus feinen Golddrähten verstärkt das Gebilde. Auf die unterste Kunststoffschicht brachten die Forscher etwa 200 000 Rattenherzmuskelzellen in einem serpentinenartigen Muster auf. Die Zellen waren zuvor mittels Einschleusen eines Algengens so verändert worden, dass sie sich auf Lichtsignale hin zusammenziehen. Richtet man eine Leuchtdiode auf das Kopfende des Softroboters, kommt eine Aktivierungs-

PALÄONTOLOGIE

PANZER DIENTE URSPRÜNGLICH ZUM GRABEN

Die Vorfahren der Schildkröten hatten noch keinen Panzer, aber als evolutionäre Vorstufe dazu verbreiterte Rippen. Das zeigt dieses besonders gut erhaltene, 260 Millionen Jahre alte Fossil eines *Eunotosaurus*, das ein achtjähriger Junge in Südafrika auf der Farm seines Vaters entdeckte. Evolutionsbiologen um Tyler Lyson vom Denver Museum of Nature and Science vermuten, dass diese anatomischen Veränderungen anfangs die Vorderbeine stabiler verankern sollten, welche die Tiere als Grabwerkzeuge nutzten. Erst später entwickelten die Rippen sich zu einem umhüllenden Panzer weiter, der dann als neue Aufgabe die Schutzfunktion übernehmen konnte.

Curr. Biol. 10.1016/j.cub.2016.05.020, 2016

Verliehen die flachen, breiten Rippen dem etwa handtellergroßen *Eunotosaurus* die nötige Kraft für unterirdische Schaufelbewegungen?

TYLER R. LYSON, DENVER MUSEUM OF NATURE AND SCIENCE

NASA / JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY / SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE

Pluto zeigt Anzeichen eines gefrierenden Ozeans unter seiner Oberfläche.

ASTRONOMIE
EIN OZEAN AUF PLUTO?

Tief unter der eisigen Kruste des Zwergplaneten Pluto gibt es möglicherweise noch heute große Mengen flüssigen Wassers, behaupten Forscher um Noah Hammond von der Brown University (Rhode Island, USA). Aufnahmen der NASA-Raumsonde »New Horizons« zeigen demnach Anzeichen dafür, dass sich die Pluto-Oberfläche ausdehnt; vermutlich, weil flüssiges Wasser darunter langsam gefriert. Dies macht die Existenz eines verborgenen Ozeans auf Pluto wahrscheinlich – und möglicherweise auch auf anderen Kuipergürtel-Objekten.

Der Gesteinskern des Zwergplaneten könnte genügend radioaktive Isotope enthalten, damit deren Zerfallswärme einen Teil des planetaren Eismantels flüssig hält. Doch da die Zerfallsintensität im Lauf der Zeit abnimmt, ist die Lebensdauer des Ozeans begrenzt. Um diesen Prozess genauer zu beschreiben, simulierten Hammond und sein Team die Entwicklung des Himmelskörpers unter verschiedenen Annahmen. Dabei stellten sie fest, dass sich die Abkühlung des verborgenen Ozeans auf Plutos Oberfläche abzeichnen sollte.

Grund hierfür sind die unterschiedlichen spezifischen Volumina von Wasser und Eis. Beim Gefrieren dehnt sich Wasser deutlich aus. Sollte in dem Zwergplaneten also tatsächlich ein Ozean erstarren, erwartet man Dehnungsstrukturen auf der Außenseite – ähnlich denen, die jetzt beobachtet wurden.

Wäre Plutos Eismantel bereits durchgefroren, ginge das Eis ab 260 Kilometer Tiefe wegen des hohen Drucks in eine dichtere Kristallstruktur über und der Planet würde schrumpfen. Von einer solchen Kontraktion sei auf Pluto aber nichts zu sehen, schreiben die Autoren. Das Innere des Planeten sei also wohl zum Teil flüssig.

Geophys. Res. Lett. 43, 10.1002/2016GL069220, 2016

welle in Gang, und die Kontraktionen der Herzmuskelzellen bewegen die Rochenflossen wellenförmig nach unten. Die anschließende Aufwärtsbewegung erfolgt passiv auf Grund der Elastizität des Skeletts.

Eine koordinierte Schwimmbewegung ist durch räumlich und zeitlich abgestimmte Aktivierung der Muskelzellen erreichbar. Werden etwa linke und rechte Flosse separat angesteuert, lässt sich der künstliche Rochen um Hindernisse herumlenken. Seine Geschwindigkeit hängt dabei von der Frequenz der Lichtimpulse ab. Im Vergleich zu echten Rochen wirkten die Schwimmbewegungen des Softroboters etwas ungelenk, seien aber fast ebenso effizient, berichten die Forscher. Ein Nachteil ist, dass der Cyborg-Rochen wegen seines Antriebs aus lebenden Zellen nur in physiologischer, temperierter Kochsalz-Glukose-Lösung funktioniert.

Science 353, S. 158–162, 2016

MEERESÖKOLOGIE
BESSERE SCHUTZGEBIETE FÜR HAIE

Rund um die Seychellen im Indischen Ozean wird ein Meeresschutzgebiet eingerichtet, von dem vor allem Schildkröten und Korallenriffe profitieren sollen. Inwieweit es auch Haie zu schützen vermag, haben nun Forscher um James Lea von der Meeresbiologischen Gesellschaft des Vereinten Königreichs in Plymouth (England) untersucht. Dreieinhalb Jahre lang verfolgten die Wissenschaftler die Wanderungen von 116 Haien fünf verschiedener Spezies mit Hilfe von akustischen Transmittern.

Auch 25 Schildkröten beobachteten sie auf diese Weise. Anschließend verglichen sie die Gebiete, in denen sich die Tiere bevorzugt bewegen, mit zwei vorgeschlagenen Varianten des Schutzgebiets.

Lea und sein Team stellten fest, dass die etwas größere Variante ganze 34 Prozent mehr von den Wanderungswegen der Meeresbewohner abdeckt als die kleinere Alternative. Auf Grund dieser Erkenntnisse hat sich die Regierung der Republik Seychellen für die größere Version des Schutzgebiets entschieden.

Proc. R. Soc. B 10.1098/rspb.2016.0717, 2016

SINNESWAHRNEHMUNG
MENSCHEN SEHEN EINZELNE PHOTONEN

Ein einziges Photon reicht offenbar aus, um eine visuelle Wahrnehmung beim Menschen auszulösen; das haben Wissenschaftler um Alipasha Vaziri von der Universität Wien nachgewiesen. Allerdings untersuchte das Team lediglich drei Probanden, die zudem alle männlich waren.

Zu Beginn des Experiments gewöhnten die Versuchsteilnehmer ihre Augen zunächst 40 Minuten lang an völlige Dunkelheit. Dann schauten sie in eine Apparatur, mit der es möglich ist, einzelne Lichtquanten (Photonen) zu erzeugen.

Auf Knopfdruck des Versuchsleiters ertönten nun kurz hintereinander zwei Signale. Entweder eines oder keines davon ging mit der Aussendung eines Photons einher, wobei die Probanden nicht wussten, was jeweils zutraf. Sie mussten aber in jedem Fall angeben, ob sie Licht gesehen hatten, und wenn ja, bei welchem Signal. Außerdem sollten sie auf einer Skala von eins bis drei beziffern, wie sicher sie sich in ihrem Urteil fühlten.

Bei insgesamt mehr als 2400 Durchläufen ergab die statistische Auswertung der Antworten, dass die Probanden mit ihren Einschätzungen häufiger richtig lagen, als bei Zufallstreffern durch bloßes Raten zu erwarten wäre. Außerdem waren sie bei zutreffenden Beobachtungen tendenziell sicherer in ihrem Urteil.

Die Trefferquote bei dem Experiment ist freilich von vornherein begrenzt, denn nur etwa jedes zehnte Photon erreicht überhaupt die lichtempfindlichen Stäbchenzellen in der Netzhaut der Teilnehmer. Die übrigen Lichtquanten werden auf dem Weg dorthin absorbiert oder gestreut, beispielsweise im Glaskörper des Auges.

Eine weitere Fehlerquelle liegt in dem Umstand begründet, dass Sinneszellen mitunter spontan feuern – das heißt auch bei völligem Fehlen äußerer Reize. Ein einzelnes Photon zu bemerken, sei daher kein normales Seherlebnis, sondern eher ein vages Gefühl an der Grenze zur Einbildung, schildert Vaziri.

Nat. Commun. 7, 12172, 2016

Unsere Neuerscheinungen!

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

Wie Bassrhythmen Emotionen auslösen • Wenn Blinde erstmals sehen • Synästhesie: Töne riechen und Farben schmecken • Wie Implantate den gestörten Gleichgewichtssinn verbessern können • € 8,90

Ökonomie: Vier Jahrhunderte Wohlstand • Prostitution: Das harte Geschäft mit der Lust • Sozialstruktur: Balance der Ungleichheiten • Medizin: Pompeji – Stadt der Ärzte • Landwirtschaft: Wein für alle • € 8,90

Ausgewählte Sonderhefte auch im PDF-Format

Hier bestellen:
service@spektrum.de | Tel.: 06221 9126-743
www.spektrum.de/neuerscheinungen

KOSMOLOGIE
BRISANTE DUNKLE ENERGIE

Eine Kraft treibt das Universum auseinander. Aber wie? Auch zwei Jahrzehnte nach seiner Entdeckung verstehen Theoretiker das Phänomen nicht. Nun sollen neue Experimente Klarheit schaffen.

MARKUS MARCETIC

NASA / ESA / J. COWLE JR.

Adam G. Riess (links) erhielt 2011 für die Entdeckung der beschleunigten Expansion gemeinsam mit zwei Kollegen den Physiknobelpreis. Er lehrt an der Johns Hopkins University in den USA. **Mario Livio** arbeitet als Astrophysiker am Space Telescope Science Institute in Baltimore, das unter anderem das Hubble-Weltraumteleskop betreibt. Er ist Autor mehrerer populärwissenschaftlicher Bücher.

spektrum.de/artikel/1417449

ISTOCK / SATURATED; IM BALLON: NASA / ESA / STSCI, STEVEN BECKWITH UND DAS HUDF-TEAM; COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Unser Universum wird ständig größer. Die Abstände zwischen Galaxien wachsen, Galaxienhaufen fliegen voneinander weg, und der leere Raum zwischen all diesen Objekten wird weiter und weiter. Das erkannten Astronomen bereits in den 1920er Jahren. Heute wissen sie obendrein: Dieser Vorgang verlangsamt sich nicht allmählich, sondern beschleunigt sich sogar rasant. Zwei beliebige Galaxien, die sich noch vor wenigen Minuten mit einer bestimmten Geschwindigkeit voneinander entfernten, driften in diesem Moment bereits schneller auseinander.

Zu dieser verblüffenden Erkenntnis kamen 1998 Adam G. Riess (einer der Autoren) sowie seine Kollegen. Gemeinsam mit Brian Schmidt von der Australian National University leitete Riess die Beobachtung und Vermessung ferner Sternexplosionen, so genannter Supernovae. Die Entdeckungen stimmten mit den im gleichen Jahr veröffentlichten Ergebnissen eines anderen Teams um Saul Perlmutter von der University of California in Berkeley überein, das eine ähnliche Methode verwendet hatte. Damit kamen die Astronomen nicht umhin, einen seltsamen Schluss zu ziehen: Irgendetwas verursacht eine immer schnellere Expansion des Weltalls. Aber was?

Inzwischen hat sich für die noch heute unbekannte Ursache dieses seltsamen Phänomens der Begriff »Dunkle Energie« eingebürgert. Auch nach fast zwei Jahrzehnten sind die Physiker kaum weiter damit gekommen, eine plausible Erklärung zu formulieren. Im Gegenteil: Neuere Untersuchungen verkomplizieren das Gesamtbild nur noch mehr, und einige Beobachtungen scheinen den bisher bevorzugten theoretischen Ideen sogar zu widersprechen.

Wir stehen also vor mehreren Rätseln. Was ist die Dunkle Energie? Warum ist sie anscheinend ungemein schwächer, als viele der einfacheren Ansätze nahelegen, und dennoch stark genug, dass wir sie entdecken konnten? Was bedeutet die Erscheinung für die ferne Zukunft des Kosmos? Möglicherweise sind die seltsamen Eigenschaften gar ein Hinweis auf rein zufällige Werte der Naturkonstanten. Das würde wiederum die Spekulation befeuern, unsere kosmische Heimat sei nur eine von vielen Parallelwelten, nur einer von unzähligen Teilen eines **Multiversums** (siehe Glossar S. 17) mit jeweils ganz verschiedenen physikalischen Spielregeln.

Glücklicherweise gibt es mittlerweile aufwändige Beobachtungskampagnen, mit denen Astronomen der Dunklen Energie gezielt und mit zuvor unerreichter Genauigkeit nachspüren (siehe den folgenden Artikel ab S. 18). Innerhalb des kommenden Jahrzehnts werden wir entweder die Ursache der beschleunigten kosmischen Expansion entdecken – oder die Lösung des Mysteriums auf unbestimmte Zeit vertagen müssen, weil wir alle gegenwärtig umsetzbaren Möglichkeiten und alle Ideen ausgeschöpft haben.

Im Moment haben Theoretiker noch verschiedenste konkurrierende Vorstellungen darüber, was die schnell wachsende Ausdehnung des Universums antreiben könnte. Ein besonders eleganter und daher von vielen Physikern bevorzugter Kandidat leitet sich aus den Eigenschaften des leeren Raums her und schlägt eine Brücke von der Kosmologie zur Quantenmechanik. Diese kennt kein Nichts. Stellen wir uns einen Kasten mit undurchdringlichen Wänden vor, aus dem wir alles restlos entfernen – Atome,

Leitet sich die Dunkle Energie aus den Eigenschaften des leeren Raums ab? Dann schlägt sie eine Brücke von der Kosmologie zur Quantenmechanik

Teilchen, Strahlung, Dunkle Materie. Im Inneren wäre dann ein perfektes Vakuum. Gemäß der klassischen Physik hätte es keine Energie. Doch die Quantenmechanik ermöglicht »virtuelle Teilchen«. Das sind Paare aus Teilchen und Antiteilchen, die spontan entstehen und sich nach kürzester Zeit gegenseitig wieder vernichten. Diese flimmernden subatomaren Objekte enthalten Energie, die genau wie Masse die Gravitation beeinflusst. Anders als Masse kann Energie allerdings auch einen negativen Druck ausüben, der statt zu einer anziehenden zu einer abstoßenden Kraft führt. Zumindest hypothetisch könnte daher der leere Raum das Universum auseinandertreiben. Diese Vorstellung entspricht einem Gedanken, den bereits Albert Einstein hatte, als er die **kosmologische Konstante** in seine Feldgleichungen einführte (siehe **Spektrum** März 2016, S. 40). Der Name dieser Größe deutet darauf hin, dass ihr Wert überall der gleiche ist und sich über Raum und Zeit hinweg nicht ändert.

Alternativ könnte es sich bei der Ursache der Dunklen Energie auch um ein **Quintessenz** genanntes Energiefeld handeln. Es durchdringt das Universum und versieht jeden Punkt des Raums mit einer Eigenschaft, die der anziehenden Gravitation entgegenwirkt. Physiker kennen solche Erschei-

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/dunkle-energie**

RÖNTGEN: NASA / CXC / UNIVERSITY OF VICTORIA, A. MANTZ ET AL.; OPTISCH: CFHT / UNIVERSITY OF VICTORIA, A. MAHDAVI ET AL.

AUF EINEN BLICK
THEORIEN VOR DER ZERREISSPROBE

1 Die Galaxien im All entfernen sich immer schneller voneinander. Doch die physikalische Ursache dafür ist unbekannt.

2 Theoretiker haben zwei Erklärungsansätze. Entweder verstehen wir die Gesetze der Schwerkraft nicht richtig, oder aber hinter allem steckt »Dunkle Energie«.

3 Für Dunkle Energie gibt es zurzeit zwei fundamental verschiedene Modelle. Jedes von ihnen hätte ganz andere, dramatische Konsequenzen für die ferne Zukunft des Kosmos.

nungen bereits aus dem Elektromagnetismus und der Gravitation. Sollte es sich auch bei der Dunklen Energie um ein Feld handeln, wäre dieses aber nicht zwangsläufig konstant. Dann hätte die Dunkle Energie einstmals kleiner oder größer sein können und folglich das Universum verschieden beeinflusst. Ebenso könnte sich damit in Zukunft die Wirkung der Quintessenz wandeln. Es gibt zwei radikal verschiedene Varianten, die für die Evolution unseres Universums ganz unterschiedliche Folgen hätten: Je nachdem, ob die Stärke der Dunklen Energie abnimmt oder wächst, würde unser All irgendwann entweder nicht weiter expandieren oder umso schneller auseinandergerissen werden.

Möglicherweise existiert die Dunkle Energie nicht, sondern das Phänomen beruht auf einer unvollständigen Theorie der Gravitation

Und schließlich gibt es noch die Möglichkeit, dass Dunkle Energie gar nicht existiert, sondern das Phänomen lediglich auf unserem falschen physikalischen Verständnis von Gravitation beruht. Eventuell erklären Einsteins allgemeine Relativitätstheorie und die bekannten Gesetze der Schwerkraft die beschleunigte Expansion deshalb nicht, weil die Theorien selbst unvollständig sind. Auf den extremen Skalen, die wir inzwischen beobachten, mag die Anziehungskraft unter Massen anders funktionieren, als wir heute denken. Folgt man dieser Argumentation, ergeben sich einige interessante Ansätze. Doch sie alle kranken daran, dass keiner zur Gesamtheit der verschiedenen Messdaten passt, die wir inzwischen haben.

Einige Ideen konnten mit Hilfe von Beobachtungen bereits ausgeschlossen werden – so etwa die Vermutung, die kosmische Beschleunigung beruhe auf grob ungleich verteilter Materie im All, oder auch die Vorstellung einer fehlerhaften Struktur des Raums. Im Moment räumen Kosmologen dem Konzept der Dunklen Energie daher deutlich bessere Erfolgschancen ein als der Idee eines modifizierten Gravitationsgesetzes. Jedoch befriedigt keine der bislang vorgeschlagenen Erklärungen für die Dunkle Energie wirklich.

Theorie und Experiment klaffen um 120 Größenordnungen auseinander

So folgt aus der kosmologischen Konstanten eine wesentlich stärkere Dunkle Energie, als wir beobachten können. Wenn man unbedarft an die Sache herangeht und für die Vakuumenergie einfach alle Werte der verschiedenen möglichen Quantenzustände aufsummiert, die in diesem brodelnden See von virtuellen Teilchen und Antiteilchen vorkommen sollten, erhält man einen um 120 Größenordnungen zu hohen Betrag. Um so viele Zehnerpotenzen weicht die Theorie von dem ab, was Astronomen tatsächlich messen! Dieser für jedes Modell vernichtend riesige Abstand zur Realität lässt sich zwar deutlich reduzieren, indem man weitere Annahmen macht und zum Beispiel Hypothesen wie die »Supersymmetrie« berücksichtigt. Bei diesem nicht bewiesenen Konzept hat jedes Teilchen einen unentdeckten, wesentlich schwereren Partner. Allerdings bleiben immer noch einige dutzend Größenordnungen Diskrepanz übrig. Das spricht nicht prinzipiell dagegen, dass sich die Dunkle Energie mit der kosmologischen Konstanten erklären lassen wird. Allerdings verlagert sich dann die Frage auf eine andere Unzulänglichkeit unseres Weltbilds: Warum bloß ist die Vakuumenergie so gering?

Der anderen möglichen Erklärung ergeht es kaum besser. Für das Feld, das die Dunkle Energie verursachen soll, nehmen die Theoretiker einfach an, das Minimum seiner potenziellen Energie liege sehr niedrig. So wird nur eine kleine Menge Dunkler Energie über das Universum verteilt, die zu den Beobachtungen passt. Das erscheint allerdings sehr willkürlich. Außerdem darf die Dunkle Energie in diesen Modellen – abgesehen von ihrer abstoßenden Wirkung – mit allen anderen Bestandteilen des Universums nur wenig wechselwirken. Auch das ist schwer zu erklären. Trotz dieser Probleme: Überzeugendere Ideen als kosmologische Konstante und Quintessenz gibt es derzeit nicht.

Dabei hängt die Zukunft unseres Universums entscheidend davon ab, was hinter der Dunklen Energie steckt, und jeder kleine Unterschied hätte dramatische Konsequenzen. Wenn tatsächlich die Energie des Vakuums Ursache ist, dann geht die beschleunigte Expansion unaufhörlich weiter. In etwa einer Billion Jahren wird unsere Milchstraße mit ihren unmittelbaren Nachbarn eine einzige, elliptische Galaxie gebildet haben. Alle anderen Galaxien entfernen sich unterdessen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit voneinander, so dass keine von ihnen mehr von hier aus wahrzunehmen sein wird. Selbst das uralte Nachglühen des Urknalls, das wir heute überall am Himmel als kosmische Hintergrundstrahlung messen, wird auf Wellenlängen gestreckt worden sein, welche die Größe des beobachtbaren Universums überschreiten, und damit unsichtbar. Diesem Szenario zufolge leben wir gerade zu einem recht günstigen Zeitpunkt mit vergleichbar guter Aussicht aufs All.

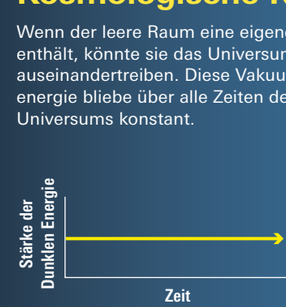
Sollte jedoch nicht die kosmologische Konstante, sondern ein noch unbekanntes Feld die Expansion antreiben,

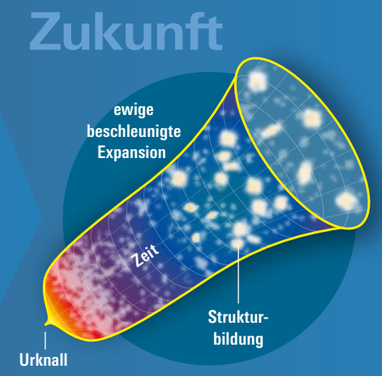
Drei Modelle der Expansion und Zukunft des Alls

Irgendetwas bewirkt, dass alle Galaxien im Universum sich immer schneller voneinander entfernen. Astronomen haben dafür keine eindeutige Erklärung, aber immerhin einen Namen: Dunkle Energie. Sie ziehen verschiedene Modelle für die Ursache in Betracht.

1 Kosmologische Konstante

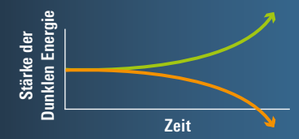
Wenn der leere Raum eine eigene Energie enthält, könnte sie das Universum auseinandertreiben. Diese Vakuumenergie bliebe über alle Zeiten des Universums konstant.

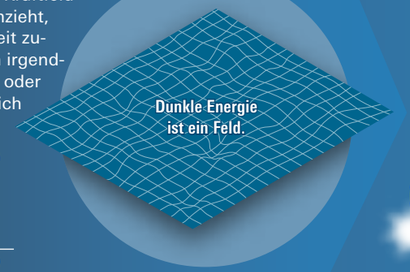


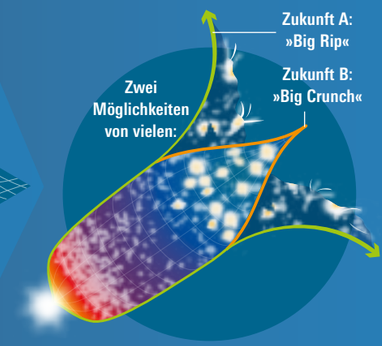


2 Quintessenz

Falls Dunkle Energie von einem Kraftfeld herrührt, das den Kosmos durchzieht, könnte dessen Stärke mit der Zeit zu- oder abnehmen. Dann zerrissen irgendwann entweder alle Strukturen, oder das Universum fiele wieder in sich zusammen.





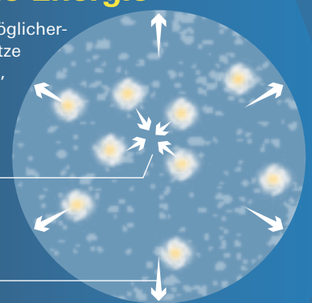


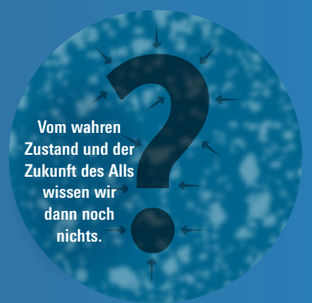
3 Es gibt keine Dunkle Energie

Die beobachteten Effekte beruhen möglicherweise lediglich darauf, dass die Gesetze der Schwerkraft anders funktionieren, als wir heute denken.

Auf der Skala von benachbarten Galaxien gehorchen Objekte der allgemeinen Relativitätstheorie.

Das Universum als Ganzes dehnt sich hingegen nur scheinbar beschleunigt aus. Um es korrekt zu beschreiben, sind neue Formeln nötig.

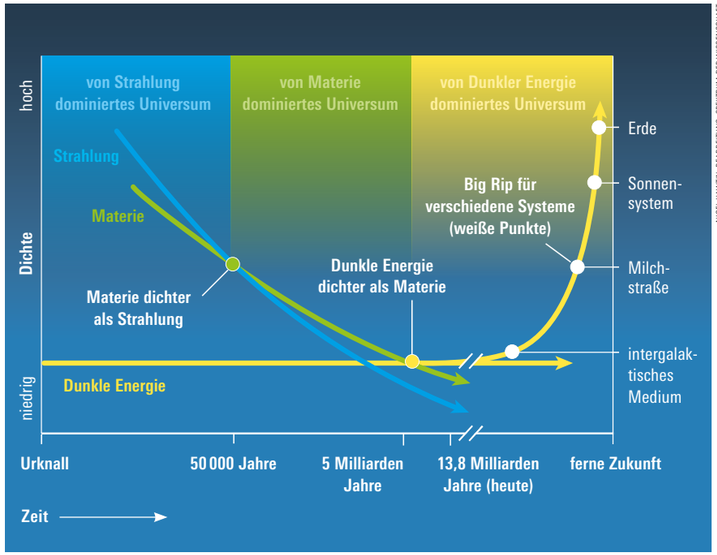




NIGEL HAWTIN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der dunkle Herrscher des Kosmos

Im Weltraum kommt nichts so reichlich vor wie Dunkle Energie. Daher ist ihr Einfluss dominant und wird die Zukunft des Alls bestimmen. Das war nicht immer so. In der Frühzeit des Alls hatten andere Bestandteile – Licht und Materie – die Oberhand. Erst mit seiner Ausdehnung dünnten Strahlung und Materie aus. Sollte die Dichte der Dunklen Energie weiter zunehmen, könnte sie dereinst in einem »Big Rip« alles zerfetzen, letztlich sogar Atome.



ergibt sich ein anderes Bild. Wie dieses aussieht, hängt ganz von der Entwicklung des Felds ab. Das Universum kann irgendwann seine Ausdehnung stoppen und wieder zusammenstürzen, wie in einem »Big Crunch«, der wie ein rückwärts ablaufender Urknall aussähe. Das andere Extrem wäre ein »Big Rip«, bei dem alle komplexen Objekte – von Galaxien bis hin zu atomaren Strukturen – allmählich von einer immer mächtigeren Dunklen Energie auseinandergerissen werden. Und auch ein Szenario wie bei der kosmologischen Konstanten wäre möglich: galaktische Isolation in einer völlig leer gefegten kosmischen Umgebung.

Möglicherweise entstanden unzählige Tochteruniversen mit verschiedenen physikalischen Eigenschaften

Für viele Theoretiker ist das Konzept der Vakuumenergie verführerisch, doch dann müssen sie auch ihren erstaunlich geringen Wert erklären. Das hat der Physiker Steven Weinberg von der University of Texas sogar schon erkannt, bevor die beschleunigte Expansion entdeckt wurde. Er schlug vor, die kosmologische Konstante nicht als etwas zu interpretieren, was durch die Naturgesetze eindeutig vorgegeben ist. Stattdessen beruhe ihr Wert eventuell auf purem Zufall. Wenn man eine Vielzahl möglicher Universen betrachte, funktioniere die Vakuumenergie in jedem von ihnen anders. In einigen dieser Parallelwelten wäre die Konstante bedeutend größer, und die Abstoßung wäre so heftig, dass Materie nie zu Galaxien zusammenklumpen und Planeten mit Leben bilden könnte. Doch offensichtlich existieren wir. Daraus folgerte Weinberg: Wir leben in einer Variante dieser Universen, in der die kosmologische Konstante zufällig gerade den richtigen Wert hat. Diese Vorstellung, welche andere Wissenschaftler wie Alexander Vilenkin von der Tufts University, Martin Rees von der University of Cambridge oder Mario Livio (einer der Autoren) weiterentwickelten, wird auch anthropisches Prinzip genannt.

Für die Vorstellung eines Multiversums mit zahllosen sehr verschiedenen Welten sprechen noch weitere Argumente. Beispielsweise blähte sich der weithin akzeptierten Urknalltheorie zufolge unser Universum im Bruchteil der ersten Sekunde seiner Entwicklung enorm auf. Vilenkin und Andrei Linde von der Stanford University wiesen nach, dass sich diese so genannte kosmische Inflation, sobald sie einmal begonnen hat, unmöglich wieder aufhalten lässt und immer von Neuem aufbrodelt. So könnten unendlich viele Tochteruniversen entstehen, voneinander vollkommen isoliert und mit ganz verschiedenen physikalischen Eigenschaften.

Ein Multiversum scheint auch bei Stringtheorien vorzukommen, die oft als Kandidaten für eine Vereinigung aller Naturkräfte gehandelt werden. Berechnet man etwa für einen speziellen Vertreter, die so genannte M-Theorie, wie viele Universen es geben könnte, landet man bei der irrwitzigen Menge von 10^{500} Parallelwelten, von denen jede einzelne möglicherweise einen individuellen Satz von Naturkonstanten und sogar Raumdimensionen hat.

Doch schon die bloße Erwähnung des Begriffs Multiversum erhöht bei vielen Physikern den Blutdruck. Denn das Konzept erscheint nicht nur spekulativ, sondern schlicht unüberprüfbar und wird unserer bewährten wissenschaftlichen Methode vielleicht niemals zugänglich sein. Ob es überhaupt gelingen kann, die Existenz von Paralleluniversen nachzuweisen, ist höchst fraglich.

Dennoch können wir versuchen, das Phänomen Dunkle Energie wenigstens in unserem eigenen Kosmos besser zu verstehen. Dazu müssen wir es genauer vermessen, und das geht am besten mit dem so genannten w-Parameter. Diese rechnerische Größe bezeichnet letztlich das Verhältnis vom Druck, den die Dunkle Energie ausübt, zu ihrer Dichte, also dazu, wie viel von ihr in einem gegebenen Volumen des Kosmos steckt. Sollte Dunkle Energie die Energie des Vakuums sein, wäre der w-Parameter stets konstant und gleich –1. Ist hingegen ein Feld ihre Ursache, das sich im Lauf der Zeit verändert, erwarten wir einen Wert, der von –1 abweicht. Und sollten wir die Gesetze der Gravitation modifizieren müssen, würden wir vermutlich verschiedene w-Parameter auf unterschiedlichen Skalen des Kosmos feststellen.

Astronomen haben gewitzte Strategien entwickelt, um Druck und Dichte der Dunklen Energie indirekt zu bestimmen. Da sie der normalen, stets anziehenden Schwerkraft entgegenwirkt, verhindert oder verändert sie etwa die Bildung von Galaxienclustern. Indem Wissenschaftler beobachten, wie solche Strukturen allmählich gewachsen sind, können sie bestimmen, wie stark die Dunkle Energie in diesen Phasen der Geschichte des Universums war. Dazu nutzen sie den so genannten schwachen Gravitationslinseneffekt, der darauf beruht, dass massereiche Objekte das Licht weit entfernter Galaxien ablenken und dadurch deren Form verzerrt erscheint.

Es gibt mehrere mögliche Messgrößen: Vom Licht entfernter Objekte bis zur Galaxienverteilung

Eine weitere Möglichkeit, etwas über Dunkle Energie zu erfahren, besteht darin, die Expansionsgeschwindigkeit des Universums zu verschiedenen Zeiträumen zu messen. Das gelingt den Forschern, indem sie die »Rotverschiebung« des Lichts von weit entfernten Quellen bestimmen – ein Effekt, der darauf beruht, dass sich die Wellenlänge allmählich gemeinsam mit dem umgebenden Raum streckt. Durch dieses Phänomen wurde die beschleunigte kosmische Expansion ursprünglich entdeckt. Es gibt noch weitere geeignete Größen, zum Beispiel »baryonische akustische Oszillationen«; das sind Schwingungen aus der Urzeit des Alls, die sich der heute sichtbaren Verteilung von Galaxien aufgeprägt haben (siehe dazu den Artikel ab S. 18, der die Methoden genauer darstellt).

Die meisten Ergebnisse passen mit einer relativ hohen Genauigkeit zu einem Wert des w-Parameters von –1. Das würde sich mit der Erklärung decken, dass die kosmologische Konstante die Expansion verursacht. Jedoch gab es in den letzten Jahren einige Messungen, die an diesem Bild kratzten. Beobachtungen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds ergaben in Kombination mit Untersuchungen der Materieverteilung mittels des schwachen Gravitationslinseneffekts einen Wert, der stärker negativ ist als –1. Das Gleiche gilt für Beobachtungen von mehr als 300 Supernovae bei einer Himmelsdurchmusterung mit dem Pan-STARRS-Teleskop. Dazu kommen neuere Beobachtungen von baryonischen akustischen Oszillationen bei sehr weit entfernten und besonders hellen Galaxien, so genannten Quasaren, die nahelegen, dass die Dunkle Energie bis heute zugenommen hat. Das sind viele Momentaufnahmen, aus denen sich aber leider noch keine klare Schlussfolgerung ziehen lässt. Wir brauchen mehr Daten, um die gemessenen Abweichungen entweder zu erhärten oder als fehlerhafte Ausreißer zu entlarven.

Dem haben sich neue Beobachtungskampagnen verschrieben, die in den nächsten Jahren bis zu 100-fach genauere Messwerte liefern könnten. Zu ihnen gehören der 2013 gestartete Dark Energy Survey, aber auch zukünftige Projekte wie das Large Synoptic Survey Telescope, das um das Jahr 2021 damit beginnen soll, die Strukturen des Alls zu kartieren. Hinzu kommen geplante Weltraumteleskope der US-amerikanischen und europäischen Raumfahrtbehörden, die ebenfalls in den 2020er Jahren ihren Betrieb aufnehmen sollen. Nicht nur Dinge in den entlegenen Winkeln des Universums werden uns bei der Suche nach der Quelle für die Dunkle Energie helfen. Auch hochpräzise Messungen innerhalb unseres Sonnensystems könnten aufschlussreich sein, um die Möglichkeit eines modifizierten Gravitationsgesetzes zu überprüfen. Dazu wird etwa Laserlicht auf den Mond gestrahlt und dort von Reflektoren zurückgeworfen, die Astronauten bei vergangenen Mondmissionen aufgestellt haben. Und auch mit ausgeklügelten Laborexperimenten suchen Forscher nach Lücken in unserem Verständnis von der Schwerkraft.

Alle, die sich mit Dunkler Energie befassen, blicken gespannt auf das kommende Jahrzehnt. Angesichts der vielen ambitionierten und aufwändigen Projekte, die sich dem Rätsel der beschleunigten kosmischen Expansion widmen, hegen wir die begründete Hoffnung, dass wir bald Antworten erhalten – Antworten, die uns nichts weniger offenbaren werden als die Zukunft unseres Kosmos. ◂

Glossar

Kosmologische Konstante Eine erstmals von Albert Einstein eingeführte Größe, die zu einer abstoßenden Kraft im All führen würde. Ihr Wert ist überall gleich und zu allen Zeiten unveränderlich. Theoretisch könnte sie durch das quantenmechanische Phänomen erklärt werden, dass selbst der leere Raum »Vakuumenergie« trägt.

Multiversum Die Gesamtheit der unendlich vielen Universen, die außerhalb unseres eigenen existieren könnten. Wenn sie alle unterschiedliche Eigenschaften besitzen, wären die Werte gewisser physikalischer Konstanten in unserer Realität schlicht Zufall.

Quintessenz Ein hypothetisches Energiefeld im Universum, das der anziehenden Gravitation entgegenwirkt. Anders als bei der kosmologischen Konstanten könnte es in der Vergangenheit stärker oder schwächer gewesen sein.

QUELLEN

Perlmutter, S. et al.: Measurement of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. In: Astrophysical Journal 517, S. 565–586, 1999

Riess, A. G. et al.: Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. In: The Astronomical Journal 116, S. 1009–1038, 1998

ASTRONOMIE

DAS DUNKELSTE GEHEIMNIS

Physiker vermessen in nie gekannter Präzision die Tiefen des Alls. Ihre Sehnsucht: Eine Erklärung für die beschleunigte Expansion des Kosmos.

JOSHUA FRIEMAN ist Kosmologe und Direktor des Dark Energy Survey. Er arbeitet als theoretischer Astrophysiker am Fermi National Accelerator Laboratory in Illinois und ist Professor am Kavli Institute for Cosmological Physics der University of Chicago.

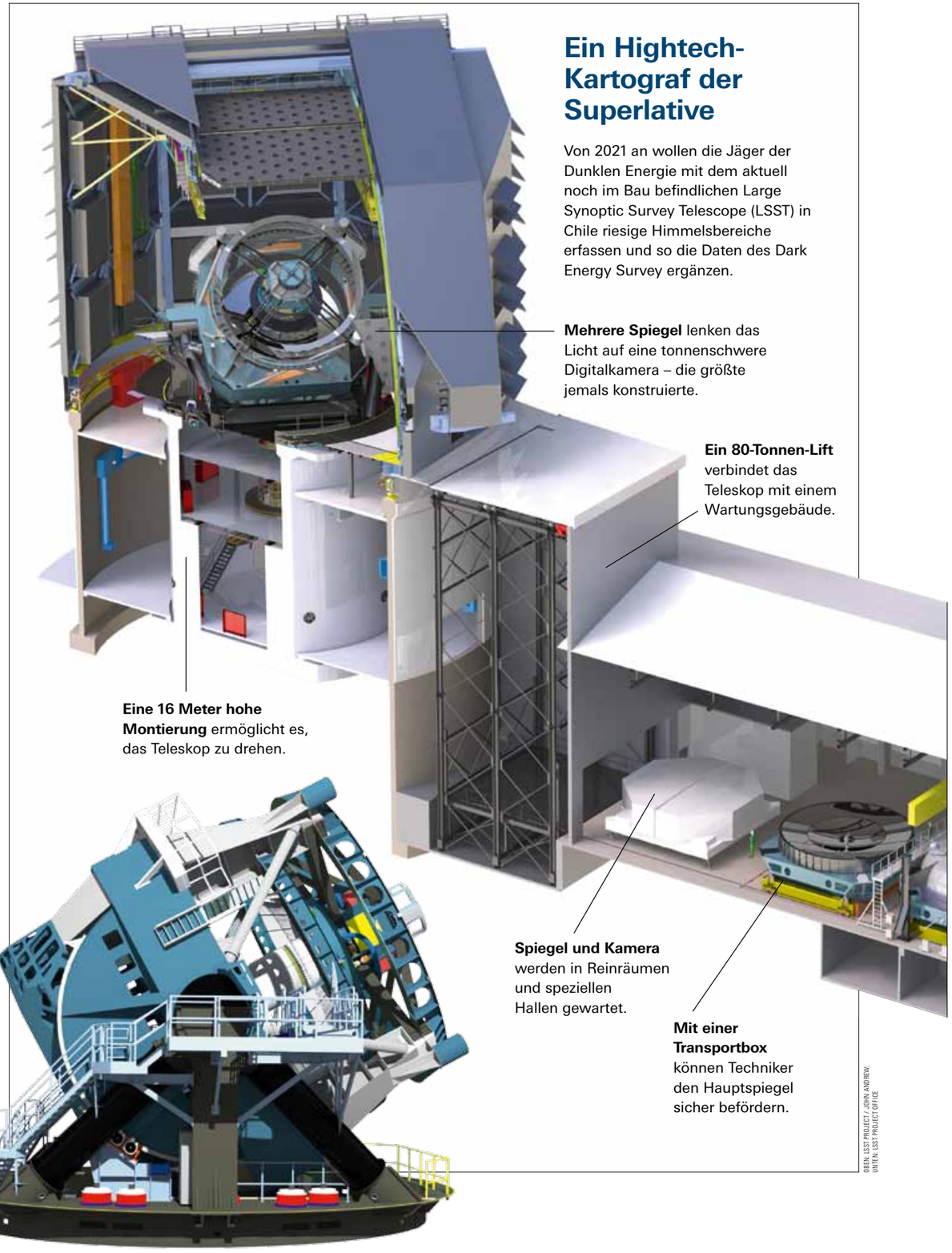
spektrum.de/artikel/1417450

An diesem Teleskop in Chile ist die Dark Energy Camera angebracht.

REIDAR HAHN / FERMILAB

Spektrum-Autor Joshua Frieman vor dem Vier-Meter-Teleskop, auf dem die Dark Energy Camera montiert ist.

FERMILAB / CTIO / BLANCO



Ein Hightech-Kartograf der Superlative

Von 2021 an wollen die Jäger der Dunklen Energie mit dem aktuell noch im Bau befindlichen Large Synoptic Survey Telescope (LSST) in Chile riesige Himmelsbereiche erfassen und so die Daten des Dark Energy Survey ergänzen.

Mehrere Spiegel lenken das Licht auf eine tonnenschwere Digitalkamera – die größte jemals konstruierte.

Ein 80-Tonnen-Lift verbindet das Teleskop mit einem Wartungsgebäude.

Eine 16 Meter hohe Montierung ermöglicht es, das Teleskop zu drehen.

Spiegel und Kamera werden in Reinräumen und speziellen Hallen gewartet.

Mit einer Transportbox können Techniker den Hauptspiegel sicher befördern.

OBEN: LSST PROJECT / JOHN ANDREW; UNTEN: LSST PROJECT OFFICE

Vor einem Jahrhundert entdeckten Astronomen Erstaunliches: Nahezu alle Galaxien scheinen sich von der Milchstraße wegzubewegen – und zwar mit umso höherer Geschwindigkeit, je weiter sie entfernt sind. Diese Erkenntnis veränderte unser Bild vom Kosmos tief greifend. 1998 stießen die Forscher auf ein noch verblüffenderes Phänomen: Irgendetwas beschleunigt diese Expansion sogar fortlaufend (siehe Artikel ab S. 12). In den Jahrzehnten davor waren sie davon ausgegangen, dass die gegenseitige Anziehungskraft aller Massen die Galaxienflucht mit der Zeit abbremsen würde. Doch das Gegenteil ist der Fall, wie zwei Teams feststellten. Für diese inzwischen vielfach bestätigte Entdeckung erhielten die drei leitenden Physiker Saul Perlmutter, Adam Riess (Koautor des vorherigen Artikels) und Brian Schmidt 2011 den Nobelpreis.

Theoretiker haben zwei grundlegend verschiedene Erklärungsansätze. Der erste geht davon aus, wir verständen die Gesetze der Schwerkraft noch nicht richtig. Vielleicht ändert sie ihren Charakter bei sehr großen Entfernungen und wirkt schließlich sogar abstoßend. Die zweite Idee postuliert die Existenz einer unsichtbaren Substanz. Messungen zeigen: Diese »Dunkle Energie«, sofern sie existiert, macht 70 Prozent der Gesamtenergie des Universums aus. Normale Materie, also das, woraus Sterne, Planeten und wir Menschen bestehen, trägt lediglich fünf Prozent bei. Der Rest entfällt auf die Dunkle Materie, die nicht minder rätselhaft ist als die Dunkle Energie (siehe **Spektrum** November 2015, S. 42), aber trotz des Namens nichts direkt mit ihr zu tun hat.

Diese Vorstellung ziehen die meisten Wissenschaftler einer bei sehr großen Abständen veränderten Gravitation vor. Wie können wir sicher sein, dass tatsächlich eine Dunkle Energie die beschleunigte kosmische Expansion verursacht? Und wenn es sie gibt, was ist dann ihre physikalische Natur? Astronomen riefen 2013 ein ambitioniertes Projekt ins Leben, um diese Fragen zu beantworten, den Dark Energy Survey (DES).

Mit dem DES wollen die Forscher mit zuvor unerreichter Genauigkeit Daten über die etwa 13,8 Milliarden Jahre währende Expansionsgeschichte des Kosmos und das Wachstum großräumiger Strukturen erhalten – die riesigen Ansammlungen von Galaxien, die das Universum durchziehen. Sie hoffen, so einige theoretische Modelle für die beschleunigte Expansion stärken zu können und andere auszuschließen, um dieses Phänomen insgesamt endlich besser zu verstehen. Mehr als 400 Wissenschaftler von 25 Institutionen in den USA, Spanien, Großbritannien, Brasilien, Deutschland und der Schweiz beteiligen sich am DES. Gemeinsam haben sie das Herzstück des Surveys gebaut, die Dark Energy Camera, betreiben sie und werten die damit gewonnenen Daten aus. Dieses Vorhaben leite ich.

AUF EINEN BLICK
VORTASTEN IN DIE FINSTERNIS

1. Eine Kraft treibt das Universum auseinander. Das Wesen dieser »Dunklen Energie« ist noch rätselhaft.
2. Um verschiedene Erklärungsmodelle zu überprüfen, beobachten Astronomen mit dem bislang aufwändigsten Projekt dieser Art systematisch weite Himmelsregionen.
3. Die Forscher setzen auf eine große Vielfalt aufschlussreicher Signale – von Schallwellen aus der Frühzeit des Universums bis hin zu Daten über Form und Verteilung hunderter Millionen Galaxien.

Der DES soll eine hoch aufgelöste Karte mit Sternexplosionen und 200 Millionen Galaxien liefern

2012 haben mein Team und ich die Kamera am Vier-Meter-Teleskop des Cerro Tololo Inter-American Observatory installiert, einer Sternwarte in den nordchilenischen Anden. Bereits im September jenes Jahres machten wir die ersten Aufnahmen. Nach einer längeren Testphase begann am 31. August 2013 der Dark Energy Survey offiziell und durchmustert seither große Teile des Südhimmels. Die Beobachtungen laufen fünf Jahre lang von August bis Februar, wir haben also bereits die dritte Saison hinter uns. Insgesamt soll der DES eine hoch aufgelöste Karte eines Achtels des Himmels mit 200 Millionen Galaxien liefern sowie einen Katalog von Sternexplosionen, mit denen sich die Expansion vermessen lässt. Das Projekt hat schon sehr viele Daten erbracht, die wir derzeit analysieren.

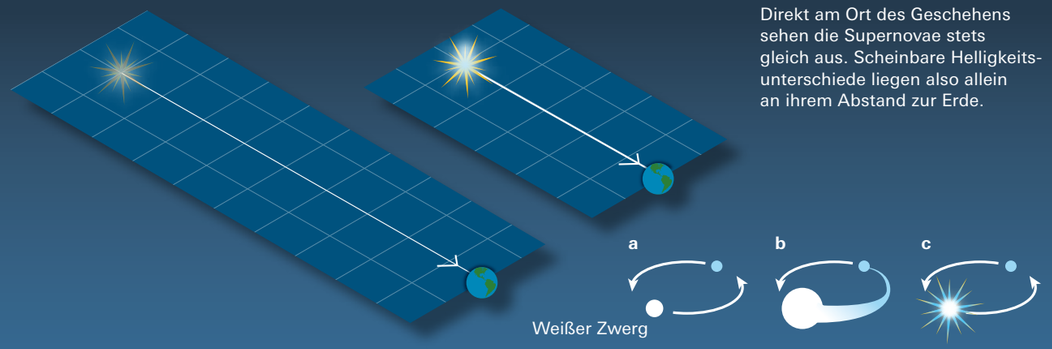
Die Anhaltspunkte, um zwischen den beiden grundsätzlichen Möglichkeiten einer modifizierten Gravitation und einer Beschleunigung durch Dunkle Energie zu unterscheiden, dürften sich zugleich eignen, um die physikalische Natur Letzterer zu entschlüsseln – sofern es sie denn gibt. Bei der Dunklen Energie verfolgen Theoretiker wiederum zwei Hauptideen (siehe Artikel ab S. 12). Die erste mögliche Ursache scheint der Intuition zu widersprechen: Demnach handelt es sich um eine Energie des leeren Raums. Hier entstehen fortwährend Materie sowie Antimaterie und vernichtet sich wieder in Sekundenbruchteilen.

Mit diesem Phänomen ließen sich die Dunkle Energie und damit die beschleunigte Expansion im Prinzip erklären, mathematisch ausgedrückt durch eine »kosmologische Konstante«, welche in die bestehenden Gleichungen einfließt. Der Pferdefuß bei dieser Lösung ist, dass die Quantenphysik für die Energie des Vakuums zunächst einmal einen Wert erwarten lässt, der irrsinnige 120 Zehnerpotenzen über dem tatsächlich gemessenen liegt. Zwar können zusätzliche Annahmen diese Diskrepanz reduzieren, jedoch entwickelten Kosmologen wegen solcher Probleme weitere Ideen für die Dunkle Energie.

Der zweite Ansatz ist ein allgegenwärtiges Feld mit einem bislang unentdeckten Teilchen. Dabei könnte es sich um einen entfernten Verwandten des berühmten Higgs-Bosons handeln: mit prinzipiell vergleichbaren Eigenschaften, aber um 44 Größenordnungen leichter. Dieses Modell wird auch als Quintessenz bezeichnet. Man kann sich das Teilchen grob vereinfacht als Ball veranschaulichen, der an jedem Punkt des Raums bergab rollt. Währenddessen nimmt seine

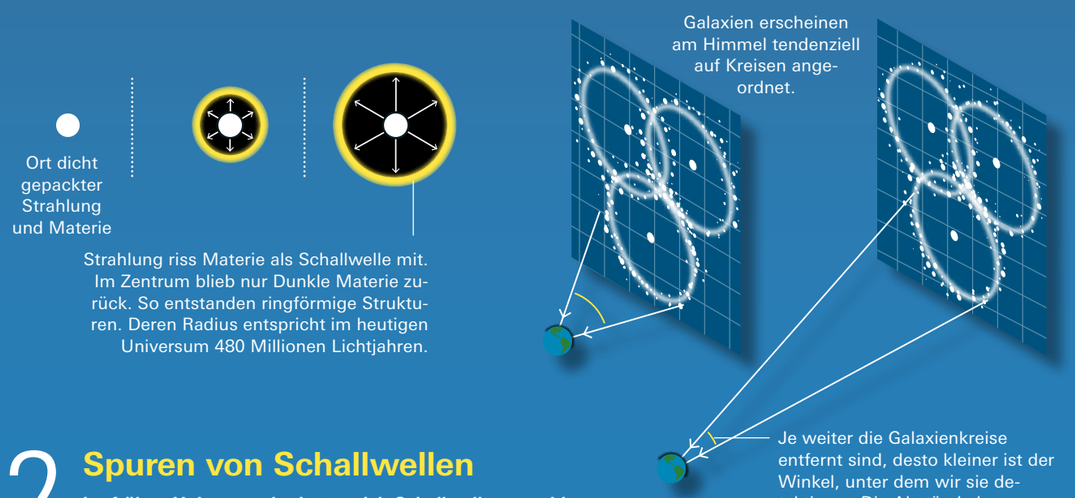
Vier Schlüssel zur kosmischen Expansion

Das Universum dehnt sich immer schneller aus. Mit dem Dark Energy Survey (DES) wollen Astronomen herausfinden, warum. Dazu beobachten sie vier unterschiedliche Phänomene.



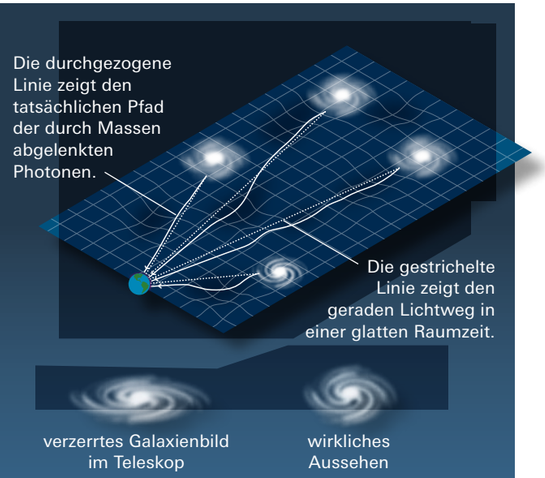
1 Supernovae des Typs Ia

Bestimmte Explosionen dichter Sterne sind immer ähnlich hell. Ihre scheinbare Leuchtkraft am Himmel liegt demnach nur an unterschiedlichen Entfernungen. Solche Ereignisse vollziehen sich vermutlich, wenn ein Weißer Zwerg einem nahen Objekt, mit dem er sich in einem Doppelsystem bewegt (a), Materie entreißt (b) und schließlich beim Erreichen einer definierten Grenzmasse explodiert (c).



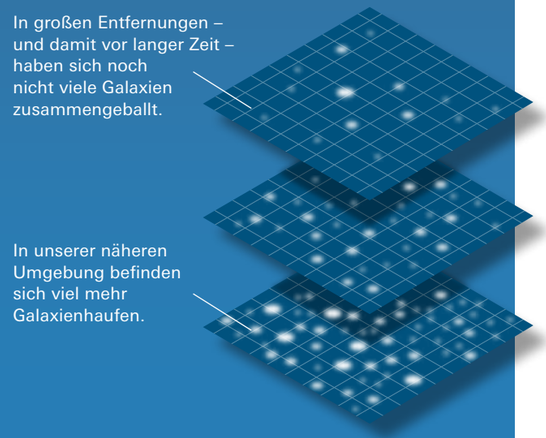
2 Spuren von Schallwellen

Im frühen Universum breiteten sich Schallwellen aus, bis sich der Kosmos genug abkühlte und Atome entstanden. Die von den Wellen bis dahin zurückgelegte Strecke entspricht im heutigen All 480 Millionen Lichtjahren. Die Distanz prägte sich den Strukturen auf und zeigt sich als kleiner Materieüberschuss auf kugelförmigen Schalen mit ebendiesem Radius. Wir nehmen sie als schwache Ringe von Galaxien wahr.



3 Gravitationslinsen

Die Schwerkraft massereicher Regionen lenkt das Licht auf dem Weg zur Erde ab und verzerrt Bilder im Teleskop. Im DES vermessen die Forscher viele Millionen Galaxien, vergleichen sie mit der vermuteten wahren Form und erstellen so eine Karte der unsichtbaren Materie zwischen diesen Objekten und der Erde.



4 Galaxienhaufen

Die Gravitation zieht einzelne Galaxien allmählich zu Haufen zusammen. Forscher kartieren viele dieser Gebilde und erfahren so etwas über die zeitliche Entwicklung der kosmischen Strukturen und wie die Dunkle Energie sie beeinflusst hat.

NIGEL HAWTIN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

NIGEL HAWTIN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Lageenergie ab. Wenn das Quintessenz-Teilchen extrem leicht ist, läuft es im heutigen All erst sehr langsam, besitzt also noch relativ wenig Bewegungsenergie. Dann ähnelt der Effekt dem Einfluss der Vakuumenergie, wäre aber nicht zu allen Zeiten des Alls gleich.

Um endlich auf breiter Datenbasis zwischen diesen möglichen Ursachen der kosmischen Expansion unterscheiden zu können, untersuchen wir mit dem Dark Energy Survey insgesamt vier kosmische Erscheinungen. Jede betrifft eine andere beobachtbare Größe. Daher sollten etwaige Messfehler die einzelnen Tests auch nicht gleichermaßen beeinträchtigen, was das Gesamtbild von systematischen Verzerrungen weitgehend befreit. Bei den vier Phänomenen handelt es sich um: Supernovae, Spuren so genannter primordialer Schallwellen, Gravitationslinsen und Galaxienhaufen. Zusammen verraten uns diese Dinge, wie schnell das Universum in verschiedenen Epochen seit seiner Entstehung gewachsen ist und wie sich die Materie angeordnet hat.

In der kosmischen Frühzeit wirkte die Gravitation der Expansion noch recht effektiv entgegen und ließ großräumige Strukturen entstehen. Doch als das Universum einige Milliarden Jahre alt war, dünnte die Materie stark aus. Die Beschleunigung gewann die Oberhand über die Schwerkraft

Wie können wir sicher sein, dass tatsächlich eine Dunkle Energie die kosmische Expansion verursacht?

und stoppte so die weitere Strukturbildung auf großen Skalen. Vakuumenergie, Quintessenz und modifizierte Gravitation würden dabei jeweils einzigartige Spuren in der Geschichte der Expansionsrate und der Verteilung kosmischer Objekte hinterlassen – Spuren, die wir aus den vier Phänomenen herauslesen können. Supernovae vom Typ Ia sind Explosionen so genannter Weißer Zwerge, wenn diese kleinen, dichten Sterne eine ganz bestimmte Massegrenze überschreiten. Der Helligkeitsverlauf ist bei solchen speziellen Leuchterscheinungen stets nahezu identisch. Falls wir sie auf der Erde mal schwächer und mal deutlicher sehen, liegt das also ausschließlich an den unterschiedlichen Entfernungen, in denen sich das Feuerwerk abspielt. Wegen dieser Eigenschaft nutzen Astronomen die Supernovae des Typs Ia schon lange als kosmische Messlatten oder »Standardkerzen«. Mit ihnen wurde 1998 auch die kosmische Beschleunigung entdeckt.

Der DES beobachtet alle paar Nächte die gleichen Himmelsregionen, um neu auftretende Explosionen aufzuspüren und damit präzise Distanzen im nahen und fernen Kosmos zu bestimmen. Dabei geraten 100-mal mehr ins Visier, als 1998 bekannt waren. Mit anderen Teleskopen messen wir die Veränderung im Spektrum der Supernovae, die uns angibt, wie stark sich der Weltraum zwischen dem Aussenden der Strahlung und ihrer Ankunft auf der Erde gestreckt hat. Diese »Rotverschiebung« liefert uns einen Hinweis darauf, wie klein das All zum Zeitpunkt der jeweiligen Sternexplosion war. Zusammen mit der Entfernungsmessung aus der Helligkeit rekonstruieren wir dann mit hoher Genauigkeit

die Expansionsgeschichte des Universums in den vergangenen zehn Milliarden Jahren. Damit sollte es gelingen, zwischen unterschiedlichen Theorien der kosmischen Beschleunigung zu unterscheiden, denn jede Ursache führt zu etwas anderen Effekten.

Um verschiedene Modelle zu testen, müssen wir die Rotverschiebungen extrem genau vermessen

Treibt beispielsweise die Quintessenz den Prozess an, hätte die zunehmende Expansion etwas später eingesetzt als bei Varianten der Vakuumenergie und wäre auch langsamer angewachsen. Bei einer gegebenen Rotverschiebung wären Supernovae daher heller und damit näher. Wenn dagegen die Gravitation auf kosmischen Skalen nicht so funktioniert wie bislang angenommen, würden die weit entfernten Supernovae wiederum ein anderes Bild liefern, wobei hier die Einzelheiten von der genauen Art der modifizierten Schwerkraft abhängen. Die Vorhersagen aus den unterschiedlichen Modellen weichen nur geringfügig voneinander ab. Deshalb sind sehr genaue Messungen notwendig, um diese Differenzen in den Daten zu entdecken. Wir möchten das Verhältnis von Entfernung zu Rotverschiebung erstmals auf wenige Prozent genau bestimmen.

Der DES nutzt als weitere Messgröße ein Überbleibsel aus der Anfangszeit des Kosmos. Damals zog die Schwerkraft alle Materie zusammen, während der Druck der elektromagnetischen Strahlung dieser Kompression entgegenwirkte. Der Wettstreit erzeugte Schallwellen in Form von Dichteschwankungen. Einige hunderttausend Jahre nach dem Urknall hatte sich das All so weit abgekühlt, dass sich das ionisierte Gas in elektrisch neutrale Atome verwandelte und diese Wechselwirkungen ausklangen. Die bis dahin von den Schallwellen zurückgelegte Strecke, die im heutigen Kosmos einer Entfernung von 480 Millionen Lichtjahren entspricht, spiegelt sich in den sichtbaren Strukturen wider: Zwei Galaxien haben mit etwas größerer Wahrscheinlichkeit ebendiesen Abstand zueinander als irgendeinen anderen.

Wie bereits die Supernovae kann auch die Größe dieser »baryonischen akustischen Oszillationen« (BAO) als zusätzliche Messlatte für kosmische Entfernungen dienen. Dafür müssen wir die Länge des Maßes kennen – die genannten 480 Millionen Lichtjahre – und den Winkel erfassen, unter dem es am Himmel erscheint. Dieser ist umso kleiner, je weiter entfernt die Objekte sind. Mit der Durchmusterung registrieren wir den BAO-Fingerabdruck in der Verteilung von 200 Millionen Galaxien. Wie bei den Sternexplosionen können wir auch hier den Zusammenhang zwischen Entfernung und Rotverschiebung untersuchen und auf die Expansionsgeschichte und ihre Ursachen schließen.

Unser dritter Test ist eine Folge aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie, die beschreibt, wie das Gravitationsfeld naher Massen Lichtstrahlen verbiegt. Ist die Ablenkung durch diesen »Gravitationslinseneffekt« stark, kommt es zu dramatischen Erscheinungen: Ferne Galaxien hinter näher bei uns liegenden Galaxienhaufen werden scheinbar zu langen, dünnen Bögen auseinandergezogen oder tauchen als mehrere Einzelbilder auf. Das ist aber die Ausnahme. Die Lichtstrahlen der allermeisten Galaxien sind nur geringfügig gekrümmt. Diese kaum mehr erkennbare Verzerrung bezeichnen wir als schwachen Gravitationslinseneffekt. Am Himmel eng benachbarte Galaxien derselben Entfernung sollten einem vergleichbar schwachen Effekt unterliegen. Wenn wir das Aussehen vieler Objekte in einem Himmelsabschnitt messen, sollten wir all die kleinen Verzerrungen bestimmen können – und damit auch die Verteilung der zwischen uns und diesen Galaxien liegenden Materie. Führen wir solche Messungen für viele Regionen durch, so erzeugen wir eine Karte der Massenverteilung im All (siehe »Eine Karte der Masse«, S. 26). Deren zeitliche Entwicklung dokumentiert das Wechselspiel zwischen der Schwerkraft und der kosmischen Beschleunigung und hilft uns ebenfalls, zwischen den Erklärungsansätzen zu unterscheiden.

Dafür vermessen wir die Form von 200 Millionen Galaxien; 20-mal mehr und obendrein aus einer erheblich größeren Himmelsregion als bei früheren Untersuchungen des schwachen Gravitationslinseneffekts. So erhalten wir die beste Karte der kosmischen Materieverteilung und zugleich

Die Schallwellen nach dem Urknall prägten ein Muster in die Verteilung der Galaxien

einen Einblick in deren zeitliche Entwicklung, weil große Entfernungen weit zurückliegenden Epochen des Universums entsprechen. Das Ergebnis hängt wiederum davon ab, was den Kosmos auseinandertreibt. Der Einfluss der Quintessenz würde beispielsweise die Bildung großer Strukturen früher behindern als die Vakuumenergie. Dann dürften wir folglich mehr Verdichtungen im jungen Kosmos erwarten. Diese beiden Aussagen erscheinen auf den ersten Blick widersprüchlich, da doch die Quintessenz den Vorgang unterbindet. Aber gerade deshalb hätte Materie umso früher zusammenklumpen müssen, um die heute sichtbaren Gebilde überhaupt noch produzieren zu können.

Als viertes Maß dienen Galaxienhaufen. Diese Ansammlungen von bis zu einer Billiarde Sonnenmassen sind die größten gravitativ gebundenen Objekte im Universum. Frühere Durchmusterungen waren jeweils auf kleine Himmelsregionen beschränkt. Mit dem DES wollen wir nun zehntausende Galaxienhaufen aufspüren, die bis zu mehrere Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind.

Die Dark Energy Camera kann Galaxien, Galaxienhaufen und Supernovae schnell registrieren

Die Forscher vergleichen dann die Zahl der Galaxienhaufen in unserer näheren Umgebung (also im heutigen All) mit der Menge in großer Entfernung (und damit in der Vergangenheit). Ganz ähnlich wie beim schwachen Gravitationslinseneffekt erwarten wir im Fall der Quintessenz mehr Galaxienhaufen im frühen Kosmos als bei der Vakuumenergie. Das alles ist nur möglich dank des Kernstücks unseres Projekts: der leistungsstärksten Kamera, die je für derlei Untersuchungen entwickelt wurde. Die am Vier-Meter-Teleskop Victor M. Blanco in Chile montierte Dark Energy Camera ist so konstruiert, dass sie zahlreiche Objekte wie Galaxien, Galaxienhaufen und Supernovae in kürzester Zeit registrieren

kann. Das empfindliche Gerät mit 570 Megapixeln visiert mit fünf großen Linsen weite Bereiche des Universums auf einmal an. Jedes Bild erfasst eine Region, die rund 20-mal so groß ist wie die scheinbare Fläche des Monds.

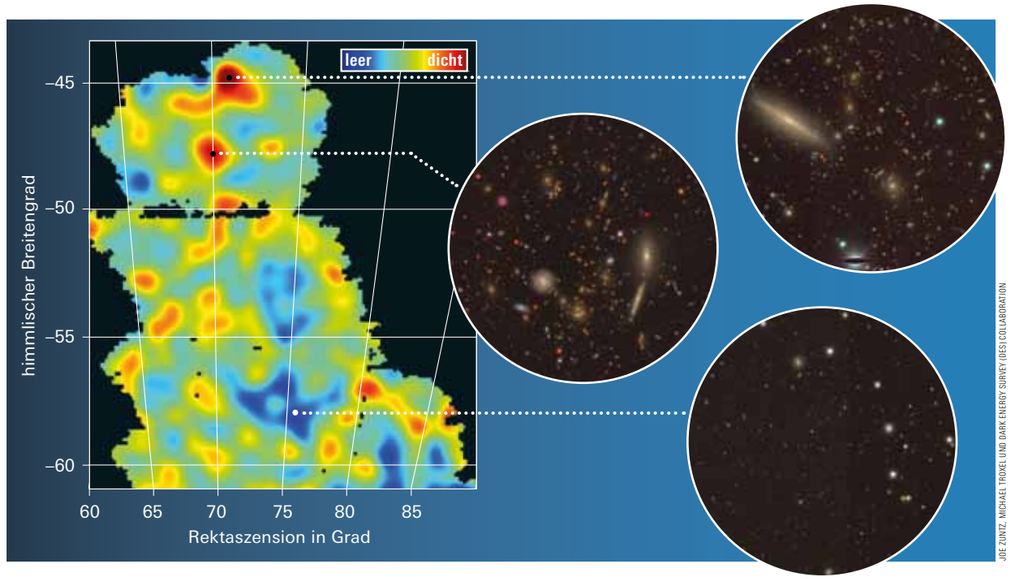
Seit dem Betriebsbeginn im August 2013 hat der Survey nahezu 5000 Quadratgrad durchmustert (zum Vergleich: Der Mond nimmt nur etwa ein fünftel Quadratgrad ein) und dabei bereits Farbbilder von 100 Millionen Galaxien geliefert. Zudem konnten wir 1000 Supernovae vom Typ Ia aufspüren. Unser Team misst auch die Formen der Galaxien auf der Suche nach dem schwachen Gravitationslinseneffekt, identifiziert ferne Galaxienhaufen sowie deren Eigenschaften und untersucht die räumliche Verteilung der Galaxien auf der Suche nach baryonischen akustischen Oszillationen. Gegen Ende 2016 sollte die erste Phase der Analyse beendet sein. Unterdessen hat das Experiment ganz nebenbei zu einer Reihe interessanter astrophysikalischer Entdeckungen geführt. Dazu gehören zahlreiche extrem leuchtschwache Kandidaten für Zwerggalaxien in der Nachbarschaft der Milchstraße. Sie enthalten sehr wenige Sterne und zählen zu den Objekten mit dem größten Anteil an Dunkler Materie im Kosmos. Ihre geringe Leuchtkraft macht es schwer, sie aufzuspüren. Aber Astronomen halten sie für bedeutsame Bausteine großer Galaxien wie unserer Milchstraße und hoffen außerdem, durch ihre Untersuchung mehr über die Dunkle Materie zu erfahren.

Die Beobachtungskampagne liefert währenddessen ständig weitere Daten. Wir wissen zwar noch nicht, ob damit definitive Antworten möglich sein werden. Können wir zwischen Dunkler Energie und modifizierter Gravitation entscheiden? Zwischen Vakuumenergie und Quintessenz? Doch wir sind davon überzeugt, dass uns der Dark Energy Survey einen gewaltigen Schritt voranbringt, um eines der größten Geheimnisse der Kosmos endlich zu lüften. ◂

QUELLEN

Bechtol, K. et al.: Eight New Milky Way Companions Discovered in First-Year Dark Energy Survey Data. In: Astrophysical Journal 807, 50, 2015

Chang, C. et al.: Wide-Field Lensing Mass Maps from Dark Energy Survey Science Verification Data. In: Physical Review Letters 115, 051301, 2015



Eine Karte der Masse

Diese Übersicht zeigt, wie sich die Materie im All über etwa 140 Quadratgrad des Nachthimmels verteilt. Das entspricht etwa der 650-fachen scheinbaren Fläche des Vollmonds. Rote Regionen haben eine höhere, blaue eine geringere Dichte. Um die Karte zu erstellen, nutzten Wissenschaftler aus, dass der schwache Gravitationslinseneffekt die Bilder weit entfernter Galaxien umso stärker verzerrt, je mehr Masse in den Raumbereichen vorhanden ist. Die runden Fotos, aufgenommen mit der Dark Energy Camera, zeigen drei vergrößerte Abschnitte. Die beiden Kreise aus roten Regionen enthalten viele Galaxien in einer Region hoher Dichte, der untere Kreis aus einer blauen Region wenige Objekte. Das passt dazu, dass diese Bereiche auch insgesamt eine relativ hohe beziehungsweise niedrige Materiedichte aufweisen.

Spektrum gibt es auch digital.

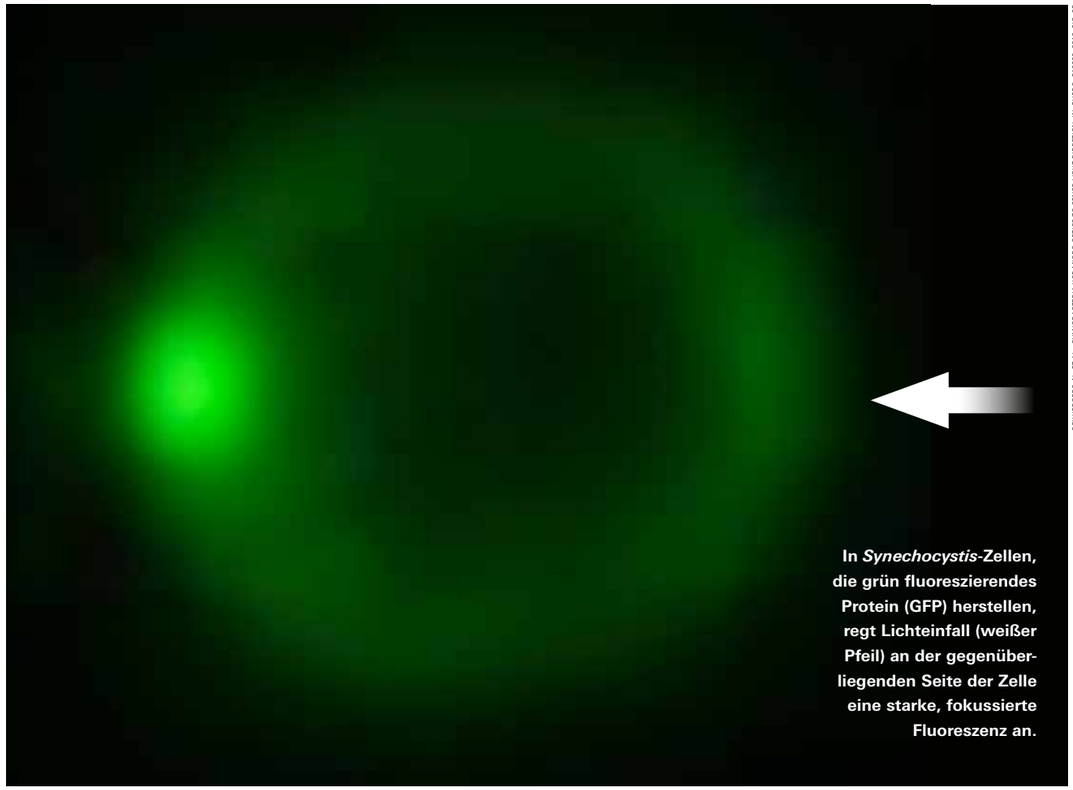
Das Digitalabo von **Spektrum der Wissenschaft** kostet im Jahr € 60,– (ermäßigt € 48,–). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das E-Paper-Heftarchiv!

Bestellen Sie jetzt Ihr Digitalabo!

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

www.spektrum.de/digitalabo

Täglich aktuelle Berichte auf **Spektrum.de**



SCHUERGERS, N. ET AL.: CYANOBACTERIA USE MICRO-OPTICS TO SENSE LIGHT DIRECTION. IN: ELIFE 5, E12620, 2016, FIG. 3B (ELIFESCIENCES.ORG/CONTENT/5/E12620) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

In *Synechocystis*-Zellen, die grün fluoreszierendes Protein (GFP) herstellen, regt Lichteinfall (weißer Pfeil) an der gegenüberliegenden Seite der Zelle eine starke, fokussierte Fluoreszenz an.

MIKROBIOLOGIE

BRÜDER, ZUR SONNE!

Um eine Lichtquelle zu orten, nutzen Zyanobakterien ihren Zellkörper als Mikrolinse. Damit fokussieren sie die Strahlen auf Lichtrezeptoren in der Membran der gegenüberliegenden Seite.

Die Fähigkeit der Sonnenblume, mit ihrer Blüte und den Blättern dem Lauf der Sonne von Ost nach West zu folgen, ist faszinierend – Forscher sprechen hier von Fototropismus. Im Unterschied dazu können viele fotosynthetisch aktive Bakterien gezielt auf eine Lichtquelle zuschwimmen oder -kriechen, weichen dagegen gefährlich hohen Lichtintensitäten aus. Solche lichtgesteuerten freien Bewegungen bezeichnet man als positive beziehungsweise negative Fototaxis. Unklar war bislang allerdings, wie die einzelne Bakterienzelle dabei die Lichtquelle ortet.

Untersuchen lässt sich das etwa an dem einzelligen Zyanobakterium *Synechocystis* sp. PCC6803, das in Süßwasserseen Fotosynthese betreibt. In seiner Zellmembran sitzen Rezeptoren, die auf Licht verschiedener Wellenlängen ansprechen und entweder eine positive oder negative Fototaxis vermitteln. Wie aber bestimmen die Organismen die Richtung, aus der die Strahlen kommen? Nutzen sie dafür vielleicht die allmählich ansteigende Lichtintensität zur Quelle hin, also einen Gradienten? Um einen räumlichen Gradienten entlang der Zelle wahrzunehmen, sind sie allerdings schlicht zu klein. Zeitliche Gradienten können die Mikroben dagegen prinzipiell zur Orientierung nutzen, etwa indem sie die Konzentration eines chemischen Stoffs messen und mit einem vorigen Wert vergleichen.

Nun hat ein internationales Team aus deutschen, englischen und portugiesischen Forschern anhand von zwei Experimenten gezeigt, dass Zyanobakterien auf eine ganz andere Art und Weise die Richtung ermitteln, aus der das Licht kommt: Während die Mikroben in einem auf ihre Kulturschale projizierten Lichtintensitätsgradienten keinen bestimmten Bereich bevorzugten, bewegten sie sich zielsicher auf eine Lichtquelle zu, deren Strahlen seitlich auf die Kulturschale trafen (Video unter https://elifesciences.org/content/5/e12620/media1).

Zunächst vermuteten die Wissenschaftler, die Zyanobakterien würden einen Beschattungseffekt nutzen, wie es etwa das »Augentierchen« *Euglena* macht. Deren rot gefärbter Augenfleck verdeckt in Folge der rotierenden Fortbewegungsweise des Einzellers in regelmäßigen Abständen ein lichtempfindliches Organell, was *Euglena* die Richtung des Lichteinfalls verrät. Zwar besitzt die Zellmembran von *Synechocystis* viele Einstülpungen mit den für die Fotosynthese zuständigen, Licht schluckenden Eiweißkomplexen. Insgesamt absorbiert eine solche Zelle jedoch nur maximal 20 Prozent des einfallenden Lichts – zu wenig für einen Beschattungseffekt.

Um das Rätsel zu lösen, bauten die Forscher den Zyanobakterien das grün fluoreszierende Protein (GFP) in die Zellhülle ein. Mit seiner Hilfe lässt sich die Lichtintensität erfassen, da es bei Anregung durch Licht bestimmte Wellenlängen fluoresziert. Ein passend abgestimmter, seitlich einfallender Laserstrahl regte nun überraschenderweise nicht die GFP-Moleküle an der Eintrittsstelle in die Zelle an, sondern erzeugte einen scharf fokussierten Fluoreszenzpunkt auf der gegenüberliegenden Membran (Bild links).

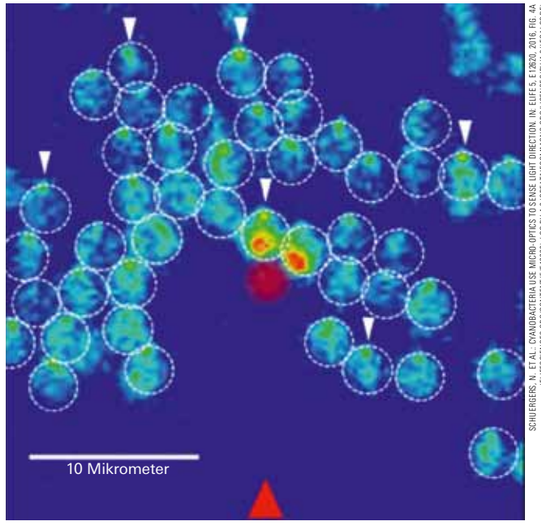
Offensichtlich wirkt die kugelförmige Bakterienzelle als mikroskopisch kleine Linse, welche die Lichtstrahlen bündelt. Dieses Ergebnis konnten die Forscher mit einer fotolithografischen Methode bestätigen, bei der sie die Zellen auf einer lichtempfindlichen Oberfläche fixierten und anschließend von oben mit UV-Licht bestrahlten. Hierdurch entstand ein hochauflösendes Abbild des Lichtfelds um die Zelle, das sich mit einem Rasterkraftmikroskop vermessen ließ. Und siehe da: Genau unter der Zelle fand sich eine scharfe Intensitätsspitze. Berechnungen ergaben für die rund drei Mikrometer großen bakteriellen Mikrolinsen einen Brechungsindex von 1,4. Das entspricht ziemlich genau dem der menschlichen Augenlinse.

Wie löst das aber eine Bewegung auf die Lichtquelle hin aus? Diese Frage adressierten die Forscher mit einem ausgefeilten experimentellen Ansatz. Sie beleuchteten die Mikroben seitlich mit einer roten Leuchtdiode, auf die sich diese wie erwartet zubewegten. Gleichzeitig schickten sie von oben einen durch eine Linse stark gebündelten Laserstrahl auf die Kulturplatte. Näherte sich dem intensiven Lichtpunkt eine Zelle, kehrte sie um, bis sie etwas Abstand dazu gewonnen hatte. Dann gab wieder die rote Leuchtdiode die Bewegungsrichtung vor (Video unter https://elifesciences.org/content/5/e12620/media2). Dieses Experiment zeigt eindrücklich, dass die positive Fototaxis von *Synechocystis* im Grunde auf einer »fotophoben« Reaktion beruht, bei der sich die Zelle von dem Abbild der Lichtquelle auf ihrer Membran wegbewegt. Offensichtlich ist aber nur gebündeltes Licht energiereich genug, um die Lichtrezeptoren anzuregen. Dabei bleibt sich gleich, ob die Fokussierung durch die Zelle selbst oder wie im Versuchsaufbau durch eine Linse entsteht (siehe Bild »Eigenfluoreszenz«).

Die aktivierten Lichtrezeptoren leiten das Signal zum Bewegungsapparat weiter, der bei *Synechocystis* aus so genannten Typ-IV-Pili besteht. Diese fadenförmigen Zellanhänge werden in einem zyklisch wiederholten Ablauf verlängert, an einer Oberfläche angeheftet und dann wieder zusammengezogen, wodurch sich die Zelle kriechend fortbewegt. Das Lichtsignal baut die Typ-IV-Pili im Bereich des aktiven Rezeptors ab, also auf der lichtabgewandten Seite. Stattdessen formiert sich der Bewegungsapparat stärker an der gegenüberliegenden Zellseite, worauf die Mikrobe zum Licht wandert (siehe Grafik »Immer vom Licht weg«, S. 30).

Zyanobakterien nehmen Licht also direkt wahr und nicht über den Umweg eines Intensitätsgradienten. Die bakteriellen Mikrolinsen funktionieren dabei im Prinzip ähnlich wie das menschliche Auge, nur eben mit ihrer Zellmembran als »Netzhaut«, auf der die Umgebung abgebildet wird. Auch die Signale mehrerer Lichtquellen lassen sich so integrieren. Wahrscheinlich ist diese Art der Lichtwahrnehmung bei einzelligen Zyanobakterien weit verbreitet und könnte auch schlüssig erklären, wie sich koloniebildende Zyanobakterien

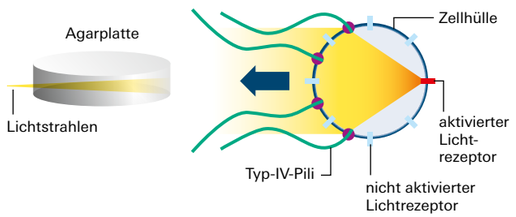
Eigenfluoreszenz von Zyanobakterien



SCHUERGERS, N. ET AL.: CYANOBACTERIA USE MICRO-OPTICS TO SENSE LIGHT DIRECTION. IN: ELIFE 5, E12620, 2016, FIG. 4A (ELIFESCIENCES.ORG/CONTENT/5/E12620) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

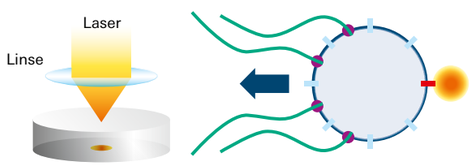
***Synechocystis*-Zellen (weiß gestrichelte Kreise) wandern auf eine Lichtquelle (rote Pfeilspitze) zu. Das Falschfarbenbild zeigt die Fluoreszenz des Fotosynthesepigments der Zyanobakterien. An einigen Zellen erkennt man gut die Lichtbündelung an der – in Bewegungsrichtung – hinteren Zellmembran (weiße Pfeilspitzen). Vor einem von oben einstrahlenden stark fokussierten Laser (roter Fleck in der Mitte) weichen die Zellen dagegen zurück, da dieser bei Annäherung die vordere Membran heftig fluoreszieren lässt.**

Immer vom Licht weg



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: LARISSA TETSCH

Die Bakterienzelle wirkt als Mikrolinse und bündelt die seitlich auf die Kulturschale treffenden Lichtstrahlen. Das erzeugt auf der lichtabgewandten Zellmembran ein fokussiertes Abbild der Lichtquelle (rechts im Bild), das einen Rezeptor aktiviert. Dessen Signal baut den Bewegungsapparat in Form von Typ-IV-Pili ab. Auf der gegenüberliegenden Zellseite bildet dieser sich neu und löst so eine Bewegung (Pfeil) in Gegenrichtung aus – weg vom Abbild des Lichts, aber hin zur Lichtquelle.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: LARISSA TETSCH

Ein durch eine Linse gebündelter Laserstrahl, der von oben auf die Kulturschale fällt, beleuchtet nur einen kleinen Fleck am Rand einer einzelnen Bakterienzelle. Auch dieses Licht regt Rezeptoren an, die eine Bewegung vom Lichtreiz weg auslösen.

koordiniert in Richtung Sonne bewegen. Vielleicht waren diese Lebewesen tatsächlich die Ersten, die ihre Umwelt in gewisser Weise gesehen haben.

Fragt sich nur noch, warum es so lange gedauert hat, bis die Forscher diesem an sich simplen System zur Lokalisation einer Lichtquelle so spät auf die Schliche gekommen ist, obwohl die Fototaxis schon 1883 beschrieben wurde und auch der Mechanismus anderer gerichteter Bewegungen von Mikroorganismen seit Langem bekannt ist. Ganz einfach: Weil bei gängigen Mikroskopen das Licht von unten kommt, können die Zyanobakterien in der Kulturschale nicht darauf zuwandern. Erst ein komplizierter mikroskopischer Versuchsaufbau konnte nun das Geheimnis der Zyanobakterien aufklären. ◂

Larissa Tetsch ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Maisach bei München.

QUELLE

Schuergers, N. et al.: Cyanobacteria Use Micro-Optics to Sense Light Direction. In: eLife 5, e12620, 2016

QUANTENOPTIK
TEILCHENPHYSIK IM SIMULATOR

Forscher haben in einem Quantencomputer die spontane Entstehung von Teilchen und Antiteilchen nachgestellt. Auf diese Weise könnten sich fundamentale Prozesse untersuchen lassen, die klassisch nicht berechenbar sind.

Beim Standardmodell der Teilchenphysik, das die grundlegenden Wechselwirkungen in der Natur beschreibt, sind noch viele Details rätselhaft. Oft gibt es keine exakten mathematischen Lösungen, weshalb aufwändige Computerberechnungen nötig werden, die stets nur Näherungen darstellen. Auch eine experimentelle direkte Untersuchung ist häufig unmöglich.

Wissenschaftler um Esteban A. Martinez von der Universität Innsbruck sind nun einen anderen Weg gegangen und haben in einer Versuchsanordnung aus Kalziumionen und Laserstrahlen einen fundamentalen Prozess aus der Elementarteilchenphysik nachgestellt. Das ist ein erster experimenteller Schritt, um mit Hilfe von solchen Systemen einige der offenen Fragen des Standardmodells zu beantworten.

Der berühmte Physiker Richard Feynman (1918–1988) hat bereits 1982 festgestellt, dass ein Versuchsaufbau, der quantenphysikalische Effekte originalgetreu nachahmen soll, selbst den Regeln der Quantenmechanik gehorchen muss. Das Konzept hinter einem solchen »Quantensimulator« ist dann sehr elegant: Wenn ein System sich nicht untersuchen lässt, ein anderes sich aber mit all seinen Bestandteilen letztlich genau so verhält, stellt dieses einen Quantensimulator des ersten dar. Kann man eine solche Apparatur bauen, manipulieren und auslesen, ist das genauso gut, als untersuche man das eigentliche System direkt.

Die Kräfte zwischen Elementarteilchen eignen sich ausgezeichnet für Quantensimulationen. Im Standardmodell der Teilchenphysik werden die Wechselwirkungen von so genannten Eichfeldern vermittelt, hinter denen eine Eichtheorie steht. Die einfachste davon ist die Quantenelektrodynamik (QED), die beispielsweise das Verhalten von Elektronen bestimmt. Ein weiterer fundamentaler Bestandteil der Materie, die »Quarks« mitsamt der starken Wechselwirkung zwischen ihnen, wird von einer anderen Eichtheorie beschrieben, der wesentlich komplizierteren Quantenchromodynamik (QCD).

Besonders in der QCD gibt es noch viele ungelöste Rätsel. Dabei geht es beispielsweise um das »Confinement«, wonach sich niemals einzelne Quarks beobachten lassen, sondern diese stets zusammengesetzte Teilchen bilden (siehe Artikel »Den Multiquarks auf der Spur« ab S. 66 in diesem Heft). Das Confinement lässt sich theoretisch nur sehr schwer beschreiben – man braucht Vereinfachungen, etwa in Form so genannter Gittereichtheorien. In diesen ist der Raum nicht mehr kontinuierlich, sondern besteht aus regelmäßigen Abständen. Doch selbst das stellt klassische Computermodelle noch vor zahlreiche Probleme.

Daher versuchen Physiker seit einigen Jahren, Gittereichtheorien mit Hilfe von Quantensimulatoren zu verstehen. Diese sollen mit Hilfe von atomaren und optischen Bauelementen das jeweilige Phänomen, das sich typischerweise bei sehr hohen Energien und starken Feldern abspielt, unter leichter handhabbaren Laborbedingungen nachstellen. Das Experiment von Martinez und seinen Kollegen verwirklicht nun zum ersten Mal einen solchen Quantensimulator für eine Gittereichtheorie. Die Forscher testeten konkret die Vorhersage der Quantenelektrodynamik, dass unter gewissen Bedingungen spontan Paare von Teilchen und Antiteilchen entstehen können.

Dazu verwendeten sie einen speziell dafür geeigneten Quantencomputer – quantenmechanische Rechner, deren einzelne Bits Überlagerungszustände einnehmen können. Bei Martinez' Anordnung waren diese »Qubits« Kalziumionen, die sich mit Laserstrahlen jeweils in einen von zwei Zuständen bringen ließen. Vier solcher Ionen reihten die Forscher in einer Kette auf (siehe Illustration unten). Für dieses sehr reduzierte System mussten die Autoren eine entsprechend einfache, eindimensionale Version einer Gittereichtheorie verwenden.

Die zwei möglichen energetischen Ausrichtungen jedes Ions stellen dann ein Qubit dar, das für die An- oder Abwesenheit eines Teilchens an diesem Punkt steht. Die Forscher fanden einen Weg, die Gleichungen für die Felder aus der QED so zu übersetzen, dass sie sich durch Wechselwirkungen zwischen den Ionen ausdrücken lassen. Diese Übersetzungsvorschriften gestatteten es Martinez und seinen Kollegen schließlich, mit ihrem Versuchsaufbau – getreu Feynmans Idee – ein eindimensionales Modell der QED direkt zu untersuchen.

Die Wissenschaftler änderten die Energiezustände der Kalziumionen mit Hilfe der Laserstrahlen und führten so Rechenoperationen mit den Qubits aus. Anschließend blickten sie mit einer Kamera darauf und lasen ab, ob an den jeweiligen Orten in der Simulation Teilchen erzeugt wurden, und wie deren Eigenschaften beispielsweise von der Feldstärke der Laserstrahlen abhingen. Indem sie dieses Vorgehen viele Male unter verschiedenen Bedingungen wiederholten, bestätigten sie, dass sich die Realität exakt so verhält wie im Modell erwartet.

Die hierbei nötigen Vereinfachungen waren zwar erheblich, aber es ging auch nicht darum, ein möglichst naturgetreues Szenario zu konstruieren. Als erster wichtiger Meilenstein gelang es vielmehr, grundsätzlich zu zeigen: Quantensimulationen dieser Art funktionieren! In Zukunft könnten größere Anordnungen in mehreren Dimensionen folgen, um dann auch kompliziertere und bislang nicht vollständig verstandene Wechselwirkungen nachzustellen – vor allem für komplexere Modelle wie die QCD, deren Phänomene sich klassisch kaum berechnen lassen. Es liegen seit ein paar Jahren bereits Ideen vor, wie das gelingen könnte. Die zu Grunde liegenden Laboraufbauten reichen von kalten Atomen über Ionen bis hin zu supraleitenden Qubits.

Diese Vorschläge basieren zumeist auf bereits vorhandenen experimentellen Techniken und sollten damit zumindest prinzipiell funktionieren. Die Strategie von Martinez und seinem Team könnte dabei eine Art Leuchtfeuer sein, das anderen Physikern den Weg in das gelobte Land der experimentellen Überprüfung von Eichtheorien weist. ◂

Erez Zohar ist theoretischer Physiker am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching.

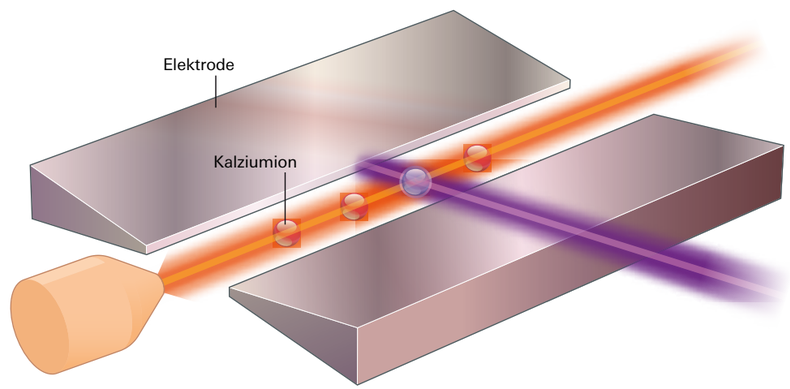
QUELLE

Martinez, E. A. et al.: Real-Time Dynamics of Lattice Gauge Theories with a Few-Qubit Quantum Computer. In: Nature 534, S. 516–519, 2016

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 534, S. 480–481, 23. Juni 2016

Ionen in der Falle

In der Versuchsanordnung waren vier Kalziumionen aufgereiht und wurden mit Laserstrahlen (orange und violett) in einen von zwei möglichen quantenmechanischen Zuständen gebracht. Die Wechselwirkungen zwischen den Ionen übersetzten die Forscher in Eigenschaften einer teilchenphysikalischen Theorie – und simulierten diese so im Experiment.



ZOHAR, E.: QUANTUM SIMULATION OF FUNDAMENTAL PHYSICS. IN: NATURE 534, S. 480–481, 2016, FIG. 1

Täglich aktuelle Berichte auf **Spektrum.de**

PSYCHOLOGIE

EINLADUNG ZUM MOGELN

Einige psychologische Testverfahren bringen die Handlungen einer Versuchsperson nur verschleiert zum Ausdruck, damit diese ungehemmt ihre wahren Motive ausleben kann. Allerdings erschwert der Schleier die Interpretation der Ergebnisse und macht sie im Extremfall unmöglich.

Ein Psychologe, der im Rahmen eines Forschungsprojekts einen Probanden fragt, ob er – gelegentlich, unter gewissen Umständen – unehrlich sei, kann nicht mit einer ehrlichen Antwort rechnen. Das gilt bemerkenswerterweise auch dann, wenn die Befragung anonym und ohne jeden persönlichen Kontakt – zum Beispiel über das Internet – stattfindet. Es sind nämlich nicht in erster Linie die anderen, denen gegenüber der Mensch seine unfeine Einstellung nicht zugeben möchte, sondern er selbst.

Um gleichwohl ein getreues Bild der menschlichen Seele zu gewinnen, greifen die Psychologen zu Versuchsanordnungen, die dem Probanden die direkte Konfrontation mit seinen wahren Motiven ersparen. Erst in der statistischen Auswertung treten sie wieder zu Tage, wenn auch nur gemittelt über das gesamte Kollektiv der Versuchspersonen und ohne die Möglichkeit, Rückschlüsse auf eine Einzelperson zu ziehen.

Zum Beispiel bittet man den Probanden, unbeobachtet einen Würfel zu werfen und das Ergebnis aufzuschreiben. Am Ende bekommt er für jeden notierten Punkt einen Euro ausgezahlt, außer wenn es eine Sechs ist; die bringt nichts ein. Offensichtlich besteht die optimale Strategie für die Versuchsperson darin, eine Fünf aufzuschreiben, einerlei was der Würfel anzeigt. Das kommt zwar vor; aber die meisten Leute können einen so dreisten Betrug doch nicht mit ihrem Selbstbild vereinbaren. Deswegen liegt der Durchschnitt der notierten Punktzahlen (Sechs zählt als Null) in der Regel auch nur geringfügig über dem Wert 2,5, der bei ehrlichem Spiel zu erwarten wäre.

Wenn es allerdings darum geht, die Regeln nicht einfach zu brechen, sondern nur etwas zu verbiegen, zeigen sich die Leute flexibler. Simon Gächter und Jonathan F. Schulz von der University of Nottingham (Großbritannien) haben in einer groß angelegten Studie mehreren Gruppen von Versuchspersonen aus den verschiedensten Ländern eine geeignete Ausrede angeboten: »Werfen Sie den Würfel zweimal, aber notieren Sie nur das Ergebnis des ersten Wurfs.« Das haben offensichtlich viele Probanden als eine zweite Chance begriffen für den Fall, dass der erste Wurf ungünstig ausfiel. Jedenfalls passen die notierten Augenzahlen am besten zu der Hypothese, dass die Versuchspersonen von den beiden Wurfergebnissen tendenziell eher das jeweils größere aufgeschrieben haben. Gächter und Schulz konnten zeigen, dass das Ausmaß dieser Unehrlichkeit mit der Häufigkeit der Regelverletzungen korreliert, die im Heimatland der jeweiligen Versuchspersonen gängig ist. Wer politische Manipulation, Korruption und Steuerhinterziehung als landesübliches Verhalten erlebt, ist eher bereit, die Wahrheit zu seinen Gunsten zu verbiegen, als jemand, in dessen Heimatland es korrekter zugeht. Das wenig erfreuliche Ergebnis besagt, dass schlechte Sitten nicht nur das Verhalten, sondern auch die moralische Grundeinstellung der Leute verderben.

Man könnte fast zu dem Schluss kommen, Mogeln gehöre zum Berufsbild eines Bankers

Ein ähnlich aufgebautes Experiment wirft ein übles Licht auf einen ganzen Berufsstand. Dies zeigt eine Studie, die Alain Cohn, Ernst Fehr und Michel André Maréchal vom Institut für Volkswirtschaftslehre der Universität Zürich mit Bankangestellten unternommen haben. (Fehr und Gächter haben vor Jahren bahnbrechende Untersuchungen zum Kooperationsverhalten durchgeführt; siehe **Spektrum** März 2002, S. 52.) Die Probanden hatten, wieder unbeobachtet, zehnmal eine Münze zu werfen; für einen gemeldeten »Kopf« gab es umgerechnet ungefähr 20 Dollar, für »Zahl« nichts. Es stellte sich heraus, dass die Teilnehmer die Wahrheit, wenn überhaupt, nur geringfügig verbogen (51,6 Prozent gemeldete Erfolgsrate statt der zu erwartenden 50 Prozent). Wenn sie aber unmittelbar vor dem Versuch durch geeignete Fragen (»Bei welcher Bank arbeiten Sie? In welcher Funktion?«) an ihre berufliche Tätigkeit erinnert wurden, schnellte die vorgebliche Erfolgsrate auf 58,2 Prozent empor, und immerhin acht Prozent der Befragten waren so dreist, volle zehn Treffer zu melden (Bild unten) – ein Glücksfall, der durchschnittlich einmal unter 1024 Fällen vorkommt, wenn alles mit rechten Dingen zugeht.

Unweigerlich haben Versuchsanordnungen dieser Art je doch eine absurde Komponente. Wozu, fragt sich der Proband, soll ich den Würfel zum zweiten Mal werfen, wenn das Ergebnis überhaupt keine Folgen hat? Und nicht wenige werden die Abwesenheit jeder Kontrolle als eine Einladung zum Mogeln verstehen – nichts anderes pflegt bei einer Klausur zu passieren, wenn die Aufsicht den Raum verlässt.

Eine absurde Spielanweisung zum eigenen Vorteil nutzen: Ist das betrügerisch oder nur intelligent?

Noch mehr trifft das auf das »random allocation game« zu. Bei diesem Experiment stellt der Versuchsleiter dem Probanden zwei Spardosen *A* und *B* auf den Tisch, dazu einen Stapel von 30 Münzen und einen Spielwürfel mit drei weißen und drei schwarzen Seitenflächen. Dose *A* ist für den Probanden selbst, *B* für einen anderen Empfänger. Der Proband soll sich nun der Reihe nach für jede Münze überlegen, in welche Spardose er sie stecken will, und dann den Würfel werfen. Wenn der eine weiße Seite zeigt, soll er seinem ursprünglichen Entschluss folgen, auf ein schwarzes Ergebnis jedoch die Münze in die jeweils andere Spardose stecken. Mit dieser Anweisung lässt der Versuchsleiter den Probanden allein und unbeobachtet.

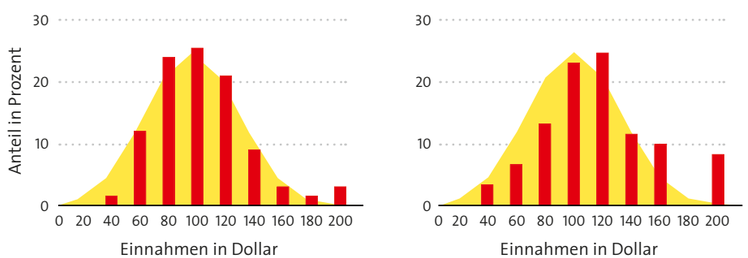
Auf den ersten Blick bietet diese Versuchsanordnung dem Probanden eine wohlfeile Gelegenheit, seinen Motiven – zum Beispiel seiner Habgier – freien Lauf zu lassen, ohne dafür Verantwortung zu übernehmen; er hat ja immer die Ausrede zur Verfügung, der Würfel sei seinen edlen Absichten zum Trotz so merkwürdig gefallen, dass alle Münzen in Spardose *A* landen. Auf den zweiten Blick wird klar, dass die Ausrede Unfug ist. Wer das Spiel getreu nach Anweisung spielt, hat am Ende ziemlich genau 15 Münzen in jede Dose gesteckt, einerlei was er sich vorher gedacht hat. Das Zufallsexperiment mit dem Würfel verwischt alles, was der Proband zuvor beabsichtigt haben mag, bis zur Unkenntlichkeit. Eine wesentlich andere Verteilung der Münzen ist nur durch Mogeln zu erzielen.

Dadurch wird aber die Interpretation der Ergebnisse problematisch. Nur wenn der Proband die Absurdität nicht durchschaut, wird er – vor dem Versuchsleiter und vor sich selbst – die Ausrede gelten lassen. Falls er also zwei annähernd gleich volle Spardosen abliefert, stellt sich die Frage: Tut er das, weil er im Grunde seines Herzens ehrlich ist oder weil er den Trick durchschaut hat und sich keine Blöße geben will? Und wenn seine eigene Spardose voll und die andere leer ist: Glaubt er am Ende durch Selbstbetrug an die Ausrede, oder hat er das Spiel zutreffend als absurd eingestuft und weigert sich, es ernst zu nehmen?

Nach meiner Auffassung entwertet dieses Problem die kürzlich veröffentlichten Ergebnisse einer groß angelegten Untersuchung, die für einiges Aufsehen sorgte. Eine Forschergruppe unter Leitung von Joseph Henrich von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) hat verschiedene, über die ganze Welt verteilte kleine Gemeinschaften erforscht, die sich in einem speziellen kulturellen Übergang befinden. In ihnen koexistiert der Glaube an »lokale Gottheiten« – Berg- und Quellgeister, die Seelen der Ahnen, Götter mit sehr menschenähnlichen Wesenszügen – mit »modernen«, weltumspannenden Religionen wie Christentum, Hinduismus und Buddhismus. Letztere pflegen von ihren Mitgliedern ein erhöhtes Maß an Altruismus zu fordern, weit mehr, als sich durch die biologische Evolution einstellen könnte. Wenn die Mitglieder einer Gemeinschaft ihr Leben füreinander einsetzen, ist das zwar für die ge-

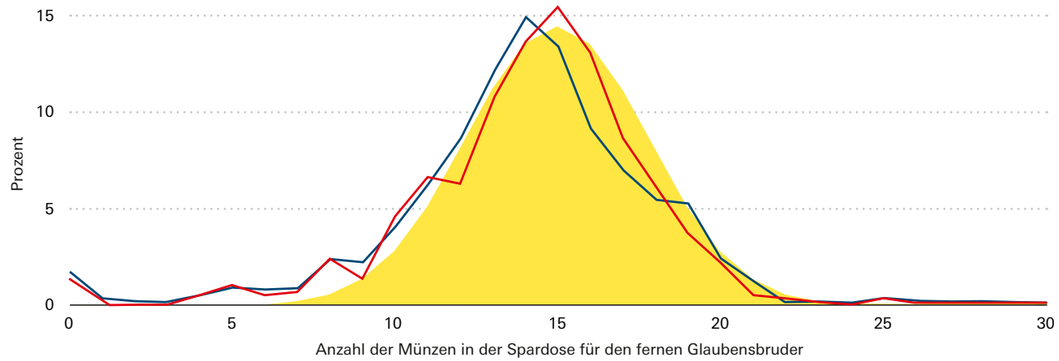
Das Experiment mit den Bankangestellten

Die Probanden meldeten geringfügig mehr erfolgreiche Münzwürfe (links, rote Balken), als einem echten Zufallsexperiment entspricht (Binomialverteilung, gelbe Fläche). Die Diskrepanz stieg dramatisch an, wenn den Versuchspersonen zuvor durch geeignete Fragen ihre berufliche Tätigkeit in den Sinn gebracht wurde (rechts).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH COHN, A. ET AL.: BUSINESS CULTURE AND DISHONESTY IN THE BANKING INDUSTRY. IN: NATURE 516, S. 86–89, 2014, FIG. 1

Das Experiment zu den religiösen Überzeugungen



Das Diagramm zeigt die relativen Häufigkeiten, mit denen 0, 1, 2, … 30 Münzen in Spardose *B* für den fernen Glaubensbruder landeten; blau für das Spiel mit Spardose *A* für den Probanden selbst, rot mit Spardose *A* für einen lokalen Glaubensbruder. Die gelbe Fläche entspricht der Binomialverteilung, die bei fairem Spiel zu Stande gekommen wäre.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH PURZYCKI, B. G. ET AL.: MORALISTIC GODS, SUPERNATURAL PUNISHMENT AND THE EXPANSION OF HUMAN SOCIALITY. IN: NATURE 530, S. 327–330, 2016, EXPANDED DATA FIG. 5

samte Gruppe ein Vorteil im Überlebenskampf, nicht aber für den einzelnen aufopferungsbereiten Helden, weswegen sich eine Bereitschaft zu solchen Taten nicht vererben und auf die Dauer evolutionär durchsetzen kann. Auch die hilfsweise konstruierten Theorien vom »egoistischen Gen« und vom »reziproken Altruismus« greifen hier zu kurz. Nach einem Konzept, das unter Anthropologen schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts diskutiert wird, ist die Religion der Mechanismus, der diese Erklärungslücke überbrückt.

Ein Gerechter ist vielleicht nur gottesfürchtig, liebt aber deswegen noch nicht seinen Nächsten

Darauf gründeten die Forscher aus Vancouver ihre Arbeitshypothese: Wer einer modernen Religion anhängt, das heißt insbesondere glaubt, dass sein Gott ethisch richtige Handlungen fordert, diese erkennen kann und Fehlverhalten im Dies- oder Jenseits bestraft, ist eher geneigt, etwas für einen fernen Glaubensgenossen zu tun, den er nicht kennt und mit dem er nie etwas zu tun haben wird. Diese Hypothese testeten die Forscher, indem sie die Angehörigen der verschiedenen Gemeinschaften einerseits zu ihren religiösen Überzeugungen befragten und andererseits zu zwei Runden des »random allocation game« baten. Der Inhalt von Spardose *B* wurde an einen nicht näher bezeichneten fernen Glaubensbruder ausgezahlt, der von Spardose *A* in der einen Runde an einen Anhänger derselben Religion aus der lokalen Gemeinschaft und in der anderen Runde an den Probanden selbst.

In der Tat fanden die Anthropologen eine Korrelation, die ihre Hypothese stützt: Je mehr ein Angehöriger dieser Gemeinschaften seinem Gott die genannten Eigenschaften zuschreibt, desto eher ist er bereit, einem fernen Glaubensbruder etwas mehr in die Spardose zu tun. Bei näherer Betrachtung sieht das Bild allerdings viel weniger überzeugend aus. Zumindest im Durchschnitt über alle Probanden denkt jeder an sich selbst zuerst, und an den nahen Glaubensbruder mehr als an den fernen. Wenn der Proband an einen moralischen, allwissenden und strafenden Gott glaubt, fällt die entsprechende Schiefe der Verteilung (Bild S. 33) lediglich milder aus.

Das ist auch wenig verwunderlich. Wer davon überzeugt ist, dass Gott ihm auch beim Würfeln im stillen Kämmerlein auf die Finger schaut, wird ganz grundsätzlich zu größerer Ehrlichkeit neigen. Das allein kann schon den beobachteten Effekt erklären. Mit Altruismus in einer großen Gemeinschaft hat das nicht unbedingt etwas zu tun. ◂

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

QUELLEN

Cohn, A. et al.: Business Culture and Dishonesty in the Banking Industry. In: Nature 516, S. 86–89, 2014

Gächter, S., Schulz, J. F.: Intrinsic Honesty and the Prevalence of Rule Violations across Societies. In: Nature 531, S. 496–499, 2016

Purzycki, B. G. et al.: Moralistic Gods, Supernatural Punishment and the Expansion of Human Sociality. In: Nature 530, S. 327–330, 2016

MEDIZIN

ANGEKLAGT UND ÜBERFÜHRT: DAS ZIKA-VIRUS

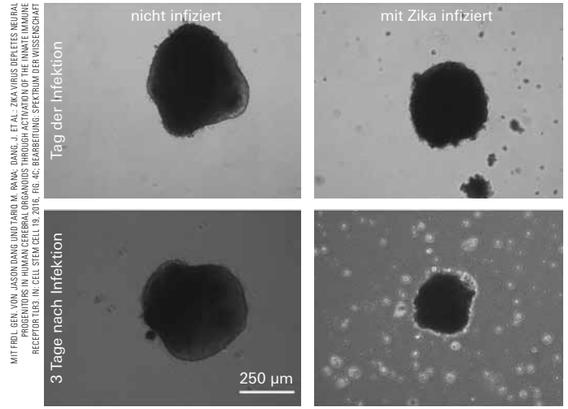
Am Anfang war es nur eine vage Vermutung, doch inzwischen gilt das Zika-Virus als überführt, schwere Hirnmissbildungen bei Ungeborenen zu verursachen.

Als Margaret Chan am 1. Februar 2016 vor die Presse trat, wurde die Weltöffentlichkeit Zeuge eines in der Medizingeschichte bis dahin einmaligen Vorgangs. Auf dem amerikanischen Doppelkontinent vermehrte sich explosionsartig das Zika-Virus; zeitgleich häuften sich Kopfmissbildungen bei Neugeborenen und Föten in Brasilien. Die unter Druck geratene Direktorin der Weltgesundheitsorganisation (WHO) entschloss sich deshalb dazu, den globalen öffentlichen Gesundheitsnotstand auszurufen. Auf Nachfrage musste Chan jedoch einräumen, dass ihre Organisation die ursächliche Beziehung zwischen dem massenhaften Auftreten des Zika-Virus und den schweren Hirnfehlbildungen (Mikrozephalien) nur vermutete – wissenschaftliche Beweise für diesen Zusammenhang gab es bis dahin nicht. Mehr noch: Es bestanden sogar begründete Zweifel an seiner Plausibilität.

Das Virus wurde in den späten 1940er Jahren bei Rhesusaffen im namensgebenden Zikawald (Uganda) entdeckt und galt lange Zeit als eher harmlos. In den zurückliegenden Jahrzehnten breitete es sich von Zentralafrika über Südostasien bis in den Pazifik aus. Nur zweimal verursachte es größere Infektionswellen: 2007 in Mikronesien und 2013 in Französisch-Polynesien. Dabei verlief der größte Anteil der Infektionen gänzlich symptomfrei. Lediglich 20 Prozent der Betroffenen litten unter milden Formen von Hautausschlag, Kopf-, Gelenk- und Muskelschmerzen, Bindehautentzündung und Fieber.

Von gehäuften Missbildungen an Embryonen, wie sie aktuell in Brasilien auftreten, war im Zusammenhang mit Zika zuvor noch nie die Rede. Auch kein anderer Vertreter der Flaviviridae, zu denen das Zika-Virus gehört, war als Frucht schädigend aufgefallen. Vor diesem Hintergrund schien es durchaus plausibel, die gleichzeitige Häufung von Zika-Infektionen bei Erwachsenen und Mikrozephalien bei Embryonen und Neugeborenen dem Zufall zu zuschreiben. Andere mögliche Ursachen, etwa Umwelteinflüsse oder Medikamente, erschienen wahrscheinlicher. Die Zika-Hypothese, so argumentierten viele Wissenschaftler, sei schon deshalb unwahrscheinlich, weil nur wenige bekannte Virentypen überhaupt in der Lage seien, die Blut-Plazenta-Schranke zu überwinden und so aus dem mütterlichen Blut in den Embryo zu gelangen. Hirninfektionen von Ungeborenen sind selten, können aber unter anderem von Rötelnviren ausgelöst werden. Zu deren Symptomen gehört auch die Mikrozephalie.

Zwar gab es schon beim Ausbruch des Zika-Virus in Französisch-Polynesien mindestens 72 Infizierte mit Beeinträchtigungen des Nervensystems, 40 von ihnen zeigten das so genannte Guillain-Barré-Syndrom. Ihr Anteil an der Gesamtzahl der Zika-Infizierten war mit 0,024 Prozent allerdings verschwindend gering. Es handelt sich bei diesem Syndrom zudem um eine Immunreaktion des Körpers gegen das Virus, die nicht das Gehirn, sondern vorwiegend das periphere Nervensystem betrifft und zu vorübergehenden Lähmungserscheinungen und Müdigkeit führt.



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON JASON DANG UND TARIQ M. RANA. DANG, J. ET AL.: ZIKA VIRUS DEPLETES NEURAL PROGENITORS IN HUMAN CEREBRAL ORGANOIDS THROUGH ACTIVATION OF THE INNATE IMMUNE RECEPTOR TLR3. IN: CELL STEM CELL 19, 2016. FIG. 4C. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Hirnorganoide, die aus menschlichen Stammzellen hervorgehen, entwickeln sich ähnlich wie das embryonale Gehirn während der frühen Schwangerschaft. Bei Infektionen mit dem Zika-Virus verkümmern sie und fallen teilweise auseinander (rechts). Lichtmikroskopiebilder wie die hier gezeigten am Tag der Infektion (oben) oder drei Tage danach (unten) liefern Indizien dafür, dass Zika-Viren die Hirnbildung stören.

Erste Nachweise in vivo

Am 5. Januar 2016 veröffentlichten brasilianische Wissenschaftler um A. S. Oliveira Melo die Fallgeschichten zweier Schwangerer aus dem Staat Paraiba, deren Ungeborene bei Ultraschalluntersuchungen typische Anzeichen fetaler Mikrozephalie aufwiesen: schwere Schäden an Kleinhirn, Hirnstamm und Thalamus. Die Ärzte vermuteten als Ursache zunächst eine Toxoplasmoseinfektion, doch die Schädel der Embryonen zeigten Verknöcherungen, die für diese Infektion untypisch sind. Bei anschließenden Laboruntersuchungen fand man genetisches Material des Zika-Virus sowohl im Fruchtwasser als auch in einer Blutprobe des Ungeborenen, allerdings nicht im Blut der Schwangeren.

Eine viel beachtete Veröffentlichung slowenischer Wissenschaftler untermauerte diese Befunde im März 2016. Die Forscher berichteten von einer Frau, die im Februar 2015 schwanger geworden war, während sie in Brasilien lebte. In der 29. Schwangerschaftswoche diagnostizierten Ärzte bei ihrem ungeborenen Kind neben anderen Veränderungen eine Mikrozephalie, woraufhin die Patientin die Schwangerschaft abbrechen ließ. Bei der Autopsie des Fötus konnten die Forscher nicht nur die Diagnose bestätigen (die Hirnrinde wies unter anderem keine Faltung auf und war fast vollständig glatt), sondern entdeckten auch große Mengen an Viruspartikeln und -RNA in den Hirnzellen. Mit Hilfe von Sequenzierungsmethoden identifizierten sie schließlich das Zika-Virus anhand des Genoms. Andere Krankheitserreger, die ebenfalls für Hirnveränderungen verantwortlich sein könnten, fanden die Forscher nicht.

Die WHO stützt ihr Urteil auf einen Indizienkatalog

Mehrere Studien lieferten weitere Hinweise auf den mutmaßlichen Zusammenhang von Zika-Epidemie und Mikrozephaliehäufung, doch reichte die Datenlage für einen definitiven Beweis aus? Das US-Seuchenschutzzentrum CDC (Centers for Disease Control and Prevention) erklärte am 13. April jedenfalls alle Zweifel für ausgeräumt: Zika verursache Mikrozephalie bei Neugeborenen. Dabei stützte sich die Behörde allerdings auf rein epidemiologische Indizien. Es sei schwierig, direkt nachzuweisen, dass ein bestimmter Einfluss ungeborene Kinder schädige – zeitliche Zusammenhänge ließen sich wegen der Dauer der Schwangerschaft oft nicht sicher feststellen, hieß es. Es gebe deshalb keine einzelne Studie, die allein den Zusammenhang zwischen Zika-Infektion und Mikrozephalie belegen könne.

Die CDC-Forscher hatten stattdessen die bis dahin veröffentlichte Literatur nach einem Standardverfahren ausgewertet und waren zu dem Schluss gekommen, dass die verfügbaren Daten die Frucht schädigenden Eigenschaften von Zika hinreichend stark belegen. Sie stützen sich dabei unter anderem auf den vom englischen Statistiker und Epidemiologen Austin Bradford Hill (1897–1991) entwickelten Kriterienkatalog zur Überprüfung einer vermuteten Ursache-Wirkungs-Beziehung in der Medizin.

Dabei galt es unter anderem zu prüfen, ob es voneinander unabhängige Studien gibt, die mit unterschiedlichen Methoden und an verschiedenen Risikopopulationen dieselbe Verbindung zwischen Zika-Virus und Hirnanomalien bei Ungeborenen nachgewiesen haben. Weiterhin spielt der Zusammenhang zwischen Infektionszeitpunkt und dem Auftreten einer Mikrozephalie eine Rolle, und außerdem, ob es überhaupt plausibel ist, dass der Erreger die beobachteten Schäden hervorruft – sowie ob alternative Erklärungen auszuschließen sind. Die zikaassoziierten Daten erfüllten lediglich zwei Kriterien nicht. Eines davon ist auf Viren grundsätzlich nicht anwendbar; das andere verlangt, den Effekt im Tierversuch nachzuvollziehen. Entsprechende Untersuchungsergebnisse lagen zu dem Zeitpunkt noch nicht vor.

Zwar galt damit der Zusammenhang zwischen Zika-Infektionen und Hirnschäden bei Ungeborenen unter Wissenschaftlern als anerkannt. Über welchen Mechanismus die Viren das Gehirn angreifen, blieb jedoch weiterhin unklar. Es war durchaus denkbar, dass nicht das Virus selbst, sondern von ihm gebildete Toxine oder gar die antivirale Reaktion des mütterlichen Immunsystems den Embryo schädigt. Möglicherweise spielten dabei auch noch Kofaktoren eine

Rolle. Um Therapien oder Impfstoffe zu entwickeln, ist die Klärung dieser Fragen allerdings entscheidend.

Glücklicherweise gelang es Forschern von der Universität São Paulo schon wenige Wochen später, erstmals einen experimentellen Beleg für die Verbindung zwischen Zika-Virus und Hirnschäden bei Neugeborenen zu liefern. Das Team um Patricia Beltrão-Braga hatte trächtige Mäuse mit einem Virenstamm infiziert, der aus einem brasilianischen Patienten isoliert worden war. Die neugeborenen Tiere zeigten anschließend neben allgemeinen Wachstumsstörungen auch Hirnfehlbildungen. Die Versuche bestätigten außerdem frühere Hinweise, wonach das Zika-Virus neuronale Vorläuferzellen angreift und so auch das Gehirn Erwachsener schädigen kann.

In den folgenden Wochen gelang es immer mehr Arbeitsgruppen, Hirnschädigungen durch Zika-Viren im Mausmodell nachzuvollziehen. Die Aussagekraft dieser Versuche ist allerdings begrenzt. Die Hirnentwicklung von Mäusen unterscheidet sich fundamental von der des Menschen; die für Letzteren charakteristische Faltung beispielsweise fehlt bei den Nagern völlig.

FOTOLIA / HIGHWAYSTARZ

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unsere Themenseite zum Zika-Virus finden Sie unter **www.spektrum.de/t/zika**

Licht ins Dunkel brachten Minigehirne

Es war deshalb ein experimentelles Modell gefragt, mit dem sich die Auswirkungen einer Zika-Infektion auf die menschliche Hirnentwicklung während des ersten Schwangerschaftsdrittels nachvollziehen lassen. Hierfür bot sich eine Technik an, die unter Leitung des deutschen Molekularbiologen Jürgen Knoblich 2013 entwickelt wurde. Die Forscher hatten aus induzierten pluripotenten menschlichen Stammzellen organähnliche Gebilde kultiviert. Die Stammzellen organisieren sich nämlich unter bestimmten Bedingungen frei schwebend zu kugelförmigen Haufen, so genannten Neurosphären. Diese Zellklumpen ließen sich weiter differenzieren, bis zur Ausbildung eines so genannten Neuroektoderms, aus dem sich das Zentralnervensystem entwickelt.

Mit Hilfe künstlicher Organoide lassen sich die komplexen Vorgänge bei der menschlichen Hirnbildung simulieren, allerdings nur bis etwa zur 10. Schwangerschaftswoche. Zu diesem Zeitpunkt sind die entstehenden Minigehirne auf Erbsengröße angewachsen. Da sie nicht über Blutgefäße verfügen und sich ausschließlich durch Diffusion aus dem umgebenden Kulturmedium versorgen, entwickeln sie sich nicht weiter. Doch um die Auswirkungen einer Zika-Infektion auf die frühe Hirnentwicklung aufzuklären, eigne sich das System hervorragend, erklärte Knoblichs frühere Mitarbeiterin Patricia Garcez im März 2016 in »Nature Medicine«. Bald darauf lieferte ihre eigene Arbeitsgruppe die wahrscheinlich entscheidenden Hinweise.

Garcez' Team infizierte menschliche Stammzellen zunächst mit Zika-Viren und kultivierte sie dann elf Tage lang zu Hirnorganoiden. Mit Hilfe immunhistochemischer Methoden und der Elektronenmikroskopie konnten die Forscher Schritt für Schritt nachverfolgen, wie das Virus die sich allmählich ausdifferenzierenden Zellen angreift. Die infizierten Zellhaufen zeigten verschiedene strukturelle Abnormitäten und fielen teilweise auseinander. Virenpartikel waren an den Membranen der Zellorganellen nachweisbar, unter anderem an Mitochondrien und Vesikeln. Unter dem Elektronenmikroskop fanden die Wissenschaftler in sämtlichen zikainfizierten Neurosphären sowohl instabile Zellmembranen als auch zahlreiche Apoptosekörperchen (Überreste zerstörter Zellen). Daraus schließen sie, dass das Zika-Virus den programmierten Zelltod (Apoptose) in menschlichen neuronalen Stammzellen auslöst und so deren Ausdifferenzierung verhindert. Das Wachstum infizierter Hirnorganoide war gegenüber dem nichtinfizierter Hirnorganoide um 40 Prozent vermindert. Eine kurz darauf in »Nature« erschienene ausführlichere Studie bestätigte die Ergebnisse.

Garcez und ihre Kollegen wiederholten dieselben Experimente mit Dengueviren. Dabei ergaben sich ähnliche Befallsmuster wie bei den Versuchen mit den Zika-Viren, allerdings ohne dass sie die Entwicklung der neuronalen Stammzellen beeinträchtigten. Die Forscher gehen von einer engen Wechselwirkung von Dengue- und Zika-Viren aus. Beide werden von Mücken der Gattung *Aedes* übertragen. Und in vielen Gebieten, in denen das Zika-Virus verbreitet ist, wurden bei einem hohen Anteil der Bevölkerung Antikörper gegen Dengueviren im Blutserum festgestellt. Möglicherweise könnte eine überstandene Dengueinfektion gegen Zika-Viren immun machen. Dies könnte erklären, warum trotz weiter Verbreitung des Zika-Virus nicht schon vor 2015 massenhaft Mikrozephalien aufgetreten sind. Es ist aber auch denkbar, dass erst die Wechselwirkung beider Viren zu den fatalen Hirnschäden führt, wie sie aktuell in Brasilien zu beobachten sind. ◂

Bernhard Fleischer ist Biologe und Wissenschaftsjournalist in Düsseldorf.

QUELLEN

Cugola, Fernanda R. et al.: The Brazilian Zika Virus Strain Causes Birth Defects in Experimental Models. In: Nature 534, S. 267–271, 2016

Garcez, Patricia P. et al.: Zika Virus Impairs Growth in Human Neurospheres and Brain Organoids. In: Science 325, S.816–818, 2016

Mlakar, Jernej et al.: Zika Virus Associated with Microcephaly. In: New England Journal of Medicine 374, S. 951–958, 2016

Oliveira Melo, A.S. et al.: Zika Virus Intrauterine Infection Causes Fetal Brain Abnormality and Microcephaly: Tip of the Iceberg? In: Ultrasound in Obstetrics and Gynecology 47, S. 6–7, 2016

SPRINGERS EINWÜRFE

DRINGEND GESUCHT: INTELLIGENTE ENERGIENETZE

Der zunehmende Einsatz erneuerbarer Energien stößt in der Praxis auf große Probleme. Wie lässt sich die Unzuverlässigkeit von Wind und Sonne kompensieren?

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

spektrum.de/artikel/1417462

Die so genannte Energiewende ist nach wie vor umstritten. Kann es gelingen, das Verfeuern von Kohle, Öl und Gas innerhalb weniger Jahrzehnte komplett durch die Nutzung von Wasserkraft, Windräder und Sonnenkollektoren zu ersetzen? Das größte Hindernis für den ehrgeizigen Plan stellt das launische Wetter dar. Der Wind weht, wann er will, und die Sonne versteckt sich in unseren Breiten gern hinter dichten Wolken. Eine von solchen Wechselfällen abhängige Energieversorgung kann nur funktionieren, wenn sie geschickt auf die wetterwendischen Primärquellen reagiert – während sie sich obendrein auf eine permanent schwankende Nachfrage einstellen muss.

Früher wandten Skeptiker ein, Wind und Sonne seien einfach zu wenig ergiebig, um mit der geballten Leistung konventioneller Kraftwerke mithalten zu können. Doch derzeit bereitet im Gegenteil das Überangebot an Alternativenergie die größten Probleme. Die Erneuerbaren

Das unerwartete Überangebot auf dem Strommarkt drückt die Rendite für die Erzeuger

liefern bereits so viel Strom, dass er häufig zu Schleuderpreisen exportiert wird, und an windig-sonnigen Spitzentagen müssen die fossilen Kraftwerke ihre Leistung schleunigst herunterfahren, damit das Netz nicht überlastet wird.

Das beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung: Die Kohlekraftwerksbetreiber erhalten eine Entschädigung für die zwangsweise verringerte Produktion, und das Überangebot auf dem Strommarkt drückt die Rendite für die Erzeuger.

Längerfristig wird die Energiewende nur dann eine Chance haben, wenn sich das Netz praktisch augenblicklich an das aktuelle Wettergeschehen anzupassen vermag. Zu diesem Zweck muss die Steuerung so »intelligent« werden, dass das Netz gleichsam ahnt, welche Kapriolen das Wetter in den nächsten Stunden und Tagen schlagen wird.

Dieses ehrgeizige Ziel verfolgt EWeLiNE. Hinter dem eigenwillig buchstabierten Mädchennamen verbirgt sich das Projekt »Erstellung innovativer Wetter- und Leistungsprognosemodelle für die Netzintegration wetterabhängiger Energieträger«, in dem unter anderem der Deutsche Wetterdienst in Offenbach und das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik in Kassel zusammenarbeiten.

Ziel des Projekts ist, mittels Computermodellen aus möglichst vielen aktuell erreichbaren Wetterdaten abzuschätzen, welche Kraftwerksleistung Wind und Sonne im Lauf der nächsten ein, zwei Tage insgesamt liefern werden. Dabei sollen sich die Modelle durch maschinelles Lernen quasi von selbst verbessern – indem sie ihre Prognosen mit dem dann tatsächlich eintretenden Energieaufkommen vergleichen.

EWeLiNE steht freilich erst ganz am Anfang. Projektleiter Malte Siefert hofft, in zwei Jahren die meisten deutschen Wind- und Solaranlagen in den Modellen erfassen zu können. Die Zeichen für einen Erfolg stehen gar nicht schlecht, denn intelligente Prognose- und Steuerungssysteme für Windenergie funktionieren bereits in acht Bundesstaaten der USA *(Nature 535, S. 212–213, 2016)*.

Allerdings hat man dort schon 2009 mit der Entwicklung intelligenter Windkraftnetze begonnen. Warum aber wurde in Deutschland so lange versäumt, die Energiewende mit allen Mitteln des digitalen Zeitalters an den unsteten Wechsel der natürlichen Bedingungen anzupassen? Offenbar war selbst das Bundesministerium für Umwelt und Energie von den Energiemengen überrascht, die Wind und Sonne allen Unkenrufen zum Trotz liefern. Immerhin fördert es jetzt Projekt EWeLiNE – besser spät als nie.

ISTOCK / REDPHOTOGRAPHER

MULTIPLE SKLEROSE
»WIR SIND ALLE INFIZIERT«

Harald zur Hausen erhielt 2008 den Medizinnobelpreis für seine Entdeckung, dass Viren Krebs verursachen. Jetzt hegt er einen neuen Verdacht: Virale Bestandteile in Milch und Rindfleisch könnten auch multiple Sklerose und andere neurodegenerative Krankheiten auslösen.

spektrum.de/artikel/1414659

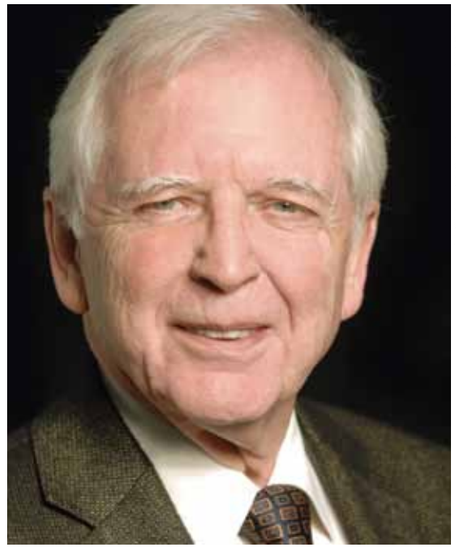
Herr Professor zur Hausen, können wir an multipler Sklerose erkranken, weil wir Milch trinken oder Steaks essen?
Es gibt tatsächlich eine Reihe von Hinweisen, dass Milch einen Risikofaktor auch für multiple Sklerose darstellt. Wir sind darauf mehr oder weniger zufällig gestoßen: Ursprünglich wollten wir den Zusammenhang zwischen dem Konsum von Milchprodukten und dem Risiko für Dickdarm- und Brustkrebs untersuchen. Und dafür hatten wir als Kontrolle auch 13 Proben von Multiple-Sklerose-Patienten zur Verfügung gestellt bekommen. Überraschenderweise enthielten zwei dieser Proben Agenzien, die wir ähnlich auch aus der Milch isoliert hatten.

Worum handelt es sich genau?
Um einzelsträngige DNA-Moleküle. Wir hatten zunächst in 130 Blutproben von Milchkühen 18 verschiedene einzelsträngige DNAs isoliert, die zu drei unterschiedlichen Gruppen gehören. Anschließend haben wir dann auch Milch untersucht und hier ebenfalls DNA-Moleküle gefunden, so dass wir jetzt über 20 verschiedene Typen kennen. Interessanterweise trat in Milch nur eine der drei Gruppen auf, die wir zuvor im Blutserum der Kühe nachgewiesen hatten.

Woher kommt diese DNA?
Wahrscheinlich aus Viren. Wir haben allerdings noch keine Virenpartikel gesehen, deshalb zögere ich etwas, mich hier festzulegen.

Wie kann virale DNA multiple Sklerose auslösen?
Da muss ich etwas weiter auszuholen. Zwei Faktoren scheinen bei der multiplen Sklerose eine wesentliche Rolle zu spielen: Vitamin-D-Mangel und die Reaktivierung von Herpesviren in Zellen des Zentralnervensystems. Schon zu meiner Zeit in Freiburg vor über 30 Jahren hat mein Mitarbeiter Georg Bauer herausgefunden, dass der Wachstumsfaktor TGF-b Viren der Herpesgruppe reaktiviert, spezifisch Epstein-Barr-Viren. Aus früheren Publikationen wissen wir, dass Vitamin D die TGF-b-Produktion reguliert: Wenn es an den Rezeptor D3 bindet, unterdrückt das die Synthese von TGF-b. Umgekehrt steigt bei Vitamin-D-Mangel der Spiegel an TGF-b an und sollte damit latente Epstein-Barr-Viren reaktivieren. Ebenfalls in Freiburg hatten wir Zellen beobachtet, die gleichzeitig mit aktiven Herpesviren und mit einzel- oder doppelsträngigen DNA-Molekülen infiziert waren. In ihnen vermehren sich diese kleinen DNAs dann gewaltig, wobei die Verdopplung des Herpesvirus-Genoms gehemmt wird. Jetzt stellt sich die interessante Frage: Führt die durch Vitamin-D-Mangel ausgelöste Virusreaktivierung in Zellen, die doppelt infiziert sind – mit Epstein-Barr-Viren und mit etwas anderem –, zur Vervielfältigung von diesem »anderen«?

Und wenn das so ist?
Dann werden vermutlich diese vervielfältigten DNA-Moleküle auch in Proteine umgesetzt, die in die Umgebung der reaktivierten Zellen gelangen, entweder über Exosomen oder als echte Viruspartikel. Das wird eine sicherlich schon vorher bestehende Immunreaktion gegen diese Partikel verstärken, welche die betroffenen Zellen zerstört. Und das wiederum führt dann zu den entzündlichen Krankheitsherden, die charakteristisch sind für die multiple Sklerose. So lautet unsere These. Wir wissen aber noch nicht, ob sie stimmt.



DEUTSCHES KREBSFORSCHUNGSZENTRUM (DKFZ) / TOBIAS SCHWERDT

Prof. Dr. med. Dr. h. c. mult. Harald zur Hausen
- Geboren 1936 in Gelsenkirchen
- Medizinstudium an den Universitäten Bonn, Hamburg und Düsseldorf (Promotion)
- 1969 Habilitation an der Universität Würzburg
- 1972 bis 1977 Leitung des Instituts für Virologie der Universität Erlangen-Nürnberg
- 1977 Ruf an den Lehrstuhl für Virologie der Universität Freiburg
- 1983 bis 2003 Vorsitzender und wissenschaftliches Mitglied des Stiftungsvorstands des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg
- 2008 Nobelpreis für Physiologie oder Medizin für seine Entdeckung, dass das humane Papillomvirus Gebärmutterhalskrebs erzeugen kann

Welche Hinweise erhärten Ihre These?
Unsere Arbeitshypothese kann einige wesentliche Aspekte der multiplen Sklerose erklären, wie etwa die typische Nord-Süd-Verteilung auf dem Globus, die immer wieder beobachtet wird: In den nördlichen Gebieten der Nordhalbkugel, bei denen wegen geringerer Sonnenlichteinstrahlung zu wenig Vitamin D gebildet wird, tritt multiple Sklerose häufiger auf als weiter südlich; auf der südlichen Erdkugel ist es genau umgekehrt.

Das heißt, man kann sich vor multipler Sklerose schützen, indem man sich in die Sonne legt.

Ja, zumindest scheint es so. In tropischen Gebieten kommt multiple Sklerose kaum vor. Insofern könnte durch Sonnenlicht gebildetes Vitamin D der entscheidende Faktor sein. Bisher konnte man das nur epidemiologisch begründen. Unsere Hypothese liefert nun ein elegantes Konzept für diesen Zusammenhang. Außerdem erklärt sie, warum nicht nur Epstein-Barr-Viren, sondern auch andere Typen von Herpesviren multiple Sklerose auslösen können. Denn aus unseren früheren Untersuchungen wissen wir, dass praktisch alle Viren der Herpesgruppe die Vermehrung der DNA-Agenzien einleiten können. Dieser Prozess wird vermutlich über DNA-Polymerasen reguliert. An die binden die kleinen Moleküle schneller als die großen Herpesvirus-Moleküle. Hier findet wahrscheinlich eine echte Konkurrenz statt, bei der die Herpes-DNA gegenüber den kleinen DNA-Molekülen verliert, die sich dann gewaltig vermehren.

Gilt das auch für die DNA-Moleküle, die Sie in Milch entdeckt haben?
Die Antwort ist eindeutig Ja. Wir haben diese Moleküle in menschliche Zellen übertragen, um zu schauen, inwieweit sie hier genetisch aktiv sind. Einige sind das sogar sehr stark, andere weniger; das variiert durchaus. Und eines der beiden Agenzien, die wir aus dem Blut von MS-Patienten isoliert haben, erwies sich als besonders aktiv in menschlichen Zellen. Wir wissen noch nicht genau, was da passiert. Wir haben analysiert, welche Proteine von den DNA-Vorlagen entstehen. Dabei ergab sich ein relativ komplexes Muster, das diese kleinen Moleküle liefern. Wir konnten inzwischen auch eine ganze Kollektion monoklonaler Antikörper gegen diese Proteine herstellen. Unsere Tests zeigen, dass sich die Agenzien an menschliche Zellen angepasst haben.

In welchen menschlichen Zellen kommen die DNA-Moleküle vor?
Auch das ist noch unklar. In den bisher untersuchten Blutproben von Gesunden haben wir sie nicht gefunden. Laura Manuelidis von der Yale University hat zwei ähnliche Agenzien bei spongiformen Enzephalopathien, also bei Prionenkrankheiten beschrieben, die sie »Sphinx« nennt. Sie postuliert, dass diese Moleküle die Erkrankungen auslösen. Allerdings sind die Sphinx-Moleküle nicht so heterogen wie unsere Isolate. Aber wenn wir unsere Daten mit denen von Manuelidis kombinieren, ergibt sich eine gewisse Vorliebe für das Nervensystem.

Wie gelangen die DNA-Moleküle in den menschlichen Körper?
Vermutlich infizieren wir uns ständig, wenn wir Milch trinken oder Rindfleisch essen. Denn wenn es im Blut ist, ist es auch in rotem Fleisch. Wir gehen davon aus, dass es sich um unterschiedliche Gruppen von Agenzien handelt, die verschiedene Krankheiten auslösen, wie multiple Sklerose oder aber Brust- oder Dickdarmkrebs.

Warum denken Sie das?
Das beruht auf epidemiologischen Studien. Wir haben uns ursprünglich für die weltweite Verteilung von Dickdarm- und Brustkrebs interessiert. Dabei ähnelt sich das globale Muster der beiden Krebserkrankungen. Es gibt aber auch auffallende Diskrepanzen; in einzelnen Regionen unterscheiden sich die Häufigkeitsraten deutlich. Da haben wir uns gefragt: Warum ist das so? In den 1970er Jahren wiesen japanische Forscher um Takashi Sugimura nach, dass beim Erhitzen von Fleisch Karzinogene entstehen. Das lieferte eine überzeugend klingende Erklärung für hohe Darmkrebsraten in Ländern mit viel Fleischkonsum. Doch was passiert in Bevölkerungsgruppen, die sich fast ausschließlich von Fisch oder Huhn ernähren? Hier entstehen bei der Zubereitung die gleichen Karzinogene. Bei Geflügel lässt sich aber epidemiologisch keine Erhöhung der Dickdarmkrebsrate nachweisen; und bei Fisch scheint es sogar einen geringen Schutzeffekt zu geben. Das passt also nicht zusammen.

Ist dann nur rotes Fleisch Krebs erregend?
Auch das lässt sich so nicht belegen. In der Mongolei wird viel rotes Fleisch verzehrt, und trotzdem ist die Dickdarmkrebsrate niedrig. In Bolivien ist das ebenfalls so. Wenn Sie nun genauer hinschauen, sehen Sie, dass das Fleisch zum Teil von anderen Rinderarten stammt als bei uns: In der Mongolei wird das Fleisch von Yaks und Zebus verzehrt, in Bolivien ist es vor allem Zebufleisch. Die Tiere unterscheiden sich genetisch von unseren heimischen Arten. Das hat mich zu der Spekulation geführt: Irgendetwas steckt in den eurasischen Milchrindern *(Bos taurus)*, die sich vom Auerochsen ableiten, das Krebs auslösen kann.

Und eben auch multiple Sklerose?
Bei multipler Sklerose scheint der Fall etwas anders zu liegen. Da spielt offenkundig die durch Vitamin-D-Mangel ausgelöste Aktivierung latenter Herpesviren im Zentralnervensystem eine Rolle. Wir haben allerdings, wie gesagt, bislang nur 13 Proben mit MS-Material untersucht, von denen zwei positiv waren. Insofern können wir hier noch keine eindeutigen Aussagen treffen.

Haben Sie Hinweise darauf, dass auch andere neurodegenerative Erkrankungen durch Milch- und Rindfleischprodukte ausgelöst werden können?
Untersucht haben wir bis jetzt nur MS-Proben, aber ausschließen lässt sich das nicht.

Glossar

Herpesviren sind eine Gruppe weit verbreiteter DNA-Viren, die beispielsweise in Lippenbläschen vorkommen. Das nach seinen Entdeckern Michael Anthony Epstein und Yvonne Barr benannte Epstein-Barr-Virus gehört ebenfalls dazu; 98 Prozent aller Menschen tragen diese Viren nach Schätzungen in sich. Eine Infektion bleibt in der Regel symptomlos.

Multiple Sklerose oder kurz MS (von lateinisch: multiplus = vielfach; griechisch: skleros = hart) ist eine chronische Erkrankung des Zentralnervensystems, bei denen vor allem die isolierenden Myelinscheiden der Nervenzellen zerstört werden.

TGF-b (von englisch: transforming growth factor = transformierender Wachstumsfaktor) ist ein Signalmolekül, das bei der Differenzierung von Zellen eine Rolle spielt.

Von der Milch zur multiplen Sklerose

Nach dem Modell von Harald zur Hausen wird multiple Sklerose durch virale DNA-Moleküle ausgelöst, die vermutlich aus Milchprodukten stammen. Bereits Säuglinge könnten sich so über die Kuhmilch anstecken. Gleichzeitig sind fast alle Menschen mit Viren aus der Herpesgruppe infiziert. Die virale DNA aus dem Rind scheint eine Vorliebe für das Zentralnervensystem zu besitzen. Somit sind einige wenige Hirnzellen doppelt infiziert, was aber in der Regel folgenlos bleibt.

Kommt es jedoch zu Vitamin-D-Mangel, etwa durch zu geringe Sonnenlichteinstrahlung in äquatorfernen Gebieten, führt das zum Anstieg des Wachstumsfaktors TGF-b, der wiederum die latenten Herpesviren reaktiviert. Dadurch vermehrt sich die virale DNA aus dem Rind sehr stark und infiziert benachbarte Zellen. Das körpereigene Immunsystem geht gegen diese Infektion vor; es treten die für multiple Sklerose typischen Entzündungsherde auf, bei denen die betroffenen Nervenzellen schließlich zu Grunde gehen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: ZUR HAUSEN, H.: WHAT DO BREAST AND CRC CANCERS AND MS HAVE IN COMMON? IN: NAT. REV. CLIN. ONCOL. 12, S. 568–570, 2015, FIG. 1

Sie haben prionenartige Erkrankungen angesprochen, zu denen ja vermutlich auch die Alzheimerdemenz zählt.
Das ist wirklich hochinteressant. In der Tat steht das auf unserem Untersuchungsplan. Ich denke dabei nicht nur an Alzheimer, sondern auch an Parkinson – also an alle Krankheiten, bei denen zelluläre Einschlusskörper auftauchen. Wir spekulieren, dass ein spezifischer Faktor die typischen Verklumpungen in den Zellen bewirkt, den wir aber bisher nicht kennen.

Lässt sich das Erkrankungsrisiko durch Erhitzen von Rindfleisch mindern?
Das kann ich Ihnen noch nicht beantworten. Die von der Gruppe um Laura Manuelidis gefundenen Agenzien scheinen sehr hitzeresistent zu sein. Das lässt sich allerdings schwer untersuchen, weil wir noch kein Infektionssystem zur Hand haben, mit dem wir die Hitzeresistenz sauber testen können. Bei den Milchprodukten haben wir die DNA aus pasteurisierter Milch, Jogurt und Crème fraîche isoliert, die wir in Heidelberger Supermärkten gekauft hatten.
Ob diese DNA weiterhin infektiös ist, weiß ich nicht. Aber sicher ist: Sie steckt noch in einer Proteinhülle, denn sie lässt sich nicht durch das Enzym DNAse abbauen – ist also offensichtlich davor geschützt.

Wird das Deutsche Krebsforschungszentrum vor dem Trinken von Milch warnen so wie vor dem Rauchen?
Nein, das ist unvorstellbar. Wir alle haben in unserer Kindheit Kuhmilch getrunken. Die Infektion findet also in einer sehr frühen Lebensphase statt, vermutlich in den ersten beiden Lebensjahren.

Das heißt, es ist sowieso zu spät.
Genau. Irgendwo in unserem Gehirn schlummern diese kleinen DNA-Moleküle. Aber bei den meisten Menschen passiert gar nichts. Kritisch wird es erst, wenn ein Herpesvirus dieselbe Zelle infiziert, die bereits ein solches Agens beinhaltet. Wenn dann Vitamin-D-Mangel zur Aktivierung des Herpesvirus führt, könnten sich die DNA-Moleküle gewaltig vermehren und die charakteristischen Entzündungsreaktionen der multiplen Sklerose auslösen.

Haben Sie Ihre eigenen Ernährungsgewohnheiten auf Grund Ihrer Forschungsergebnisse geändert?
Nein, überhaupt nicht. Ich esse auch Fleisch. Allerdings esse ich kein rohes Rindfleisch; dagegen habe ich eine gewisse Abneigung, die vielleicht eher psychologisch bedingt ist. Ich würde auch keinem raten, auf Milchprodukte und Fleisch zu verzichten, weil wir vermutlich sowieso alle infiziert sind.

Lassen sich Säuglinge durch längeres Stillen vor einer Infektion schützen?
Wahrscheinlich ja. Beim Stillen werden Abwehrstoffe übertragen, die die infektiösen Agenzien neutralisieren können. Ich rate daher, möglichst lange zu stillen – gerade im ersten Lebensjahr hat Muttermilch offenbar einen Schutzeffekt.

Danach kann das Kind selbst Antikörper entwickeln, so dass dann eine Infektion mit den DNA-Molekülen nicht mehr so riskant sein dürfte.

Heute werden viele Kinder früh mit Kuhmilch gefüttert. Ist das eine Erklärung dafür, dass multiple Sklerose als Zivilisationskrankheit gilt?
Richtig! Das sieht man auch in Indien: In den 1970er Jahren propagierten indische Kinderärzte, Säuglinge schon nach drei Monaten abzustillen und auf Kuhmilch umzustellen, weil sie damit angeblich besser ernährt würden. Indien produziert heute sehr viel Milch, und der Milchkonsum ist enorm angestiegen. Etwa seit der Jahrtausendwende lässt sich dort auch ein Anstieg der Brustkrebsrate beobachten. Die Dickdarmkrebsrate blieb übrigens niedrig – außer in Regionen, in denen traditionell mehr Rindfleisch gegessen wird, das ja sonst in Indien kaum verzehrt wird. Das legt den Verdacht nahe, dass Dickdarmkrebs mit dem Fleischkonsum korreliert, während beim Brustkrebs Milchprodukte wichtig sind.

Und wie sieht es bei multipler Sklerose aus?
Das weiß ich nicht. Die MS-Epidemiologie ist bei Weitem nicht so gut entwickelt wie die Krebsepidemiologie. Für Dickdarm- und Brustkrebs gibt es unglaublich viele Daten; bei multipler Sklerose ist es schwierig, ein kohärentes Bild zu gewinnen.

Frühere Forschungen von Ihnen ermöglichten eine Impfung gegen Gebärmutterhalskrebs. Dafür wurden Sie mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Wären auch Impfungen gegen neurodegenerative Erkrankungen denkbar?
Das ist tatsächlich unser Ziel. Ich kann mir gut vorstellen, dass wir zunächst versuchen werden, durch Impfungen von Rindern Erkrankungen beim Menschen zu verhindern. Dazu müssten wir allerdings die entsprechenden Proteine identifizieren, die für die Immunität von besonderer Bedeutung sind, was aber nicht allzu schwierig sein dürfte. Rinderimpfungen wären ideal, weil sie nicht die vielen administrativen Hürden beinhalten würden, wie wir sie bei Impfungen von Menschen kennen. Wenn die Methode bei Rindern gut funktioniert, dann wird es auch nicht so schwierig sein, sie auf den Menschen zu übertragen. Ich glaube, auch Krebs können wir langfristig nur so beherrschen. Weltweit steigt hier die Häufigkeit an. Einige Tumorerkrankungen lassen sich inzwischen zwar recht gut behandeln, aber gerade bei den häufigeren wie Bauchspeicheldrüsenkrebs oder Hirntumoren sieht die Prognose für die meisten Betroffenen sehr schlecht aus. Deswegen propagieren wir präventive Ansätze wie Impfungen, die nicht nur uns, sondern auch unseren Kindern und Enkelkindern zugutekommen.

Allerdings gibt es in der Bevölkerung Vorbehalte gegenüber Impfungen. Warum?
Da gibt es ganz unterschiedliche Gründe. Manche sagen: Wir müssen der Natur ihren Lauf lassen; die Kinder sollen durch die Infektion »natürlich« ihren Schutz entwickeln. Aber wenn Sie sehen, dass zum Beispiel 2015 in Berlin 1500 nicht geimpfte Kinder Masern bekommen haben, von denen zwei gestorben sind, ist das ein Skandal! Der zweite Grund ist, dass einige meinen: Wenn sich viele impfen lassen, brauche ich es nicht. Das ist völlig verantwortungslos. Dann gibt es eine Gruppe, die Impfungen aus religiösen Motiven ablehnt. Und beim Papillomvirus, das beim Geschlechtsverkehr übertragen wird, war es für etliche unvorstellbar, schon recht junge Mädchen dagegen zu impfen. Hier sind wir gefragt, Stellung zu nehmen; das ist eine Dauerarbeit.

DEUTSCHES KREBSFORSCHUNGSZENTRUM (DKFZ) / TOBIAS SCHWERDT

Gibt es diese Impfskepsis nur in Deutschland?
In einigen Ländern sieht es tatsächlich besser aus. So werden in England mehr als 80 Prozent der Mädchen im richtigen Alter gegen das Papillomvirus geimpft, und Gott sei Dank hat man hier inzwischen damit angefangen, auch Jungen der gleichen Altersgruppe zu impfen. In Australien beginnt man ebenfalls sehr früh damit. Die Ärzte gehen dort in die Schulklassen und informieren die Kinder sowie die Eltern – das ist offensichtlich sehr wirkungsvoll. Inzwischen haben wir ein solches Projekt auch in Hessen. Da schilderte eine Patientin, die Gebärmutterhalskrebs durchgemacht hatte, Schülern ihre Erlebnisse – die Impfrate stieg daraufhin deutlich an. Und in Österreich, das früher bei der Papillomvirus-Impfung eher ein Entwicklungsland war, hat sich eine unglaubliche Kehrtwendung vollzogen. Die neue Gesundheitsministerin Sabine Oberhauser hat jetzt auch kostenlose Impfungen für Jungen eingeführt – das fand ich toll! Es hängt manchmal schlicht an einzelnen Personen.

Was wünschen Sie sich noch, damit die Impfraten ansteigen?
Wir brauchen in unseren Ministerien effektive Koordinierungsstellen, um Forschung und Anwendung gemeinsam zu unterstützen. Bisher läuft das zu sehr getrennt ab: Das Gesundheitsministerium kümmert sich um die Gesundheit und die Behandlung der Menschen, das Forschungsministerium um die Forschung, die ja Behandlungen erst ermöglicht. Und ich wünsche mir ein deutlich besseres Medizinstudium sowie eine bessere Ärztefortbildung. Denn wenn sich wie bei uns etwa 15 Prozent der Ärzte skeptisch gegenüber Impfungen äußern, wirkt sich das verheerend aus. Mediziner und Gesundheitsbehörden müssen über die vorliegenden Daten besser informiert sein. Ich erinnere mich noch mit großem Missfallen daran, wie 13 so genannte Gesundheitswissenschaftler ein Memorandum gegen die Papillomvirus-Impfung herausbrachten – genau zu dem Zeitpunkt, als ich den Nobelpreis bekam! Dabei hatten sie glatt Literaturdaten von Frauen, die bereits sexuell aktiv waren, mit solchen verwechselt, die noch keine sexuellen Kontakte gehabt hatten. Als ich den Berliner Ärztepräsidenten und Mitunterzeichner Günther Jonitz fragte, wie das passieren konnte, hat er lapidar geantwortet: Das seien spezifische virologische Fragen, zu denen er keine Stellungnahme abgeben möchte. Das Memorandum hat dazu geführt, dass die Impfungen in Deutschland um sechs Prozent zurückgingen, was sehr ärgerlich war. Bei einer Latenzzeit des Gebärmutterhalskrebses von 20 bis 30 Jahren wird sich das Jahrzehnte später auf die Nichtgeimpften auswirken – das Risiko für Krebsvorstufen, die operiert werden müssen, steigt bei ihnen um den Faktor 20.

Ihre einst umstrittene These, dass Papillomviren Gebärmutterhalskrebs auslösen können, hat sich inzwischen bestätigt. Irrten Sie mit Ihren Annahmen auch schon mal?
Ich habe sicherlich öfter falschgelegen. Aber wenn ich sah, dass etwas nicht funktioniert, habe ich es aufgegeben. In meinem Leben habe ich drei große Problemkreise bearbeitet, bei denen – das klingt jetzt vielleicht etwas arrogant – mindestens zweimal meine Thesen richtig waren. Beim ersten Mal hatte ich postuliert, dass beim Burkitt-Lymphom, einem Lymphdrüsenkrebs, und dem Nasenrachenkrebs in jeder Krebszelle das Erbgut des Epstein-Barr-Virus latent enthalten ist. Viele haben das damals nicht geglaubt, aber ich konnte es mit meiner Arbeitsgruppe in Würzburg beweisen. Das erzeugte relativ viel Wirbel und führte dazu, dass ich mit 35 Jahren an einen Lehrstuhl nach Erlangen berufen wurde. Dann kam die Geschichte mit den Papillomviren, die sich im Endeffekt auch als richtig erwiesen hat. Und bei der dritten Hypothese, dem Zusammenhang zwischen Krebs beziehungsweise MS und Milchprodukten, hoffe ich natürlich, dass sich das ebenfalls bestätigt.

Was war Ihr größter Misserfolg?
In meiner allerersten Publikation, die ich 1964 in »Naturwissenschaften« publizierte, beschrieb ich menschliche Makrophagenkulturen, die angeblich spontan eine Zelllinie bildeten. Später habe ich dann durch Chromosomenanalysen gesehen: Es war keine Makrophagenlinie – ich hatte meine Proben mit Mäusezellen kontaminiert. Solche Kontaminationen in Zellkulturen passieren sehr schnell, aber damals war ich noch sehr unerfahren.

Was würden Sie heutigen Jungforschern als wichtigsten Rat mit auf den Weg geben?
Sie sollten sich eine sorgfältige Basis erarbeiten, die über das eigene Forschungsfeld hinausgeht. Ich bin nie zum Epidemiologen ausgebildet worden, aber dieses Fach hat für mich eine wichtige Rolle gespielt. Nur mit einer breiten Basis lassen sich sinnvolle Hypothesen aufstellen. Und man sollte sich nicht entmutigen lassen. Als ich 1969 nach Würzburg kam, hieß es, das wenige Jahre zuvor gegründete Institut für Virologie sei das letzte seiner Art, weil inzwischen auf dem Gebiet der menschlichen Infektionen alles bestens untersucht sei. Das war natürlich vollkommen falsch. Am massivsten wird man von den Gutachtern, den Peers, entmutigt. Meine These zum Papillomvirus ist damals von meinen Kollegen zerrissen worden, das erlebe ich auch heute noch. Einige Peers sind die entschiedensten Gegner, wenn etwas aus der Norm fällt. Eine gewisse Beharrlichkeit ist also sicher notwendig. Ich habe früher einmal gesagt: Persistierende Viren erfordern persistierende Virologen. ◂

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema Multiple Sklerose finden Sie unter **spektrum.de/t/multiple-sklerose**

FOTOLIA / SEBASTIAN KAULITZKI

CARSTEN KÖNNEKER

Die Fragen stellten **Spektrum**-Chefredakteur **Carsten Könneker** (links) und **Andreas Jahn**, Ressortleiter Medizin bei »Gehirn&Geist«.

QUELLEN

Zur Hausen, H.: What Do Breast and CRC Cancers and MS Have in Common? In: Nature Reviews Clinical Oncology 12, S. 569–570, 2015

Zur Hausen, H., de Villiers, E.-M.: Risikofaktoren für Krebs und MS in Kuhmilch und Rindfleisch? In: Biologie in unserer Zeit 46, S. 26–31, 2016

JIM RICHARDSON

NACHHALTIGKEIT
RETTUNG FÜR AFRIKAS ERDE

Wie lassen sich ausgelaugte Ackerböden regenerieren, damit sie wieder gute Erträge liefern? Indem die Bauern zwischen die Nutzpflanzen Bäume, Sträucher und andere ausdauernde Gewächse setzen!

John P. Reganold (links) ist Professor für Bodenkunde und Agrarökologie an der Washington State University in Pullman. **Jerry D. Glover** ist leitender Berater für nachhaltige Landwirtschaft an der United States Agency for International Development (USAID) in Washington.

spektrum.de/artikel/1417453

Mariko Majoni aus Malawi hat seine Anbaumethode drastisch verändert. Wie die meisten Kleinbauern in Afrika konnte er sich keine Düngemittel leisten und erntete von Jahr zu Jahr immer weniger Mais. Als er von Bäumen hörte, die der Luft Stickstoff entnehmen und damit den Boden auf natürliche Weise düngen, pflanzte er solche Setzlinge zwischen seine Maisreihen. Sechs Jahre später erntet er zehnmal so viel wie vorher – genug, um seine Familie zu ernähren und den Überschuss zu verkaufen. Die Nachbarn hielten ihn zuerst für verrückt; inzwischen folgen viele seinem Beispiel.

Südlich der Sahara ist es meist warm, und die Tage sind lang und sonnig. Eigentlich sollten Kulturpflanzen gut gedeihen, doch viele Landwirte rackern sich über die Maßen ab, selbst wenn sie Kunstdünger benutzen. Der Ertrag von Mais, einem Grundnahrungsmittel, liegt im Durchschnitt bei einer Tonne pro Hektar – kaum ein Zehntel dessen, was Farmer im mittleren Westen der USA erzielen. Das hat einen simplen Grund: Ein Großteil der Böden der Subsahara ist ausgelaugt, es mangelt an organischem Material und Nährstoffen für Pflanzen. Oft vermag zusätzlicher Kunstdünger die Erträge kaum zu steigern – manchmal schädigt er den Boden sogar noch mehr. Die Bodendegradation schreitet alarmierend schnell fort, und die ohnedies kümmerlichen Erträge stagnieren oder sinken immer weiter.

Die Situation ist deshalb so dramatisch, weil von den weltweit 800 Millionen unterernährten Menschen mehr als ein Viertel in Afrika südlich der Sahara lebt. Neueren Studien zufolge wird sich die dortige Bevölkerung, derzeit rund eine Milliarde Menschen, bis 2050 verdoppeln und stark vom Klimawandel betroffen sein (siehe »Afrikas bedrohliche Bevölkerungsexplosion« von Robert Engelman, **Spektrum** Juni 2016, S. 66). Ohne eine entscheidende Stärkung der Landwirtschaft werden Hungersnöte unweigerlich häufiger auftreten. Forscher sind sich einig darin, dass eine Erholung der Böden die wichtigste Voraussetzung für höhere landwirtschaftliche Produktivität ist.

Im Prinzip ist die Lösung einfach: Die Böden müssen mit zersetzten pflanzlichen und tierischen Substanzen versorgt werden. Solches organische Material liefert Stickstoff und Kohlenstoff, speichert Wasser und ernährt die für den Bodenertrag wichtigen Mikroorganismen. Doch das ist leicht gesagt. Die meisten afrikanischen Kleinbauern können nicht genug Kompost oder Mist produzieren oder erwerben, um die Erde anzureichern. Außerdem darf die Bodenverbesserung den Ackerbau nicht stören; die Familien können mit dem Anbau nicht warten, bis sich das Land erholt hat. So stehen die Bauern vor einer fast unlösbaren Aufgabe. Sie sollen die Erträge steigern, ohne Wasser und Chemikalien zu verschwenden, und gleichzeitig genug verdienen, um ihre Familie und die Dorfgemeinschaft über die Runden zu bringen.

Die von Majoni gewählte Lösung beruht auf einer Anbaumethode, die Perennierung (englisch perenniation) heißt, weil sie sich auf perennierende (mehrjährige, ausdauernde) Pflanzen stützt. Man setzt bestimmte Bäume, Sträucher oder mehrjährige Gräser zwischen die Kulturpflanzen, was die Böden verbessert, die Erträge steigert und die langfristige Nachhaltigkeit der Nahrungsmittelproduktion gewährleistet. Die zusätzlichen Pflanzen versorgen den Boden mit Kohlenstoff und Stickstoff, speichern Wasser, hemmen die Erosion, bekämpfen Schädlinge und unterstützt obendrein die Aufnahme von Kunstdünger. Die Perennierung

Pflanzenzüchter Albert Chamango in Mali zeigt stolz den Erfolg seiner Arbeit: Die Erdnüsse gedeihen gut neben den höher wachsenden Straucherbsen, welche die Ackererde zusätzlich anreichern.

JIM RICHARDSON

ergänzt gut den pfluglosen Ackerbau und die biologische Landwirtschaft sowie speziell gezüchtete Pflanzensorten, die Trockenheit vertragen und resistent gegen Krankheiten und Schädlinge sind. Zudem liefern die mehrjährigen Pflanzen den Bauern Viehfutter und Feuerholz.

Drei Perennierungsvarianten zeigen, auf welche Weise Bauern die Erträge von wichtigen Grundnahrungsmitteln wie Mais oder Sorghum nachhaltig steigern und gleichzeitig die Böden anreichern können. Die drei Ansätze haben sich im subsaharischen Afrika als besonders erfolgreich erwiesen. Im Verlauf von mehreren Jahren lassen sich damit die Erträge von einer Tonne auf drei Tonnen pro Hektar anheben. Von solchen Erfahrungen könnten auch Regionen mit nährstoffarmen tropischen und subtropischen Böden in Südasien und Südamerika profitieren.

Die von Majoni und anderen afrikanischen Bauern am häufigsten angewandte Perennierungsstrategie ist die immergrüne Landwirtschaft. Man pflanzt dazu auf den Feldern der einjährigen Erntepflanzen zusätzlich bestimmte Baumarten an. Die stickstoffreichen Blätter fallen ab und düngen die Oberfläche; die tiefen Wurzeln führen dem Boden mehr Stickstoff und Kohlenstoff zu. Oft verwenden die Bauern den Anabaum, *Faidherbia albida*, eine afrikanische Akazienart. Da der Baum hauptsächlich in der Zeit zwischen Ernte und Aussaat der Nutzpflanzen wächst, wetteifert er nicht mit ihnen um Wasser, Nährstoffe oder Sonnenlicht. Wo die Bauern die Kulturpflanzen von Hand ernten, können sie die Bäume zufällig platzieren; sie können sie aber auch regelmäßig und in größeren Abständen anordnen, um Raum für Traktoren und Mähdrescher zu schaffen. In den letzten Jahrzehnten haben mehr als 100 000 Bauern in Sambia diese »Düngebäume« in ihre Maisfelder integriert. In Niger und Mali ließen sie auf Hirse- und Sorghumfeldern mit einer Gesamtfläche von mehr als fünf Millionen Hektar wild wachsende Bäume stehen und schufen so halb natürliche Parklandschaften.

Die bis zu 30 Meter hohen Bäume reichern Phosphor und Kalium an, die sie aus tieferen Bodenschichten gewinnen, welche die Kulturpflanzen nicht erreichen können.

AUF EINEN BLICK
TRICKREICHE ANBAUMETHODEN

1 In vielen Gebieten Afrikas südlich der Sahara sind die Äcker erschöpft. Düngemittel allein helfen hier wenig, ja können sogar schaden.

2 Durch den Anbau perennierender – mehrjähriger – Bäume und Sträucher zwischen den Kulturpflanzen lässt sich die Bodenqualität verbessern und der Ernteertrag steigern.

3 Mehr als eine Million Afrikaner nutzen bereits solche Perennierungsstrategien – aber weitere Millionen Bauern brauchen technische und finanzielle Unterstützung dafür.

Sich zersetzende Baumblätter und Wurzelaktivität machen all diese Nährstoffe dann den angebauten Nutzpflanzen zugänglich. Außerdem schützen die Bäume die Kulturpflanzen vor heißen, trockenen Winden und reduzieren deren Wasserverdunstung. Diese Vorteile können die Erträge auf das Doppelte oder – wenn man sie mit modernen Pflanzensorten und Dünger kombiniert – sogar auf das Dreifache steigern.

In Ostafrika wenden mehr als 30 000 Bauern einen weiteren Typ der Perennierung an, das Push-Pull-System. Man lässt zwischen den Maisfeldern und an deren Rändern bestimmte perennierende Pflanzen wachsen, damit sie Schadinsekten und Unkräuter vertreiben (»push«) oder weglocken (»pull«); nebenbei mildern sie die Erosion, produzieren Viehfutter und sparen Düngemittel. Mit Push-Pull-Systemen bekämpfen die ostafrikanischen Bauern sowohl den Stängelbohrer, dessen Larven sich gierig in die Maisstängel fressen, als auch das Strigakraut, das den Maiswurzeln Nährstoffe raubt. Die Bauern setzen zwischen den Maisreihen *Desmodium uncinatum*, eine mehrjährige Hülsenpflanze, die sie normalerweise dem Vieh verfüttern und hier einen doppelten Push-Effekt ausübt: Oberirdisch vertreibt *Desmodium* mit seinem Geruch die Motten des Stängelbohrers und hindert sie daran, ihre Eier im Mais abzulegen; unterirdisch bekämpft eine von den Wurzeln erzeugte Substanz das Strigakraut.

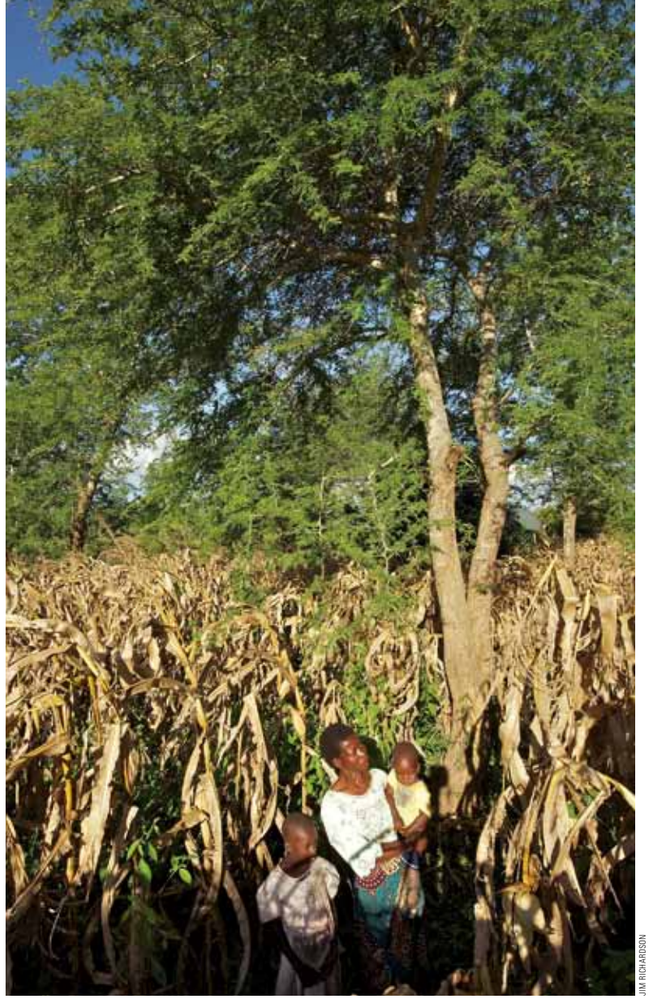
Düngebäume und Insektenfallen

Um den Insektenbefall weiter zu reduzieren, umgeben die Bauern die Felder mit perennierendem Napiergras *(Pennisetum purpureum)*, das nicht nur wertvolles Viehfutter ist, sondern auch einen Pull-Effekt ausübt: Das Gras lockt die von *Desmodium* vertriebenen Stängelbohrer an und produziert ein klebriges Harz, das die Larven festhält.

Wo der Mais sowohl vom Stängelbohrer als auch vom Strigakraut bedroht ist, können Push-Pull-Systeme den Ernteertrag glatt verdoppeln; sind nur Stängelbohrer das Problem, lassen sich die Erträge immerhin um 25 bis 30 Prozent steigern. Mehr Viehfutter und erhöhter Stickstoffgehalt des Bodens sind ein zusätzlicher Bonus.

Der dritte, von Forschern aus Malawi und den USA entwickelte und von mehr als 8000 malawischen Bauern genutzte Ansatz ist das Doppel-Hülsenfrucht-System: Der Bauer pflanzt eine niedrig und schnell wachsende Hülsenfrucht wie Erdnuss oder Sojabohne zusammen mit der Straucherbse, einer tiefer wurzelnden sowie höher und deutlich langsamer wachsenden Hülsenfrucht. Erdnuss oder Soja sind nach wenigen Monaten reif, noch bevor die Straucherbsen sie überragen und ihnen das Sonnenlicht nehmen können. Nachdem Erstere abgeerntet wurden, fallen ihre Blätter ab und reichern den Boden an. Die Straucherbsen reifen ein bis zwei Monate später; nach der Ernte werfen die Pflanzen ebenfalls ihre Blätter ab und liefern der Erde weitere Nährstoffe.

Da die beiden Pflanzentypen verschieden schnell wachsen und unterschiedlich tief wurzeln, konkurrieren sie kaum um Nährstoffe oder Wasser. Das Doppelfruchtsystem steigert den jährlichen Ernteertrag an proteinreichen Pflanzen, verbessert die Böden und erfordert weniger Arbeit als



JIM RICHARDSON

Die Bäuerin Rhoda Mang'yana hat den Ertrag auf ihrem Acker in Malawi enorm gesteigert, seit sie zwischen den Maisstauden Bäume pflanzt, deren Laub und Wurzeln den Boden erneuern.

zwei separat angebaute Früchte. Außerdem bereichert diese Form des Anbaus den Speiseplan der Familie.

Da die Straucherbse nach ihrer Ernte erneut Früchte bildet, können Bauern zwischen die erneut austreibenden Pflanzen Mais setzen und anschließend Mais und ein zweites Mal Straucherbsen ernten. In zwei Anbauphasen liefert dieses System drei Ernten von Hülsenfrüchten sowie eine Maisernte – und damit 50 Prozent mehr Eiweiß als der traditionelle Fruchtwechsel zwischen Mais und Hülsenfrüchten.

Mehr als eine Million subsaharischer Bauern profitiert von Perennierungsstrategien, doch Millionen andere haben noch nie davon gehört, oder es mangelt an technischer und finanzieller Unterstützung. Nachhaltige Verfahren sind nicht so leicht anzuwenden wie Düngemittel oder Pestizide. Die Bauern müssen erst lernen, mehrjährige und einjährige Pflanzen gemeinsam anzubauen, ausgedehnte Fruchtwechselperioden zu organisieren und die unterschiedlichen Ernten zu vermarkten. Da viele Bauern das bewirtschaftete Land nicht selbst besitzen oder nicht dauerhaft pachten können, scheuen sie aber oft solche längerfristigen Anbaupläne.

Daher muss die internationale Gemeinschaft verstärkt mithelfen, bereits bewährte Methoden zu verbreiten und neue auszuprobieren. Das World Agroforestry Center, ein internationales Forschungsinstitut zur Entwicklung der immergrünen Landwirtschaft, schließt gerade ein Vierjahresprojekt namens Trees for Food Security ab; Partner sind die Regierungen von Äthiopien, Ruanda, Burundi und Uganda. Das Program for Sustainable Intensification der US-Behörde USAID (United States Agency for International Development) unterstützt alle drei im Artikel beschriebenen Techniken.

Forscher am International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics sowie an der Universität von Malawi in Zomba und der Michigan State University in East Lansing helfen ostafrikanischen Bauern, das Doppel-Hülsenfrucht-System zu verbessern. Sie entwickeln dafür Sorten von Straucherbsen, die an unterschiedliche klimatische Bedingungen und lokale Anbaumethoden angepasst sind. Andere Experten haben perennierende Varianten der traditionell einjährigen Kulturpflanzen Sorghum, Weizen und Reis entwickelt und versuchen nun, mehr Ertrag zu erzielen und weitere wünschenswerte Eigenschaften der neuen Sorten zu verstärken. Und an der Washington State University in Pullman, an der Michigan State University sowie am gemeinnützigen Land Institute in Salina (Kansas) wird perennierendes Getreide gezüchtet, das in unterschiedlichen Böden gedeihen kann.

All das sind gute Ansätze, aber noch fehlt eine umfassende Antwort auf die Frage: Welche Perennierung eignet sich am besten für welche Umwelt? Um sie beantworten zu können, möchten Forscher an der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey) in Zusammenarbeit mit chinesischen Agrar- und Bioenergie-Firmen ein weltumspannendes Netzwerk von 27 bis 45 Stationen aufbauen. Es soll die Tauglichkeit von Bäumen, Büschen und anderen mehrjährigen Pflanzen für die lokalen Klima-, Umwelt- und Kulturbedingungen untersuchen. Die Kosten des Projekts werden auf 450 Millionen bis 1,8 Milliarden Dollar geschätzt.

Das ist viel Geld, doch die Investition lohnt sich, wenn man bedenkt, dass allein den Anbauflächen Subsahara-Afrikas Jahr für Jahr Stickstoff, Phosphor und Kalium im Wert von rund 4 Milliarden Dollar verloren gehen. Lokal angepasste Perennierungsstrategien würden diese enormen Verluste entscheidend mindern – und damit helfen, die Ernährung der afrikanischen Bevölkerung langfristig sicherzustellen. ◂

QUELLEN

Garrity, D. P. et al.: Evergreen Agriculture: A Robust Approach to Sustainable Food Security in Africa. In: Food Security 2, S. 197–214, 2010

Glover, J. D. et al.: Plant Perennials to Save Africa's Soils. In: Nature 489, S. 359–361, 2012

Sánchez, P. A.: Tripling Crop Yields in Tropical Africa. In: Nature Geoscience 3, S. 299–300, 2010

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
EIN DIAMANT IST UNVERGÄNGLICH?

Mit einem spektakulären Experiment versetzte der Begründer der modernen Chemie seine Zuschauer einst in Erstaunen.

Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

spektrum.de/artikel/1417461

Mit ihrem Funkeln haben Diamanten die Menschen schon immer fasziniert. Einer der größten und ältesten ist der Koh-i-Noor, dessen Historie angeblich mehr als 5000 Jahre zurückreicht. Vermutlich stammt er aus Kollur, einem alten Abbaugebiet von Diamanten im Südosten Indiens. Der Überlieferung zufolge stritten schon Hindu-Götter um den Stein. Brahmanen setzten ihn – so die Legende – schließlich in die Stirn einer Statue von Shiva ein.

Nachweislich befand sich der Koh-i-Noor im 14. Jahrhundert im Besitz des Rajas von Malwa, einer Region im westlichen Mittelindien. Später zierte er den damals weltbekannten Pfauenthron in Delhi. Der Sage nach ist der Stein jedoch mit einem Fluch belegt. Demnach wird sein Eigentümer zwar »die Welt besitzen, aber das größte Unglück erfahren«. Nur eine Frau soll den Diamanten ungestraft tragen dürfen.

Tatsächlich kamen viele seiner Besitzer auf mehr oder minder abscheuliche Art ums Leben – so auch der persische Schah Nadir (1688–1749), der nach der Eroberung Delhis im Jahr 1739 dem damals regierenden Großmogul den Diamanten mit einem Trick abluchste. Letzterer hatte sich vorsorglich ein, wie er meinte, vorzügliches Versteck dafür ausgedacht: seinen Turban. Und so suchte der Eroberer zunächst vergeblich danach. Doch dann verriet ihm eine abtrünnige Haremsdame das Geheimnis. Der listige Nadir schlug seinem Widersacher daraufhin als Zeichen der Versöhnung einen Turbantausch vor. Dieser Geste konnte sich der Großmogul nicht verweigern. Als der Schah später in der Nacht in seinem Schlafgemach den Turban entfaltete und den Diamanten erblickte, rief er aus: »Koh-i-Noor!« – übersetzt: »ein Berg von Licht!«. Von da an trug der Diamant diesen Namen.

Lange konnte sich der Schah aber nicht an ihm erfreuen, denn wenige Jahre später kam er bei einem Aufstand in Teheran ums Leben. In der Folge gelangte der Koh-i-Noor in die Schatzkammer des Punjab-Reichs im heutigen Grenzgebiet zwischen Pakistan und Indien. Nach dessen Eroberung durch die Engländer im Jahr 1849 erhielt Königin Victoria (1819–1901) den Stein als Geschenk der Britischen Ostindien-Kompanie. Sie ließ ihn nochmals schleifen, um sein Funkeln zu verbessern. Aus einem Diamanten von ursprünglich 600 Karat, der zu diesem Zeitpunkt noch 186 Karat wog, wurde so ein 110-Karäter. Außerdem verlor der Stein sein charakteristisches fahlgrünes Leuchten.

Königin Victoria kannte den Fluch des Koh-i-Noor. Deshalb ließ sie ihn in eine Krone einsetzen, die laut Testament weiblichen Regenten vorbehalten bleiben sollte. Als Königin Mary (1867–1953) im Jahr 1911 den britischen Thron bestieg, trug sie die Krone mit dem sagenumwobenen Stein aus Indien.

Im englischen Königshaus landete auch der größte je gefundene Diamant, der in Rohform 3106 Karat wog. Er wurde 1905 in der südafrikanischen Burenrepublik Transvaal entdeckt und nach dem damaligen Direktor des Bergwerks, Sir Thomas Cullinan, benannt. Die Minengesellschaft verkaufte den Stein an die Regierung der britischen Kolonie Transvaal, die ihn König Edward VII. (1841–1910) zum Geburtstag schenkte.

Die Überführung nach England war hollywoodreif. Auf dem Schiff, das den Diamanten angeblich in einem Tresor beförderte, hatten sich zahlreiche Diebe und Räuberbanden eingemietet, so dass es wiederholt zu Überfällen und Angriffen auf die 50 Mann starke Sicherheitsmannschaft kam. Einer der Bewacher sowie etliche Kriminelle kamen dabei ums Leben. 36 Gangster wurden nach dem letzten Angriff festgenommen und in Ketten nach England gebracht.

Dennoch gelang es einem bis heute unbekannten Trickdieb, den Stein zu entwenden. Ein Besatzungsmitglied wollte eine Frau gesehen haben, die sich in den Raum mit dem Tresor hineinschlich und wieder verschwand. Während der hektischen Suche nach ihr blieb der Diamant unbeaufsichtigt. Dies nutzte der Dieb, um den Tresor aufzubrechen und den Inhalt an sich zu nehmen. Viel Freude dürfte er an dem Stein jedoch nicht gehabt haben, denn es handelte sich um eine Nachbildung.

JOSEPH ASSCHER & CIE: THE CULLINAN DIAMOND. A SERIES OF 15 PHOTOGRAPHS SHOWING VARIOUS STAGES OF THE CUTTING. AMSTERDAM, 1909 / PUBLIC DOMAIN

Der größte je gefundene Diamant wog in Rohform 3106 Karat. Bei seiner Spaltung entstanden diese neun Hauptbruchstücke.

Der echte Cullinan kam in einem gewöhnlichen Postpäckchen sicher in England an. König Edward ließ ihn von dem damals berühmten Diamantschleifer Joseph Asscher in Amsterdam bearbeiten. Dieser studierte den Stein monatelang. Am 10. Februar 1908 wagte er dann den ersten Spaltversuch. Es war ein Fehlschlag: Die Klinge brach ab, doch der Stein blieb unversehrt. Der zweite Versuch gelang. Allerdings fiel Asscher beim Spaltgeräusch vor Aufregung in Ohnmacht. Aus weiteren Spaltvorgängen resultierten schließlich neun große (Bild oben) und 96 kleinere Stücke. Das größte Fragment wog nach dem Feinschliff noch 530 Karat und ziert unter dem Namen Cullinan I das englische Königszepter. Das zweitgrößte Stück, der Cullinan II, befindet sich in der englischen Staatskrone.

Höchstwahrscheinlich waren Diamanten noch bis zum 4. Jahrhundert v. Chr. im Mittelmeerraum unbekannt. Deshalb gab es zum Beispiel in der griechischen Sprache auch kein eigenes Wort dafür. Umso mehr überrascht, dass der Diamant, als er zum Handelsgut wurde, nicht den Namen seines Herkunftslandes bekam, wie das sonst bei importierten Waren üblich war. Stattdessen bezeichnete man ihn mit einem längst vorhandenen griechischen Wort, nämlich Adamas, was wörtlich übersetzt »unbezwingbar« bedeutet. Daraus leitet sich die heutige Bezeichnung ab.

»Überhaupt ist seine Härte unbeschreiblich«

Unter dem Begriff Adamas berichtete auch Plinius der Ältere (23/24 bis 79 n. Chr.) in seiner »Naturalis Historia«, einem enzyklopädischen Werk zur Naturkunde, über das Mineral: »Überhaupt ist seine Härte unbeschreiblich«, schreibt er, »und gleichzeitig ist es von Natur aus feuer-

beständig und kann niemals in Glut gesetzt werden, woher es auch den Namen erhalten hat. Die Übersetzung des griechischen Wortes ist ›unbezwingbare Kraft‹.«

Bei der Feuerbeständigkeit von Diamant irrte Plinius. Was die Härte betrifft, sollte er dagegen Recht behalten. Dank dieser Eigenschaft wird der Edelstein heute vielfach zur Herstellung von Bohr-, Schneid- und Schleifwerkzeugen sowie als Zugabe in Polierpasten genutzt. Früher diente seine Härte auch als Unterscheidungsmerkmal gegenüber anderen Edelsteinen oder vermeintlichen Diamanten.

Diese Idee ging auf den deutschen Chemiker und Physiker Friedrich Mohs (1773–1839) zurück, der ab 1802 im Auftrag des exzentrischen Wiener Bankiers Jakob Friedrich van der Nüll (1750–1823) dessen umfangreiche Edelsteinsammlung ordnete. Zur Kategorisierung wählte der Forscher physikalische Eigenschaften wie Härte, spezifisches Gewicht und Spaltbarkeit. Bei seinen Untersuchungen stellte er fest, dass man mit härteren Edelsteinen Kratzer in weichere machen kann. Nur Diamanten ließen sich nicht von anderen Stoffen ritzen. Als Professor für Mineralogie an der Universität Graz sortierte Mohs später die unterschiedlichsten Mineralien nach ihrer Härte auf einer Skala von eins bis zehn, wobei er dem Diamanten als härtestem natürlichem Mineral den Wert zehn zuordnete.

Vielleicht kennen Sie noch den Werbespruch der Firma de Beers: »Ein Diamant ist unvergänglich!« Unter Normalbedingungen trifft das sicherlich zu. Aber schon vor 240 Jahren demonstrierte der große französische Chemiker Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794) in einer spektakulären öffentlichen Vorführung, dass der Edelstein bei hohen Temperaturen verbrennt, indem er mit Sauerstoff zu Kohlendioxid reagiert. Zu jener Zeit standen erstmals große Brenngläser zur Verfügung, mit denen Chemiker vorher nicht mögliche Schmelz- und Oxidationsversuche durchführen konnten.

Auf einem der großen Pariser Plätze baute Lavoisier eine abenteuerlich anmutende Apparatur auf. Zwei große hintereinander angeordnete Brennspiegel bündelten die Sonnenstrahlen und fokussierten sie auf einen Diamanten, der sich in einem mit Luft (später war es dann reiner Sauerstoff) gefüllten Glaskolben befand. Auf diese Weise erreichte der Chemiker Temperaturen von mehr als 3000 Grad Celsius. Staunend sahen die vielen tausend Zuschauer, wie der Diamant sich entzündete und buchstäblich in Luft auflöste.

Diesen Versuch können Sie mit einfachen Mitteln auch selbst durchführen. Dazu benötigen Sie nur einen Bunsenbrenner (beispielsweise erhältlich unter www.contorion.de), ein etwa 30 Zentimeter langes Rohr aus Quarzglas mit einem Innendurchmesser von rund neun Millimetern (unter anderem bei gastroteileshop.de zu beziehen), zwei 100-Milliliter-Kunststoffspritzen sowie medizinischen Sauerstoff aus der Apotheke und natürlich Diamantbruch. Letzteren können Sie etwa bei der Firma Klüver & Schulz (www.kluever undschulz.de) erwerben.

Der Aufbau der Versuchsapparatur ist in der Zeichnung links unten gezeigt. Fixieren Sie die Kunststoffspritzen mit Klemmen an Stativen und verbinden Sie sie mittels passender Gummischlauchstücke mit dem Quarzrohr. Vorher müssen Sie eine von ihnen mit Sauerstoff füllen.

Erhitzen Sie das Quarzrohr an der Stelle, an der sich der Diamant befindet, zunächst rund zwei Minuten lang mit rauschender, nichtleuchtender Flamme. Sobald der Stein rot zu glühen beginnt, leiten Sie den Sauerstoff durch vorsichtiges Drücken der Spritzenstempel langsam hin und her. Plötzlich entzündet sich der Diamant und brennt mit einem hellen Leuchten (Fotoserie links unten). Nun können Sie den Bunsenbrenner ausmachen. Allmählich wird der Edelstein immer kleiner und verschwindet schließlich ganz.

Doch was ist aus ihm geworden? Wenn man Elemente verbrennt, verbinden sie sich mit Sauerstoff – wie Lavoisier bewies, der damit die überkommene alchemistische Vorstellung vom Entweichen eines Feuerstoffs, dem Phlogiston, widerlegte und zum Vater der modernen Chemie wurde. Die Reaktionsprodukte heißen Oxide. So verbrennt etwa Schwefel zu Schwefeldioxid oder Magnesium zu Magnesiumoxid. Die Bezeichnung Diamantoxid findet sich allerdings in keinem Chemiebuch. Man muss also wissen, woraus Diamant besteht, um sagen zu können, was bei seiner Verbrennung entsteht.

Es war wiederum Lavoisier, der bei seinen Versuchen eine entscheidende Beobachtung machte, die ihm den Weg zur Antwort wies. Am 14. August 1773 versuchte er bei bewölktem Himmel mit seinen Brenngläsern Diamanten zu verbrennen, was ihm jedoch nicht gelang. Stattdessen bemerkte er, dass fünf der Steine »nach diesem Versuche matt, schwarz und samtartig geworden sind«. Sie fühlten sich wie »ein kohliger Stoff oder Ruß« an. Das brachte Lavoisier auf den Gedanken, dass es sich bei Diamant ebenso wie bei Graphit um elementaren Kohlenstoff handeln könnte.

Um diese Vermutung zu überprüfen, verbrannte er wiederum einige Diamanten, diesmal allerdings bei strahlendem Sonnenschein. Dazu notierte er: »Ich habe die Glocke, welche die Diamanten bedeckte, schnell, jedoch mit der notwendigen Behutsamkeit umgekehrt, dass die Luft in derselben nicht ganz erneuert ward, und habe einige Unzen Kalkwasser in dieselbe hineingegossen.« Damit wollte Lavoisier das bei der Verbrennung von Kohlenstoff gebildete Kohlendioxid nachweisen. Leitet man das Gas nämlich in eine klare, farblose Lösung von Calciumhydroxid, so trübt diese sich, weil fester, schwer löslicher Kalk entsteht. Die entsprechende Reaktionsgleichung lautet (wobei aq für wässrige Lösung, g für gasförmig, s für fest und l für flüssig steht):

$Ca(OH)_2(aq)$	+	$CO_2(g)$	$CaCO_3(s)$	+	$H_2O(l)$
Kalkwasser	+	Kohlendioxid	Kalk	+	Wasser

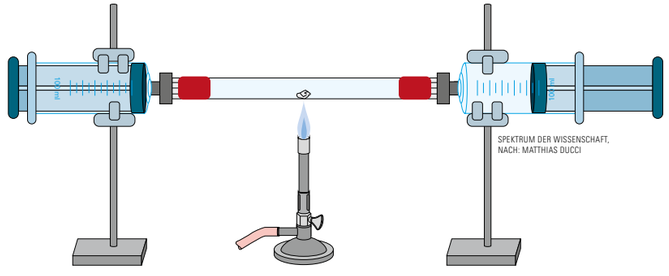
Auch das können Sie leicht nachmachen. Zur Herstellung des Kalkwassers müssen Sie ein bis zwei Esslöffel Blitzzement aus dem Baumarkt in 100 Milliliter Wasser aufschlämmen und den Brei anschließend durch zwei ineinandergepackte Kaffeefilter laufen lassen. Bei dem farblosen Filtrat handelt es sich um eine Lösung von Calciumhydroxid. Letzteres entsteht bei der Reaktion des im Blitzzement enthaltenen Calciumoxids mit Wasser nach der Gleichung:

$CaO(s)$	+	$H_2O(l)$	$Ca(OH)_2(aq)$
Calciumoxid	+	Wasser	Kalkwasser

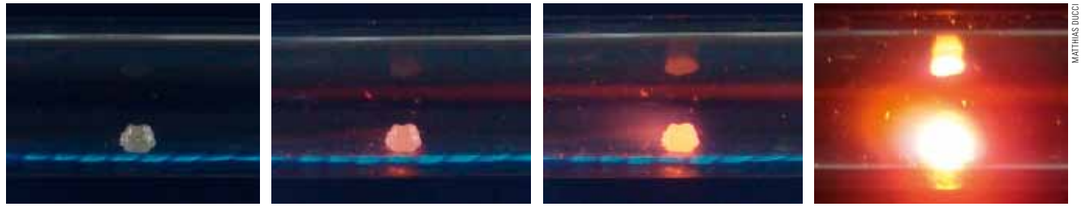
Für den Versuch drücken Sie das Gasgemisch in dem Quarzrohr, nachdem der Diamant verbrannt ist, in eine der beiden Spritzen. Diese entfernen Sie von der Apparatur, tauchen sie mit der Spitze in rund 20 Milliliter Kalkwasser und drücken den Inhalt langsam in die Flüssigkeit. Die Calciumhydroxidlösung trübt sich daraufhin. Das ist der Beweis, dass sich bei der Verbrennung von Diamant Kohlendioxid bildet und der Edelstein, wie Lavoisier richtig vermutet hatte, aus Kohlenstoffatomen besteht.

Versuchsaufbau: So verbrennt man Diamanten

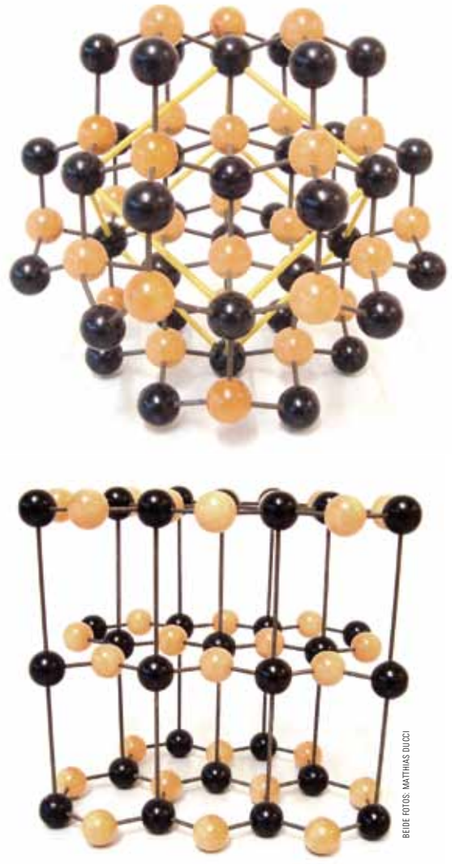
Man erhitzt Diamantstücke in einem Quarzrohr mit einem Bunsenbrenner bis zur Rotglut und leitet dann mittels zweier Kunststoffspritzen reinen Sauerstoff darüber hin und her.



Daraufhin entzündet sich der Edelstein und brennt mit hellem Leuchten. Dabei wird er immer kleiner, bis er schließlich ganz verschwunden ist.



Diamantbruch eignet sich als Material für den Nachweis, dass der Edelstein brennbar und nur eine Modifikation von gewöhnlichem Kohlenstoff ist.



Diamant (oben) und Graphit (unten) haben völlig unterschiedliche Strukturen. Die Kugeln für die Kohlenstoffatome in den Modellen sind abwechselnd schwarz und hellbraun gefärbt, damit sich die Gitterstrukturen besser erkennen lassen.

Unter Normalbedingungen ist Diamant instabiler als Graphit und sollte sich in diesen umwandeln

Der französische Chemiker war übrigens nicht der Erste, der Diamanten verbrannte. Dass die Edelsteine »verschwinden«, wenn man Sonnenlicht mit starken Brenngläsern darauf fokussiert, hatten schon 1694 die italienischen Naturforscher Giuseppe Averani (1662–1738) und Cipriano Targioni (1672–1748) gemacht. Kaiser Franz I. (1708–1765) vernichtete in Wien auf diese Weise Diamanten im Wert von einigen tausend Gulden. Freilich ging es ihm nicht um wissenschaftliche Erkenntnis. Sein Motiv verrät eine Schrift von 1751, wo es heißt: »Der Kaiser Franz hatte von einem Unbekannten das vorgegebene Geheimnis des Diamantgusses erhalten und wollte also wahrscheinlich durch Zusammenschmelzung kleiner Diamanten größere erlangen.«

Dass Diamant und Graphit Erscheinungsformen ein und desselben Elements sind, mutet höchst erstaunlich an – haben sie doch völlig unterschiedliche Eigenschaften: farblos, extrem hart und elektrisch isolierend der eine; schwarz glänzend, relativ weich und Strom leitend der andere. Dennoch sind beide aus denselben Atomen aufgebaut. Der Unterschied in den physikalischen und chemischen Eigenschaften beruht auf der unterschiedlichen Anordnung dieser Bausteine sowie den abweichenden Bindungsverhältnissen. Im Diamant hat jedes Kohlenstoffatom vier nächste Nachbarn, die sich in den Ecken eines gedachten Tetraeders befinden. Mit ihnen ist es jeweils über eine kovalente Einfachbindung verknüpft. Graphit weist dagegen ein Schichtgitter auf. Darin liegen die Kohlenstoffatome bienenwabenartig in Sechsringen in der Ebene und sind durch alternierende Einfach- und Doppelbindungen aneinandergekoppelt. Inzwischen kennt man weitere Modifikationen des Kohlenstoffs – so etwa die Fullerene, in denen die Kohlenstoffatome fußballartige Käfige aus Fünf- und Sechsecken bilden.

Die Aufklärung der Diamantstruktur gelang 1913 dem britischen Physiker William Henry Bragg (1862–1942) und seinem Sohn William Lawrence (1890–1971). In den 1920er Jahren konnten der Niederländer Peter Debye (1884–1966) und der Schweizer Paul Scherrer (1890–1969) dann auch den atomaren Aufbau von Graphit ermitteln. Alle vier benutzten die Methode der Röntgenstrukturanalyse, die auf die Pionierarbeiten des deutschen Physikers Max von Laue (1879–1960) zurückgeht.

Superman zeigt, wie künstlicher Diamant hergestellt werden kann

Wenn sowohl Diamant als auch Graphit aus Kohlenstoffatomen bestehen, erhebt sich natürlich sofort die Frage, ob man beide ineinander umwandeln und insbesondere aus Graphit den viel wertvolleren Diamanten herstellen kann. Wer den Film »Superman III – der stählerne Blitz« gesehen hat, kennt die Antwort zumindest im Prinzip. In einer Szene landet der Held in einer Steinkohlemine, nimmt ein Stück Kohle und presst sie fest zusammen. Anschließend öffnet er die Hand, und ein glitzernder Diamant kommt zum Vorschein. Das Kunststück veranschaulicht eine der Bedingungen für die Umwandlung von Graphit in Diamant: ein extremer Druck von acht bis zehn Megapascal. Außerdem sind hohe Temperaturen von 2000 bis 3000 Grad Celsius erforderlich. Die künstliche Herstellung von Diamanten gelang erstmals 1955 in den USA und Schweden. Die genannten Bedingungen wurden damals in Metallschmelzen realisiert.

Heutzutage produziert man synthetische Diamanten hauptsächlich durch Abscheidung von Kohlenstoff aus der Gasphase – ein als CVD (chemical vapor deposition) bekanntes Verfahren (**Spektrum** September 1992, S. 30). Durch Zersetzung von Methan oder Acetylen erzeugte gasförmige Kohlenstoffatome regnen dabei gleichsam auf eine Unterlage herab und bauen Schicht für Schicht den Edelstein auf.

Diamant ist unter Umgebungsbedingungen übrigens energiereicher und damit weniger stabil als Graphit. Unter thermodynamischen Gesichtspunkten sollte er sich deshalb in diesen umwandeln. Der Vorgang ist jedoch kinetisch gehemmt, wie Chemiker sagen: Er findet nicht statt, weil dazu erst einmal die sehr starken Einfachbindungen zwischen den Kohlenstoffatomen aufgebrochen werden müssten. Das würde die Zufuhr großer Energiemengen erfordern, die nur bei sehr hoher Temperatur zur Verfügung stehen.

Über eine makabre Umwandlung von Graphit in Diamant berichtete der »Spiegel« im Sommer 2002 (www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/leichen-diamanten-firma-presst-tote-zu-trauer-klunkern-a-211215.html). Als Weltpremiere bot damals die Firma LifeGem Memorials aus Elk Grove Village (US-Bundesstaat Illinois) an, die Asche von verstorbenen Angehörigen oder Haustieren zu einem Edelstein zu verarbeiten. Diesen Service offerieren inzwischen auch Unternehmen in Deutschland und der Schweiz. Allerdings ist wegen des Bestattungszwangs in der Bundesrepublik, der auch für Kremationsasche gilt, der Umweg über das benachbarte Ausland erforderlich, in dem die Gesetzeslage die Veredlung der sterblichen Überreste zu einem Schmuckstück zulässt.

Zum Schluss möchten wir dem Dichter und Kaufmann Emil Rittershaus (1834–1897) das Wort geben, den die Erkenntnis, dass ein Diamant »nur« aus Kohlenstoffatomen besteht, zu dem folgenden Aphorismus inspirierte:

»Wie viele Weise gibt's zu dieser Frist,
Und doch, wie ist der Weisen Schar so klein! –
Weil jeder Diamant nur Kohle ist,
Glaubt jede Kohle Diamant zu sein.«

QUELLEN

Ducci, M. et al.: Chemistry and Cinema – Eine Unterrichtseinheit zum Themenfeld Diamant und Graphit inszeniert und illustriert mit Szenen aus Spielfilmen. In: Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 58, S. 44–49, 2009

Jansen, W. et al.: Diamant und Graphit. In: Naturwissenschaften im Unterricht – Physik/Chemie 21, S. 4–10, 1987

Littich, F.: Historische Diamanten und ihre Geschichte. Rühle-Diebener, Stuttgart 1982

Margot-und-Friedrich-Becke-Stiftung (Hg.): Diamant – Zauber und Geschichte eines Wunders der Natur. Springer, Berlin 2004

1916

Der Kopf eines kapitalen Keilers.

WEHRHAFTES WILD

»Die Sau ist neben dem Bär und Luchs das letzte wehrfähige Wild Mitteleuropas, und je mehr sie der Preis der Kultur in unwirtliche Gegenden abstößt, desto begehrlicher ist sie als Jagdwild für all jene, die am Weidwerk neben dem Naturgenuß jenes prikelnde Gefahrenleben verschollener Tage empfinden wollen, an denen unsere wackeren Altvordern die Sau mit dem blanken Eisen fingen. Der scharfgebogene, kantige Eberzahn ähnelt einem krummen Messer, aber diese Waffe ist nicht nur Abwehr- und Angriffswerkzeug, sondern auch eine zweckmäßige Einrichtung des täglichen Gebrauches. Jeder Saujäger kennt die aufgewühlten Flecke im Walde, die von der Wühlarbeit nach Wurzeln und Erdschwämmen stammen.«

Kosmos 9, S. 275–276

KOSMETIK ANTIK

»Bei Ausgrabungen in Lugano fand man einen alten römischen Krug, der eine weiche, salbenartige Masse enthielt. Die weitere Untersuchung zeigte, daß die Masse ein Gemisch von Bienenwachs und Fetten darstellte, dem die Römer Storaxharz und Terpentin zugesetzt hatten. Außerdem war Henna der Färbung und des Geruches wegen zugefügt, sowie ein Gerbstoff, der die Masse konservieren und ihr einen Duft verleihen sollte. Dies Gemenge diente den Damen als Salbe für die Haut oder die Haare.«

Die Umschau 39, S. 777

MÖRDER, AUFGEPASST!

»Man hat gefunden, daß Arsenverbindungen auch von dem Haare des Menschen aufgenommen werden. Die Ablagerung des Giftstoffes findet statt, nachdem er von den Verdauungsorganen aufgenommen wurde. Es wird deshalb in Fällen von schneller, starker Arsenvergiftung in der Leber und den Nieren nachweisbar sein. Andererseits wird die chemische Untersuchung, wenn eine langsame Arsenvergiftung mit Recht vermutet wird, das Vorhandensein des Giftstoffes im Haare zeigen, nicht aber in der Leber oder den Nieren, und man kann mit Sicherheit sagen, daß die Vergiftung nicht in der letzten Zeit erfolgt ist.«

Die Welt der Technik 17, S. 14–15

1966

Das erste Gezeitenkraftwerk.

ENERGIE AUS DEM MEER

»Das erste Gezeiten-Kraftwerk der Welt an der Rance in der Bretagne wird im Herbst in Betrieb genommen. Der Fluß ist hier 750 m breit und wird durch ein Absperr-Bauwerk gegen den Ärmelkanal abgeriegelt. Das Staubecken faßt 184 Mio. m^3 Wasser. Bei schwachen Gezeiten bis 5 m Hubhöhe arbeiten die Turbinen in Richtung Becken–Meer, bei größeren Tidehüben bis 13,5 m in beiden Richtungen. Die Gesamtleistung wird 240 Megawatt betragen. Das von der Sowjetunion bei Murmansk in Angriff genommene Gezeiten-Kraftwerk soll ebenfalls in diesem Jahr fertig werden.« *Die Umschau 17, S. 579 (Das Kraftwerk ist heute noch in Betrieb, es war jahrzehntelang das größte seiner Art. D. Red.)*

WER HOCH HINAUS WILL, MUSS LEIDEN

»Immer wieder ergaben Analysen, daß der Harnsäuregehalt bei Arbeitern am niedrigsten, bei Wissenschaftlern höher lag; den höchsten Stand erreichte er bei Direktoren. Durch diese Ergebnisse angeregt, gingen Brooks und Müller daran, das Blut von 113 Professoren der Universität Ann Arbor zu untersuchen. Ergab die Analyse einen besonders hohen Gehalt, so wies das Psychogramm eine Persönlichkeit von überdurchschnittlich großem Durchsetzungsvermögen aus.«

Kosmos 9, S. 366–367

DIE BLUMENWÄCHTER

»Aus den USA kommt eine Studie, wie Nutz- und Zierpflanzen auf Giftstoffe reagieren, die von Großstädten in die Luft geblasen werden. Petunien reagieren auf Aldehyde mit hellen Streifen, Tulpenblätter trocknen an der Spitze ein, wenn Fluorgas in der Luft ist, und Veilchen bekommen weiße Flecken zwischen den Blattrippen bei Schwefeldioxid. Die Reaktion wird durch das Alter der Blätter, den Ernährungszustand, Wasserhaushalt und die Lichtstärke beeinflußt.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 9, S. 376

FRÜHGESCHICHTE

RÄTSELHAFTER INDUS-KODE

NEUE SERIE

Eine 4000 Jahre alte Kultur hat nichts weiter an Aufzeichnungen hinterlassen als eine Anzahl extrem kurzer Texte. Bis heute harren sie ihrer Entzifferung.

JONATHAN BOWEN

Andrew Robinson ist Publizist in London. Er verfasste zahlreiche Bücher über Wissenschaftsgeschichte, Archäologie, alte Schriften sowie indische Geschichte und Kultur.

spektrum.de/artikel/1408641

AKG IMAGES / NIMATALLAH

AKG IMAGES / NIMATALLAH

SERIE
Magie der Schrift

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

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

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

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

Mehr als ein halbes Jahrtausend lang, von etwa 2600 bis 1900 v. Chr., blühte im Tal des Indus im heutigen Grenzgebiet zwischen Indien und Pakistan eine Kultur. Vielleicht ist sie an einer extremen Dürre zu Grunde gegangen; jedenfalls verfiel sie und geriet in Vergessenheit, bis in den 1920er Jahren britische und indische Archäologen durch Zufall ihre Ruinen entdeckten. Nach fast 100 Jahren Forschung stellen die Fachleute die Indus-Kultur, auch Harappa-Kultur genannt, auf eine Stufe mit Mesopotamien und Ägypten; sie gilt als Ursprung der indischen Kultur und sogar als mögliche Heimat des Hinduismus.

Über 1000 Siedlungen lagen verteilt über eine Fläche von mindestens 800 000 Quadratkilometern im heutigen Pakistan und Nordwestindien (**Spektrum** Juni 2001, S. 28). Die ausgedehnteste städtische Kultur ihrer Zeit hatte ungefähr eine Million Einwohner und trieb regen Handel über das Meer bis zum Persischen Golf und zu Städten wie etwa Ur in Mesopotamien, wo Gegenstände mit Indus-Schriftzeichen gefunden wurden. Erstaunlicherweise haben die Bewohner keinerlei identifizierbare Spuren von kriegerischen Auseinandersetzungen hinterlassen.

Die meisten Siedlungen der Indus-Kultur waren Dörfer. Es gab einige Städte, darunter mindestens fünf große (Karte auf S. 57). Die beiden größten, Mohenjo-Daro am Indus – inzwischen zur UNESCO-Weltkulturerbestätte ernannt – und Harappa an einem seiner Nebenflüsse, waren nach einem Plan erbaut und besaßen ein Abwassersystem, das einen Vergleich mit der Gegenwart nicht zu scheuen braucht. Man fand dort die ältesten bekannten Toiletten der Welt, Gewichtssteine in zahlreichen verschiedenen Größen, Halsketten aus sauber durchlöcherten Edelsteinen – und präzise gemeißelte Steinsiegel mit Schriftzeichen, die bis heute einer Entzifferung widerstehen (Bild links).

Auf der Spur der Schrift

Die Indus-Schrift besteht aus teilweise abstrakten Zeichen sowie Menschen- und Tiermotiven, zu denen häufig auch ein rinder- oder pferdeähnliches Tier gehört. Man findet sie eingeritzt in kleine Siegelsteine aus Speckstein, Ton oder, seltener, Metall. Die Dokumente seien »kleine Meisterwerke eines beherrschten Realismus, von einer monumentalen Kraft, die ihre bescheidene Größe weit übersteigt und gleichwohl genau zu ihr passt«. So beschrieb es 1968 Mortimer Wheeler, der bekannteste Ausgräber der Indus-Kultur.

Wer die Siegel einmal gesehen hat, wird sie nicht mehr vergessen. Mich packte es in den späten 1980er Jahren, als ein bekannter Produzent von Dokumentarfilmen mich beauftragte, über die Indus-Schrift zu recherchieren. Zugleich wollte er für die Entschlüsselung der Schrift einen beträchtlichen Preis aussetzen. Am Ende ist weder aus dem Wettbewerb noch aus der Dokumentation etwas geworden, aber für mich war der Grundstein einer Leidenschaft gelegt.

Seit den 1920er Jahren haben Fachleute und Amateure mehr als 100 Entzifferungsversuche veröffentlicht, von

Die für die Indus-Kultur typischen Steinsiegel sind nur wenige Zentimeter breit. Der Bulle sowie der kelchähnliche Gegenstand unter seinem Kopf sind häufige Motive.

denen keiner wirklich überzeugen konnte. Nachdem mittlerweile Archäologen, Linguisten und Geisteswissenschaftler immer enger zusammenarbeiten und den Computer intensiv in Anspruch nehmen, besteht nun neue Hoffnung, dass die Indus-Schrift einige ihrer Geheimnisse preisgibt.

Seit der Entdeckung des Steins von Rosette 1799 und der anschließenden Entschlüsselung der ägyptischen Hieroglyphen ab den 1820er Jahren ist es den Gelehrten gelungen, eine erstaunliche Anzahl einst rätselhafter Schriften zu verstehen. So wurde die indische Brahmi-Schrift in den 1830ern geknackt, die mesopotamische Keilschrift in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, Linear B aus dem mykenischen Griechenland in den 1950ern und die Bildzeichen der Maya aus Zentralamerika im späten 20. Jahrhundert.

Einige wichtige Schriftsysteme sind jedoch den Forschern noch immer ein Buch mit sieben Siegeln, unter anderem die zweite griechische Linearschrift Linear A, die etruskische Schrift aus Italien, Rongorongo von der Osterinsel, die Hieroglyphen auf dem so genannten »Diskos von Phaistos« aus Kreta und eben die Indus-Schrift.

Im Jahr 1932 fand Flinders Petrie, der prominenteste Ägyptologe seiner Zeit, Ähnlichkeiten zwischen den motivischen Prinzipien der Indus-Schrift und jenen der Hieroglyphen und unterbreitete auf dieser Basis einen Entzifferungsvorschlag. Walter Fairservis vom American Museum of Natural History in New York, der an Ausgrabungen im Indus-Tal teilgenommen hatte, deutete 1983 die Zeichen als eine antike Form des Drawidischen (siehe seinen Artikel in **Spektrum** Mai 1983, S. 88). Zu dieser südindischen Sprachfamilie gehört unter anderem Tamilisch. Vier Jahre später fand der Assyriologe James Kinnier Wilson von der University of Cambridge Beziehungen zwischen den Indus-Schriftzeichen und Keilschriftzeichen, mit denen die Buchhalter Mesopotamiens ihre Befunde auf Tontafeln verewigten, und veröffentlichte daraufhin eine »indo-sumerische« Dechiffrierung.

Seit den 1990er Jahren behaupten manche indische Autoren – darunter einige Wissenschaftler –, dass die Indus-Schrift eine Frühform des Sanskrit wiedergebe: jener Sprache, von der die meisten nordindischen Sprachen abstammen, darunter Hindi. Nationalistische Hindu-Politiker ziehen diese Theorie zur Unterstützung ihrer Ansprüche heran; schließlich beweise sie, dass seit dem dritten vorchristlichen Jahrtausend ununterbrochen eine Sanskrit sprechende indische Nation bestanden habe.

AUF EINEN BLICK
INSCHRIFTEN AUF STEINSIEGELN

1 Die Harappa-Kultur, die zwischen 2600 und 1900 v. Chr. im Tal des Indus bestand, hat an schriftlichen Zeugnissen nur extrem kurze Texte hinterlassen, die meisten auf Steinsiegeln.

2 Die Schrift ist bis heute nicht entziffert, weil das Material sehr spärlich ist und Anhaltspunkte wie Eigennamen fehlen.

3 Noch ist der größte Teil der Fundstätten nicht erforscht. Weitere Ausgrabungen könnten eine Klärung des Rätsels befördern, scheitern aber derzeit an den politischen Verhältnissen.

Enthalten die bisher bekannten Dokumente 676 Zeichen? Oder doch eher 62?

Der einzige Konsens unter den Indus-Schriftforschern besteht darin, dass es über die Bedeutung der Schriftzeichen keinen Konsens gibt. Drei Hauptprobleme stehen der Entzifferung im Wege: Erstens haben wir keine gesicherte Information über die zugehörige Sprache. War es eine frühe Form des Sanskrit, des Drawidischen, einer anderen indischen Sprachfamilie wie etwa Munda, oder ist sie heute gänzlich verschwunden? Linear B ließ sich entziffern, weil sich herausstellte, dass die Tafeln in einer archaischen Form des Griechischen geschrieben waren; mit der Mayaschrift gelang das nur, weil Dialekte der Mayasprache bis heute gesprochen werden.

Zweitens sind keine Namen von Herrschern oder bedeutenden Persönlichkeiten der Indus-Kultur überliefert – anders als etwa Ramses und Ptolemaios, die den Entzifferern der ägyptischen Hieroglyphen aus griechischen Aufzeichnungen bekannt waren. Drittens gibt es für die Indus-Schrift bis jetzt noch kein zweisprachiges Dokument, vergleichbar dem Stein von Rosette, der denselben Text auf Griechisch und in Hieroglyphen enthielt. Die Entzifferung der Mayaschrift begann 1876 anhand eines spanischen Manuskripts aus dem 16. Jahrhundert, das eine Diskussion über die Mayaschrift zwischen einem spanischen Pfarrer und einem lokalen, Maya sprechenden Stammesältesten in der Kolonie Yucatán wiedergibt. Vielleicht liegt ein solcher Schatz noch in Mesopotamien vergraben; immerhin trieben die Sumerer und die Akkader Handel mit der Indus-Kultur.

In den letzten Jahrzehnten sind die Indus-Schriftgelehrten um einiges weitergekommen. Der unermüdliche Indologe Asko Parpola von der Universität Helsinki hat mit Unterstützung der UNESCO zwischen 1987 und 2010 drei prachtvolle Bildbände mit Fotografien aller gefundenen Indus-Texte herausgegeben; der vierte und letzte Band steht noch aus. Durch die Analyse der Anordnung von Zeichengruppen weiß man inzwischen, dass die Schrift – meistens – von rechts nach links zu lesen ist. Es gibt auch – sehr unvollständige – Erkenntnisse über die Wortgrenzen in Texten mit mehrfach vorkommenden Zeichenfolgen, grammatische Strukturen sowie Zahlen, Maße und Gewichte.

Selbst über die Gesamtanzahl der unterschiedlichen Zeichen gehen die Meinungen weit auseinander. Ist ein Zeichen eine Variante eines anderen, oder hat es eine eigenständige Bedeutung? Ist ein Zeichen als Zusammensetzung zweier einfacherer Zeichen zu verstehen oder nicht? Hier gibt es offensichtlich große Interpretationsfreiheiten. Der Archäologe Shikaripura Ranganatha Rao publizierte 1982 einen Entzifferungsversuch auf Basis der Sanskrit-Hypothese mit gerade einmal 62 Zeichen. Am anderen Ende der Skala liegt die unglaubwürdig hohe Anzahl von 676 Zeichen, die Bryan Wells 2015 in seiner Dissertation an der

KARTE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; NACH: ROBINSON, A.: CRACKING THE INDUS SCRIPT. IN: NATURE 526, S. 499–501, 2015; FOTO: AKG IMAGES / GERARD DEGEORGE

Das Land der kargen Schriftquellen

Zwischen zirka 2600 und 1900 v. Chr., während im Nahen Osten die Alten Reiche der Ägypter, Sumerer und Minoer ihre Blütezeit hatten, erstreckte sich die Indus-Kultur mit fünf Städten und mehr als 1000 Siedlungen über reichlich 800 000 Quadratkilometer. Die größten Städte waren Harappa und Mohenjo-Daro (oben). Von den zahlreichen Fundstätten ist bis heute nur ungefähr jede zehnte ausgegraben worden, auch weil viele im unruhigen indisch-pakistanischen Grenzgebiet liegen.

Harvard University genannt hat. Parpola setzte die Anzahl 1994 mit 425 an; dieser Schätzung stimmt auch Iravatham Mahadevan zu, der führende Indus-Schriftforscher Indiens.

Wie dem auch sei – in jedem Fall hat die Schrift zu viele Zeichen, um eine Buchstaben- oder Silbenschrift wie etwa Linear B zu sein. Eher ist es eine logo-syllabische Schrift wie die Keilschrift oder die Glyphen der Maya, das heißt eine Mischung aus einigen hundert »logografischen« Zeichen, die ganze Wörter oder Begriffe wiedergeben wie bei uns etwa %, § und €, und einer wesentlich kleineren Menge von Zeichen, die für einzelne Silben stehen.

Was die Sprache angeht, sprechen die Indizien eher für eine Frühform des Drawidischen als für Sanskrit. Viele Wissenschaftler haben plausible Vorschläge für drawidische Bedeutungen einiger Zeichengruppen auf der Basis von Alt-Tamilisch gemacht. Bisher hat jedoch keine dieser »Übersetzungen« allgemeine Anerkennung gefunden.

Eine Minderheit von Forschern bezweifelt, dass die Indus-Schrift überhaupt eine gesprochene Sprache abbildet, vor allem, weil die Texte so kurz sind. Die Inschriften bestehen aus durchschnittlich fünf Zeichen, die längste hat lediglich 26. Der Historiker Steve Farmer, der Computerlinguist Richard Sproat, der heute bei Google forscht, und der Sanskritexperte Michael Witzel von der Harvard University lösten 2004 eine lebhafte Debatte aus, indem sie in einer gemeinsamen Arbeit die Indus-Schrift als ein System von

FRAUKE FOKKÉ

Mehr Wissen auf Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/hochkulturen-der-menschheit**

nichtphonetischen Symbolen einstuften, ähnlich dem der mittelalterlichen Heraldik oder der neolithischen Vinča-Kultur aus Mittel- und Südosteuropa.

Diese These ist aus verschiedenen Gründen wenig plausibel. Insbesondere lassen die Zeichen der Indus-Schrift erkennen, dass sie in einer bestimmten Reihenfolge zu lesen sind. Bei einem Symbolsystem gäbe es keinen Grund, sich an solche Konventionen zu halten. Auch ist die Vorstellung abwegig, die Angehörigen der Indus-Kultur wären gar nicht auf die Idee gekommen, Zeichen wie in gewöhnlichen Schriften der Reihe nach anzuordnen: Durch ihre Handelskontakte müssen sie zwangsläufig zumindest die Keilschrift kennen gelernt haben. Gleichwohl liegt die Vermutung nahe, dass die gefundenen Texte, so kurz, wie sie sind, nur einen Teilaspekt der Sprache des Indus-Tals abbilden. Dies gilt schließlich auch für die frühesten mesopotamischen Keilschrifttafeln aus der Zeit um 3300 v. Chr., die nichts weiter enthalten als Mengenberechnungen für Produkte wie Gerste und die Namen von Beamten.

Wenn die Fundstätten in Indien und Pakistan erst zugänglich sind, schlägt die Stunde der Kodeknacker

Immerhin hat die Arbeit der drei »Dissidenten« frischen Wind in die wissenschaftliche Diskussion gebracht. Wells, ein leidenschaftlicher Vertreter der herkömmlichen Theorie, hat zusammen mit dem Geoinformatiker Andreas Fuls von der TU Berlin den ersten öffentlich zugänglichen elektronischen Textkorpus der Indus-Schrift erstellt (ICIT für Interactive Corpus of Indus Texts, www.archaeoastronomie.de). Er ist nicht vollständig, enthält aber alle Texte aus dem amerikanischen Ausgrabungsprojekt von Harappa.

Eine Forschergruppe um den Informatiker Rajesh Rao von der University of Washington in Seattle (nicht zu verwechseln mit dem oben erwähnten Archäologen Shikaripura Rao) hat dieses Datenmaterial für eine statistische Analyse genutzt. Dazu griff er auf ein Maß für den inneren Zusammenhang eines Textes zurück, die »bedingte Entropie«. Angenommen, ein Leser liest einen ihm unbekannten Text Zeichen für Zeichen und überlegt sich jedes Mal, welches Zeichen wohl als nächstes kommt, bevor er es zur Kenntnis nimmt. Die bedingte Entropie misst die Unsicherheit, die in seinem Kopf verbleibt, nachdem er den bisherigen Text – oder auch nur das unmittelbar vorhergehende Zeichen – kennt. Diese Unsicherheit ist null, wenn – in einem deutschen Text – das letzte Zeichen ein q war, weil mit Sicherheit ein u folgt; das andere Extrem maximaler Unsicherheit ist eine zufällig zusammengewürfelte Zeichenfolge, in der unabhängig vom Kontext jedes Zeichen mit gleicher Wahrscheinlichkeit als nächstes kommt. Jedenfalls lässt die Unsicherheit sich quantifizieren, indem man auszählt, wie häufig jedes Zeichen auf ein schon gelesenes folgt; und für diesen statistischen Mittelwert spielt die Bedeutung des Textes, die man vielleicht gar nicht kennt oder die es nicht gibt, überhaupt keine Rolle. Rao und seine Kollegen haben die durchschnittlichen bedingten Entropien für die verschiedensten Zeichenfolgen berechnet, darunter von Menschen geschriebene wie gewöhnlichen englischen Text und sumerische Keilschrift, aber auch nichtsprachliche wie ein Computerprogramm in der Programmiersprache Fortran oder die Basenfolge in menschlicher DNA. Die bedingten Entropien der Indus-Schrift ähneln am meisten jenen der sumerischen Keilschrift. »Unsere Ergebnisse machen es wahrscheinlicher, dass die Schrift eine Sprache darstellt«, schrieb Raos Forschergruppe 2009 – und erntete einige Jahre später heftigen Widerspruch von Richard Sproat.

Währenddessen entdecken die Feldarchäologen in Indien und Pakistan immer weitere Texte. Noch ist keiner dabei, der länger als die genannten 26 Zeichen wäre. Bislang ist nicht einmal jeder zehnte Fundort der Indus-Kultur systematisch ausgegraben worden – nicht nur, weil für die übrigen 90 Prozent das Geld fehlt, sondern auch, weil diese zurzeit ungünstig liegen. Einige der aussichtsreichsten Stätten finden sich in der pakistanischen Wüstenregion Cholistan im unruhigen Grenzgebiet zu Indien, darunter die Stadt Ganweriwala, die in den 1970er Jahren entdeckt wurde und offenbar ähnlich groß ist wie Mohenjo-Daro und Harappa.

Sollten diese und einige andere Fundstätten zwischen Indien und Pakistan eines Tages systematisch ausgegraben werden, wird dabei vermutlich so viel Material zu Tage treten, dass eine konsensfähige, wenn auch vielleicht unvollständige Entzifferung der Indus-Schrift zu Stande kommt. Zum Vergleich: Die weniger schwierige Maya-Schrift hat mehr als 100 Jahre erfordert – mit mehreren Fehlversuchen, Pausen und hartnäckiger archäologischer Forschung, die sich das ganze 20. Jahrhundert hinzog. Die Indus-Schrift ist 2000 Jahre älter, noch sind die Forscher keine 100 Jahre damit beschäftigt, und die Archäologen konnten in den letzten Jahrzehnten kaum etwas zur Klärung beitragen. Zum Aufgeben ist es also definitiv noch zu früh. ◂

QUELLEN

Farmer, R. et al.: The Collapse of the Indus-Script Thesis: The Myth of a Literate Harappan Civilization. In: Electronic Journal of Vedic Studies 11, S. 19–57, 2004. www.safarmer.com/fsw2.pdf

Parola, A.: Deciphering the Indus Script. Cambridge University Press, 1994

Robinson, A.: The Indus: Lost Civilizations. Reaktion Books, London 2015

Sproat, R.: A Statistical Comparison of Written Language and Non-linguistic Symbol Systems. In: Language 90, S. 457–481, 2014. www.linguisticsociety.org/sites/default/files/archived-documents/Sproat_Lg_90_2.pdf

Wells, B.: The Archaeology and Epigraphy of Indus Writing. Archaeopress, Oxford 2015

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 526, S. 499–501, 22.10.2015

PORTRÄT

DIE WEGBEREITERIN

Jahrelang zog Emmanuelle Charpentier von Ort zu Ort und forschte still vor sich hin. Dann veränderte die Entdeckung des CRIPSR/Cas9-Systems ihr Leben radikal.

spektrum.de/artikel/1417456

»Mit ihrem Erfindungsreichtum könnte sie auch auf einer einsamen Insel ein Labor aufbauen«

Patrice Courvalin, früherer Doktorvater am Institut Pasteur in Paris, über Emmanuelle Charpentier

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON THE HONG KONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Die Autorin **Alison Abbott** ist promovierte Pharmakologin. Seit 1992 berichtet sie von München aus als Chefkorrespondentin für »Nature« in Europa.

Bis auf ihren Computer ist Emmanuelle Charpentiers Büro völlig leer. Ihre immer noch verpackten Bilder sind in einer Ecke gestapelt, Umzugskisten mit Büchern und Ordnern stehen aufgereiht im Nachbarraum. Doch in ihrem Labor auf der anderen Seite des Flurs herrscht bereits Hochbetrieb. Als Charpentier im Herbst 2015 nach Berlin umzog, war ihre Forschungsarbeit binnen Wochen wieder voll im Gang – alles andere konnte warten.

Seit 20 Jahren zieht die heute 48-Jährige rastlos von einem Ort zum anderen, während ihre Forschung weiterläuft. Über neun verschiedene Stationen in fünf Ländern kletterte sie die akademische Leiter hinauf und musste ihre Labors immer wieder komplett neu aufbauen. Ihre wissenschaftlichen Durchbrüche gelangen Charpentier zwischen Umzugskartons, jahrelang hatte sie nur kurzfristige Forschungsverträge. Sie war 45, als sie die erste technische Assistentin anstellen konnte. »Mit ihrem Erfindungsreichtum könnte sie auch auf einer einsamen Insel ein Labor aufbauen«, sagt Patrice Courvalin, ihr früherer Doktorvater am Institut Pasteur in Paris.

Ihr unstetes Leben hat die Mikrobiologin jedoch nicht daran gehindert, jene Maschinerien genau unter die Lupe zu nehmen, mit denen Bakterien ihr Erbgut managen. Charpentier gilt als eine der maßgeblichen Erfinderinnen der CRISPR/Cas9-Technologie. Dieses System zur gezielten Veränderung von Gensequenzen revolutioniert derzeit die Möglichkeiten biomedizinischer Forscher, Gene zu modifizieren und zu analysieren. Entsprechend hoch ist auch die öffentliche Anerkennung: Seit 2014 wird Charpentier mit Wissenschaftspreisen geradezu bombardiert; 2015 erhielt sie die begehrte Position einer Direktorin am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin. Gemeinsam mit anderen Forschern gründete sie das Gentherapieunternehmen CRISPR Therapeutics, inzwischen eine der finanziell am besten ausgestatteten vorklinisch tätigen Biotechnologiefirmen, und befindet sich mitten in einem schlagzeilenträchtigen Patentstreit über die Rechte an dieser Technologie. Zudem gilt sie als heiße Kandidatin für einen der nächsten Nobelpreise.

Doch Charpentier scheut eher das akademische Rampenlicht. »Schon der französische Philosoph Jean-Paul Sartre warnte davor, dass man zur Institution wird, wenn man Preise gewinnt«, bemerkt sie. »Daher versuche ich auf dem Boden zu bleiben und weiter meine Arbeit zu machen.« Was ihr offenbar gelingt: In ihrer aktuellsten Publikation in »Nature« vom April diesen Jahres berichtet sie über den Mechanismus eines weiteren CRISPR-Systems, das womöglich noch effektiver arbeitet als CRISPR/Cas9. Kollegen, die Charpentier kennen, beschreiben sie als konzentriert, bescheiden – und energisch. »Sie ist ein kleines Persönchen mit sehr starkem Willen und enormem Durchhaltevermögen«, sagt Rodger Novak, der als Postdoc in den 1990er Jahren mit ihr zusammenarbeitete und heute als Geschäftsführer CRISPR Therapeutics leitet.

Seit ihrer Jugend, die sie in einer Kleinstadt in der Nähe von Paris verbrachte, wusste Charpentier genau, was sie im Leben tun wollte: nämlich etwas Nennenswertes zum Fortschritt der Medizin beitragen. Ihre Eltern unterstützten ihre Ideen, erzählt sie, ohne sie in eine bestimmte Richtung zu drängen. Sie versuchte sich auch am Klavier und beim Ballett, aber die Faszination für medizinische Themen ließ sie nicht los und mündete in eine naturwissenschaftliche Ausbildung.

Nach ihrem Studium an der Université Pierre et Marie Curie in Paris beschloss sie, für ihre Doktorarbeit an das nahe gelegene Institut Pasteur zu gehen, das hohes Ansehen in der Grundlagenforschung genoss. Für ihre dortigen Studien zu Antibiotikaresistenzen analysierte sie mobile DNA-Elemente, die sich im Genom von Bakterien umherbewegen und auch von einer Zelle zur anderen übertragen werden können.

Sie liebte es, in der alten Bibliothek St. Geniviève, nahe der Kathedrale Notre-Dame, für sich allein zu lernen

Diese Jahre prägten sie nachhaltig. Ihre Arbeitsgruppe an dem altehrwürdigen Institut Pasteur war jung und dynamisch, erzählt sie. Sie liebte es, in der alten Bibliothek St. Geneviève nahe der Kathedrale Notre-Dame zu lernen, für sich allein im Lichtkegel der Leselampen mit grünem Schirm. »Ich hatte das für mich passende Umfeld gefunden«, erinnert sie sich. Ihr Ziel war, eine Arbeitsgruppe am Institut Pasteur zu leiten, doch sie wusste, dass sie zuvor als Postdoc ins Ausland gehen musste, um Erfahrungen zu sammeln. »Ich war eine typische Studentin der 1990er Jahre und glaubte, ich würde nach einem Ausflug hinaus in die Welt bald zurückkehren und mein Leben lang in Frankreich arbeiten.«

Charpentier sandte rund 50 Anfragen an Arbeitsgruppen in den USA und erhielt einen ganzen Stapel Angebote. Aus diesen wählte sie schließlich eine Stelle im Labor der Mikrobiologin Elaine Tuomanen an der Rockefeller University in New York City. Dort arbeitete sie an dem Bakterium *Streptococcus pneumoniae*, einem wichtigen Verursacher von Lungen- und Hirnhautentzündungen sowie Septikämie (Blutvergiftung). Es schiebt mobile genetische Elemente besonders freizügig in seinem Genom umher und bleibt dabei stets sehr aggressiv. Tuomanens Arbeitsgruppe hatte einen bevorzugten Zugang zu den Daten des kurz zuvor erstmals sequenzierten Genoms. Damit eröffnete sich die faszinierende Möglichkeit herauszufinden, an welchen Stellen sich diese Elemente in das Genom integrieren und was genau dabei geschieht.

Charpentier führte eine Reihe akribisch geplanter Experimente durch, um herauszufinden, wie das Bakterium solche genetischen Elemente kontrolliert und steuert. Zudem trug sie dazu bei aufzuklären, wie der Erreger eine Toleranz gegen das Antibiotikum Vancomycin entwickelt. Sie war zwar etwas beklommen nach New York aufgebrochen, hatte sich dort aber voll in die Arbeit gestürzt und dann überrascht festgestellt, dass sie kein Heimweh entwickelte. Als Tuomanen mit ihrer Arbeitsgruppe nach Memphis, Tennessee, umzog, blieb Charpentier in New York und wechselte in das Team der Biologin Pamela Cowin, die an der New York University School of Medicine an Hautzellen forschte. Da sie dort mit Mäusen arbeitete, konnte sie viel über die Gene von Säugerzellen lernen.

Charpentier wurde klar: Im Grunde war sie Europäerin und nicht einfach nur Französin

Cowin erinnert sich an Charpentier als ihre erste Postdoc, die keine Betreuung brauchte. »Emmanuelle fügte sich perfekt ein«, sagt sie. »Sie arbeitete unermüdlich, sorgfältig, präzise und mit einem Blick für Details.« Dabei war Charpentier eine ruhige und recht zurückgezogene Persönlichkeit. Wie sie bald herausfand, ist es weitaus schwieriger, das Erbgut von Mäusen zu manipulieren als das von Bakterien. Sie arbeitete zwei Jahre lang an dem Projekt und gewann daraus eine Publikation zur Regulation des Haarwachstums, solide Grundlagenkenntnisse in Säugetiergenetik und den festen Vorsatz, effektivere Methoden zur Genmanipulation zu entwickeln.

Nach einem weiteren Engagement als Postdoc in New York wusste Charpentier, dass sie ab jetzt völlig unabhängig arbeiten wollte – und nach Europa zurück. Ihre Zeit in den USA hatte ihr gezeigt: Im Grunde war sie Europäerin und nicht einfach nur Französin. Als nächste Station wählte sie Wien, wo sie ab 2002 für sieben Jahre ein eigenes kleines Labor an der Universität leitete und die gesamte Zeit von nur kurzfristig gewährten Fördermitteln abhing. »Ich war ganz auf mich gestellt«, erklärt sie. »Dennoch hatte ich fest vor herauszufinden, wie die Vielfalt der biochemischen Reaktionswege in Bakterien reguliert wird.« Wissenschaftlich war es eine aufregende Zeit. Die Bedeutung kleiner RNA-Moleküle für die Genregulation wurde entdeckt, und Charpentier arbeitete an zahlreichen Projekten mit verschiedensten Bakterien. Vielleicht waren es zu viele, wie sie heute zugibt, doch ihre Anträge auf Fördermittel wurden stets genehmigt. So entdeckte sie eine RNA, die bei dem Bakterium *Streptococcus pyogenes* die Synthese einer Klasse von Molekülen kontrolliert, die entscheidend für seine Virulenz sind.

ISTOCK / DRA_SCHWARTZ

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema CRISPR/Cas finden Sie unter **spektrum.de/t/crispr**

In Wien dachte Charpentier auch erstmals über CRISPR nach. Zu Beginn des Jahrtausends stellte dieses Forschungsgebiet noch eine kleine Nische dar: Nur eine Hand voll Mikrobiologen interessierte sich für den neu entdeckten DNA-Abschnitt mit den seltsamen Sequenzmustern, der einigen Bakterien zur Abwehr gegen Viren dient. Hierfür kopieren die Mikroben ein Stück DNA eines eindringenden Virus in die CRISPR-Sequenz ein. Beim nächsten Angriff können sie damit das Virus wiedererkennen und ihn attackieren, indem sie seine DNA in Stücke schneiden. Die verschiedenen CRISPR-Systeme nutzen unterschiedliche Strategien, um diese Abwehrreaktionen zu bewerkstelligen. Doch an allen damals bekannten Systemen war eine so genannte CRISPR-RNA beteiligt.

Charpentier wollte solche Genomregionen von *S. pyogenes* identifizieren, die regulatorische RNAs kodieren, und stellte fest, dass bioinformatische Methoden hier nur begrenzt nützen. So ging sie eine Kooperation mit dem Molekularbiologen Jörg Vogel ein, damals Juniorgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie. Er entwickelte gerade Methoden zur umfassenden Kartierung von RNA-kodierenden Sequenzen in Genomen und erklärte sich bereit, eine solche Karte für *S. pyogenes* zu erstellen. Bis 2008 hatte er einen Katalog sämtlicher Sequenzen von kleinen RNAs des Bakteriums zusammengestellt.

Den Forschern fiel sofort auf, dass die Mikrobe enorme Mengen einer bislang unbekannten kleinen RNA produzierte. Diese »trans-aktivierende CRISPR-RNA« (tracrRNA) musste an einem zuvor nicht beschriebenen CRISPR-System beteiligt sein. Dies ergab sich aus ihrer Sequenz und der Position im Genom, die Charpentiers bioinformatischen Analysen zufolge wohl nahe der CRISPR-Sequenz lag. Charpentier und ihre Kollegen begannen eine Reihe von Experimenten, in denen sie herausfanden, dass das System aus genau drei Komponenten besteht: der tracrRNA, der CRISPR-RNA und dem Protein Cas9. Das war eine Überraschung: »Andere CRISPR-Systeme setzen sich aus nur einer einzigen RNA und zahlreichen Proteinen zusammen. Niemand hatte bisher die Möglichkeit in Erwägung gezogen, dass zwei RNAs an einem CRISPR-System beteiligt sein könnten«, erläutert Charpentier. Ihr wurde klar, dass das System wegen seiner ungewöhnlichen Einfachheit als mächtiges Werkzeug zum Manipulieren von Gensequenzen dienen könnte. Falls sich die Komponenten kontrolliert einsetzen ließen, würde es erstmals eine gezielte Veränderung der DNA-Sequenz an einem exakt definierten Ort des Erbguts ermöglichen.

Doch wie funktioniert das CRISPR-System eigentlich? Charpentier vermutete, dass die beiden RNAs miteinander interagieren, um Cas9 zu einer bestimmten Stelle in der Virus-DNA zu steuern. Dieses Konzept war radikal neu: Zwar ist von vielen Fällen bekannt, dass Proteine auf solche Weise zusammenarbeiten, nicht jedoch RNAs. Charpentier allerdings »suchte stets nach den unerwarteten Phänomenen und nicht nach den erwarteten«, sagt Tuomanen. »Sie schwimmt gern gegen den Strom.« Charpentier erinnert sich, wie schwer es war, einen ihrer jungen Studenten dazu zu überreden, ihrer Intuition zu folgen und ein Schlüsselexperiment durchzuführen, das zeigen sollte, ob die beiden RNAs tatsächlich kooperieren.

GETTY IMAGES FOR BREAKTHROUGH PRIZE / STEVE JENNINGS

»Schon Jean-Paul Sartre warnte davor, dass man zur Institution wird, wenn man Preise gewinnt«

Aber dann meldete sich Elitza Deltcheva freiwillig, die damals an der Universität Wien studierte. Inzwischen war es Juni 2009, und Charpentier zog schon wieder um. In Wien hatte sie sich nie ganz zu Hause gefühlt – die grandiosen Bauwerke fand sie immer erdrückend. Zudem benötigte sie mehr Sicherheit und Unterstützung. »Zu diesem Zeitpunkt meiner Laufbahn brauchte ich den Luxus, mich darauf zu konzentrieren, eine einzige große Sache wirklich Ende zu bringen«, erklärt sie. Sie nahm eine Position in dem neu gegründeten und gut ausgestatteten Umeå Centre for Microbial Research in Nordschweden an. Noch während sie im Sommer 2009 zwischen Österreich und Schweden pendelte, rief Deltcheva sie um acht Uhr abends in Umeå an und berichtete, dass die Experimente das erhoffte Resultat ergeben hatten. »Ich war ungemein glücklich«, erzählt Charpentier. Dennoch behielt sie die Information zunächst für sich. Vogel sagt, dies sei eine »sehr intensive Zeit« gewesen. Er erinnert sich, dass Charpentier ihn eines Abends anrief, als er auf einer Landstraße außerhalb von Berlin unterwegs war. »Ich hielt am Straßenrand, und wir diskutierten stundenlang, wann wohl der richtige Zeitpunkt für eine Publikation sei – nun, da wir die Geschichte tatsächlich komplett hatten.«

Sie wussten um die fundamentale Bedeutung ihrer Entdeckung. Beide fürchteten, dass ihnen andere den Ruhm streitig machen würden, wenn sich herumsprach, über welch revolutionär neues System sie gestolpert waren. Um zu verhindern, dass sich die Publikation durch Nachfragen der Gutachter verzögern würde, arbeiteten sie ein Jahr lang stoisch und in aller Stille weiter. Sie wollten möglichst alle Unklarheiten, die ihnen einfielen, ausräumen, bevor sie ihr Manuskript bei »Nature« einreichten.

Charpentier war damals völlig unbekannt in der noch kleinen Welt der CRISPR-Forschung. Im Oktober 2010, ein paar Wochen nach der Einreichung des Manuskripts, präsentierte sie ihre Arbeiten erstmals auf einer CRISPR-Konferenz im niederländischen Wageningen. »Ihr Vortrag war einer der Höhepunkte des Meetings – eine fantastische Geschichte, völlig unerwartet, wie vom Himmel gefallen«, berichtet der Mikrobiologe John van der Oost von der Universität Wageningen, der die Konferenz organisiert hatte. Charpentier störte es überhaupt nicht, dass sie eine Außenseiterin war. »Ich wollte nie einer gemütlichen Forschergemeinde angehören«, sagt sie. Zudem dachte sie schon an den nächsten Schritt: Wie zerschnitt dieses elegante, über zwei RNAs gesteuerte System denn nun die DNA?

Bei einer Tagung der American Society for Microbiology 2011 in San Juan, Puerto Rico, lernte sie die Strukturbiologin Jennifer Doudna von der University of California in Berkeley kennen. Ihre Zusammenarbeit führte rasch zur zweiten wichtigen Entdeckung: wie Cas9 DNA schneidet. In der Folge zeigten andere Wissenschaftler, dass sich das System nutzen lässt, um gezielt die DNA-Sequenz an einer bestimmten Stelle eines Genoms nach Wunsch zu verändern. Heute nutzen zahlreiche Labors weltweit die Methode.

Charpentier traf derweil zwei wichtige Entscheidungen. Mit der ersten folgte sie ihrer ursprünglichen Ambition, einen konkreten Beitrag zum Fortschritt der Medizin zu leisten. Dazu kontaktierte sie Novak, der damals bei dem Pharmaunternehmen Sanofi in Paris arbeitete. Sie gewann ihn dafür, gemeinsam eine Firma zu gründen, welche die CRISPR-Technologie für die Gentherapie beim Menschen nutzbar machen soll. Zusammen mit dem dritten Gründer, Shaun Foy, riefen sie im November 2013 CRISPR Therapeutics ins Leben. Charpentier ist nach wie vor Mitglied des wissenschaftlichen Beratergremiums der Firma.

Endlich hatte sie ein Labor mit technischen Assistenten

Mit der zweiten Entscheidung entsprach sie ihrem Wunsch, sich ganz der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Genregulation zu widmen. Dafür brauchte sie eine unbefristete Stelle mit umfangreicherer Infrastruktur. So zog sie 2013 nach Deutschland und nahm eine Professur an der Medizinischen Hochschule Hannover an. Zudem wurde sie Abteilungsleiterin des Helmholtz-Zentrums für Infektionsforschung im benachbarten Braunschweig. Endlich hatte sie ein Labor mit eigenen technischen Assistenten und baute ein Team mit insgesamt 16 Doktoranden und Postdocs auf. Zwei Jahre später erhielt sie einen Ruf an das Max-Planck-Institut in Berlin. Dort genießt sie großzügige technische und institutionelle Unterstützung. Ihre Labors liegen auf dem Campus der Universitätsklinik Charité mit seinen eleganten Gebäuden aus dem 19. Jahrhundert. Vielleicht, so sagt sie, findet sie in einigen Jahren sogar ein wenig Muße, um sich mit Philosophie zu beschäftigen. Doch im Moment lassen Preisverleihungen und wissenschaftlicher Ruhm dafür kaum Zeit. Charpentier schätzt die Anerkennung und engagiert sich bei den Publicity-Aktivitäten, die jeder Preis erfordert. Dennoch missfällt ihr, dass solche Termine wert-

volle Arbeitstage kosten. Den viel beachteten und komplizierten Patentstreit zwischen ihr selbst, Doudna und Berkeley auf der einen Seite und dem Broad Institute des MIT und der Harvard University in Cambridge, Massachusetts, auf der anderen Seite kommentiert sie nicht. Das überlässt sie den Patentanwälten, welche die Angelegenheit zurzeit ausfechten.

Nach wie vor konzentriert sich Charpentier lieber auf die Forschung. Ihre jüngste Publikation hat sie wieder einmal mitten in einem Laborumzug fertig gestellt. Darin beschreibt sie ein CRISPR-System, das noch einfacher ist als CRISPR/Cas9: Das Protein Cpf1 ist in der Lage, die Funktionen sowohl der tracrRNA als auch des Cas9-Proteins zu erfüllen. »Ein höchst wichtiger Beitrag«, so van der Oost. Doch Charpentier möchte nicht auf CRISPR reduziert werden – schließlich ist das nur eines von fünf Arbeitsgebieten in ihrem Labor. Sie beschäftigt sich unter anderem mit Mechanismen der Wechselwirkung von Krankheitserregern mit Immunzellen und den Molekülkomplexen, welche das Verhalten bakterieller Chromosomen regulieren.

Rückblickend findet sie, dass ihr Weg steiniger war, als es hätte sein müssen. Heute gibt es mehr Forschungsmittel, mit denen junge Wissenschaftler eigene, unabhängige Labors aufbauen können. Ihre Ziele, einen Beitrag zum Fortschritt der Medizin zu leisten und bessere Werkzeuge für gezielte genetische Manipulationen zu entwickeln, hat sie erreicht. Dennoch ist ihre Begeisterung für die Forschung ungebrochen. »In dieser Hinsicht habe ich mich nicht verändert und werde es auch nicht tun«, erklärt sie. »Ich bin durch und durch Wissenschaftlerin. Das ist es, was mich hierhergebracht hat und was ich auch in Zukunft bleiben möchte.«

Dennoch hat sich einiges geändert. Charpentier ist keine Außenseiterin mehr, sondern ein wichtiges Mitglied der rasch wachsenden Forscherschaft, die an CRISPR-Systemen arbeitet, und wird mit Einladungen für Vorträge geradezu überschwemmt. Insgeheim träumt sie jedoch davon, auf einer CRISPR-Konferenz aufzutreten und dann über die Entdeckung von etwas ganz anderem, aber ebenso Wichtigem zu berichten. Vielleicht hat sie ja schon ein paar Überraschungen in der Hinterhand. ◂

QUELLEN

Deltcheva, E. et al.: CRISPR RNA Maturation by Trans-Encoded Small RNA and Host Factor RNase III. In: Nature 471, S. 602–607, 2011

Fonfara, I. et al.: The CRISPR-Associated DNA-Cleaving Enzyme Cpf1 also Processes Precursor CRISPR RNA. In: Nature 532, S. 517–521, 2016

Jinek, M. et al.: A Programmable Dual-RNA-Guided DNA Endonuclease in Adaptive Bacterial Immunity. In: Science 337, S. 816–821, 2012

Novak, R. et al.: Emergence of Vancomycin Tolerance in Streptococcus pneumoniae. In: Nature 399, S. 590–593, 1999

© Nature Publishing Group

www.nature.com
Nature 532, S. 432–434, 28.4.2016

ISTOCK_54081980_LONELY_

SIMON KIMM & SUSANNE SCHULZ (WWW.FLORIAN-FREISTETTER.DE/BILDER.HTML) / CC BY-SA 3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/DE/LEGALCODE)

FREISTETTERS FORMELWELT
KEINE ANGST VOR DEM LOGARITHMUS!

Wenn es keine Taschen- und Großrechner gäbe, würden Sie auf ihn nicht verzichten wollen: Der Logarithmus erleichtert Leuten, die viel rechnen müssen, das Leben.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist

Mathematik hat viel mit Zahlen zu tun. Oder auch nicht – je nachdem, wen man fragt. Den Mathematikerinnen und Mathematikern geht es in den allermeisten Fällen nicht darum, irgendetwas auszurechnen. Sondern eher darum, neue Zusammenhänge aus den logischen Grundlagen der Mathematik abzuleiten. Gerechnet wird dann hauptsächlich von Physikern, Astronomen und anderen, die die Resultate der Mathematik als Werkzeug benutzen. Und selbst das erledigen heute im Allgemeinen Maschinen für uns.

In der Schule lernen Kinder zwar noch das Rechnen mit Stift und Papier (oder gar im Kopf) – im Alltag kommen dann aber Taschenrechner und Computer zum Einsatz. Daher ist es auch kein Problem, mit großen Zahlen zu arbeiten oder umfangreiche Berechnungen durchzuführen: Wir müssen es ja nicht mehr selbst machen. Aber es ist noch gar nicht so lange her, dass man viel mehr Aufwand treiben musste.

Während meiner Schul- und Studienzeit waren Taschenrechner schon völlig normal (und ich vermisse meinen TI-68 immer noch sehr schmerzlich, seit er vor einigen Jahren den Geist aufgegeben hat). Aber in der Bibliothek der Universitätssternwarte Wien sah ich damals trotzdem noch die vielen Bücher mit den Logarithmentafeln überall herumliegen. Diese langen Zahlenkolonnen demonstrieren die historische Bedeutung einer ganz besonderen Formel:

$$\log (xy) = \log x + \log y$$

Der Logarithmus (log) einer Zahl x ist der Exponent, mit dem man eine bestimmte andere Zahl (die Basis) potenzieren muss, um die Zahl x zu erhalten. Zum Beispiel ist der Logarithmus zur Basis 10 der Zahl 100 gleich 2, da 10 potenziert mit 2 (»hoch 2«) wieder 100 ergibt. Dieses mathematische Konzept war schon im antiken Indien bekannt; richtig populär wurde es aber vor allem durch die Arbeit des schottischen Mathematikers John Napier (1550–1617), der 1614 ein entsprechendes Buch veröffentlichte.

Der Einsatz von Logarithmen vereinfacht viele Rechenoperationen. Wie die Formel zeigt, lässt sich die Multiplikation durch eine viel simplere Addition ersetzen. Gleiches gilt für die Division, die sich mit Logarithmen durch eine Subtraktion ersetzen lässt. Anstatt zu potenzieren, kann man multiplizieren, und das Ziehen einer Wurzel wird bei Verwendung von Logarithmen zur einfacheren Division. Natürlich muss man zuvor von den beteiligten Zahlen die Logarithmen bilden und das Ergebnis dann wieder umrechnen. Aber genau dafür gab es ja die Tafeln, in denen man die entsprechenden Werte nachschlagen konnte.

Wer jetzt denkt, es wäre seltsam, so große Umwege zu gehen, nur um eine Multiplikation oder Division zu vermeiden, der soll einfach mal eine Zeit lang komplett auf Taschenrechner und Computer verzichten. Bei Alltagsproblemen und entsprechend kleinen Zahlen ist das noch kein Problem. Aber bei allem, was darüber hinaus geht, wird man schnell die Logarithmentafeln schätzen lernen.

»Durch die Arbeitserleichterung infolge der Verwendung von Logarithmen wird das Leben der Astronomen verdoppelt«, hat der Physiker und Astronom Pierre-Simon Laplace (1749–1827) vor knapp 200 Jahren gesagt und damit völlig recht – zumindest was die Arbeitserleichterung angeht. Ohne Logarithmen sähe die Welt heute ganz anders aus. All die Wissenschaftler, Ingenieure, Erfinder und Techniker, die in den letzten Jahrhunderten unsere moderne Zivilisation aufgebaut haben, hielten dabei eine Logarithmentafel in der Hand. Und die zugehörige Formel (siehe links), die das Rechnen leichter macht. Denn auch wenn die Mathematik von außen betrachtet oft ziemlich kompliziert erscheint: Ihr eigentlicher Zweck ist es, die Dinge so einfach wie möglich zu machen!

TEILCHENPHYSIK

DEN MULTIQUARKS AUF DER SPUR

Die Protonen und Neutronen der Atomkerne bestehen aus jeweils drei elementaren Quarks. Theoretisch kann es jedoch auch Quark-Systeme aus vier, fünf und mehr Bausteinen geben. Neue Ergebnisse vom Large Hadron Collider am CERN befeuern diese Idee jetzt.

spektrum.de/artikel/1417457

MAXIMILIEN BRICE, CERN

MAXIMILIEN BRICE, CERN

Mit dem LHCb-Detektor am CERN suchen Physiker unter anderem nach Multiquark-Systemen. Dieses Foto wurde noch während der Bauphase gemacht. Gut erkennbar: die riesigen Magnete. Sie zwingen die beim Zerfall der Multiquarks entstehenden Teilchen auf charakteristische Spuren.

Georg Wolschin ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.

Anfang der 1960er Jahre standen Physiker vor einem Problem: Seit den 1950er Jahren hatten sie in Kollisionsexperimenten zahlreiche neue Teilchen entdeckt, für die eine systematische Einordnung fehlte. Der zunächst sehr unübersichtliche »Teilchenzoo« ließ sich allerdings mit Hilfe mathematischer Methoden aus der Gruppentheorie ordnen. Dies legte die Vermutung nahe, dass die bis dahin bekannten Partikel meist nicht wie bisher geglaubt elementar waren, sondern sich aus einer kleinen Anzahl von Grundbausteinen zusammensetzten.

Im Jahr 1964 entwickelten dann zwei US-amerikanische Theoretiker unabhängig voneinander das Quark-Modell, wonach etwa **Proton** und **Neutron** (siehe »Multiquarks im Experiment«, S. 70/71) aus drei – zunächst hypothetischen – punktförmigen Teilchen aufgebaut wären. Der eine der beiden Forscher war Murray Gell-Mann vom California Institute of Technology; er erhielt 1969 den Physiknobelpreis für seine »Beiträge und Entdeckungen betreffend der Klassifizierung der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen«. Die deutlich ausführlicheren Arbeiten seines Kollegen George Zweig kursierten zwar als »CERN Reports«, waren aber nach Intervention des damaligen Theoriedirektors am CERN nicht regulär in einer wissenschaftlichen Zeitschrift erschienen.

Gell-Mann bezeichnete die neuen Elementarpartikel als **Quarks**, Zweig als Aces. Von ihnen gibt es verschiedene Sorten (Flavours): Zunächst ging man von einem up-, einem down- und einem strange-Quark (u, d, s) aus. Später kamen – vor allem zur Erklärung des Aufbaus anderer Teilchen – drei schwerere Varianten hinzu: charm (c), bottom (b) und top (t). Außer diesen »Valenzquarks«, aus denen sich die so genannten **Hadronen** genannten Teilchen zusammensetzen, existieren auch virtuelle Quark-Antiquark-Paare (Seequarks), die kurzzeitig aus dem Vakuum entstehen und gleich wieder vernichtet werden. Sie bestimmen zwar nicht die Struktur und die Quantenzahlen des Protons oder Neutrons, beeinflussen aber über die starke Wechselwirkung deren Masse.

Alle Quarks besitzen als so genannte Quantenzahlen einen halbzahligen **Spin** (Quanteneigendrehimpuls), drittelzahlige elektrische Ladungen sowie eine **»Farbe«**, die drei mögliche Werte annehmen kann. Die zugehörigen **Antiquarks** haben jeweils entgegengesetzte Vorzeichen der Ladungen. Warum die Massen aber innerhalb der sechs Quark-Sorten über rund fünf Größenordnungen variieren, ist bis heute nicht verstanden. So sind charm-Quarks mit 1,4 Protonenmassen vergleichsweise schwer. Sie spielen eine besondere Rolle bei den später im Artikel vorgestellten exotischen Gebilden aus mehr als drei Quarks, da sie offenbar für deren kurzzeitige Stabilisierung wichtig sind.

Heute ist folgende Modellvorstellung zum Allgemeingut jeder Physikausbildung geworden: **Baryonen**, die beispielsweise als Neutronen (ddu) und Protonen (uud) die Kerne aller Atome bilden, bestehen aus jeweils drei Quarks, die kurzlebigen **Mesonen** (etwa Pionen, Kaonen, J/ψ-Mesonen und viele andere) hingegen aus Paaren eines Quarks und eines Antiquarks. Zusammengehalten werden sie alle durch »Klebeteilchen« namens **Gluonen**.

Letztere übermitteln die starke Wechselwirkung und sind wie die Photonen, welche die elektromagnetische Kraft übertragen, elektrisch neutral und masselos. Zusätzlich lassen sie sich aber durch die im Rahmen einer Quantentheorie möglichen Kombinationen der drei Farben und ihrer Antifarben charakterisieren. Die mittels dieser Gluonen aus zwei oder drei Valenzquarks aufgebauten stark wechselwirkenden Teilchen (Hadronen) sind stets farblos, sie bilden so genannte Farbsinguletts.

Realität oder doch nur Gedankengebäude? Experimente liefern den Nachweis

Noch in den 1960er Jahren galt dieses Konzept keineswegs als selbstverständlich. Der einflussreiche Gell-Mann hatte zwar selbst dem Modell zum Durchbruch verholfen, glaubte anfangs aber nicht wirklich an die physikalische Existenz der Quarks. Vielmehr hielt er sie für ein Hilfskonstrukt zur Berechnung bestimmter Sachverhalte.

Dagegen war Zweig von Anfang an überzeugt davon, dass Quarks physikalisch real seien, und schlug vor, experimentell nach ihnen zu suchen. Jedoch ließen sie sich nicht als freie Teilchen mit gebrochenzahligen Ladungen nachweisen. Denn normalerweise sind sie durch die Gluonen stark aneinander gebunden und in den Hadronen eingeschlossen (Confinement). Nur bei extremen Verhältnissen von Temperatur oder Druck, wie sie bei relativistischen Schwerionenkollisionen entstehen oder im frühesten Universum bis etwa zehn Mikrosekunden nach dem Urknall herrschten, sollte sich für kurze Zeit ein See aus freien Quarks und Gluonen bilden – ein Quark-Gluon-Plasma.

Verschiedene Ideen aus der zweiten Hälfte der 1960er Jahre, die wesentlich auf den Theoretiker James D. Bjorken zurückgehen, ermöglichten schließlich die Entdeckung der Quarks: Physiker schossen hochenergetische Elektronen – die als punktförmige Teilchen keine Unterstruktur besitzen – auf Protonen, um deren innere Struktur zu untersuchen. Insbesondere erforschten sie in den 1970er Jahren am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) die Streuung von Elektronen mit mehr als sieben Gigaelektronvolt (Milliarden Elektronvolt) Energie an flüssigem Wasserstoff. Ähnlich wie die berühmten Streuexperimente von Ernest Rutherford mit Alphastrahlen Anfang des 20. Jahrhunderts den Aufbau eines Atoms aus Kern und Hülle erkennen ließen, fand man so 1969 in 100 000-fach kleineren Dimensionen die »Partonen« als punktförmige, geladene Bausteine des Protons.

Sie stimmten in entscheidenden Eigenschaften mit den Quarks überein. Auch zeigte sich, dass die starke Wechselwirkung – im Gegensatz zur Quantenelektrodynamik, die die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt – umso schwächer wird, je tiefer man ins Proton eindringt. Heute versteht man dies als fundamentale Eigenschaft einer Feldtheorie für die starke Wechselwirkung, der **Quantenchromodynamik**.

Experimentelle Hinweise auf die Existenz der Gluonen tauchten erstmals 1979 am Positron-Elektron-Kollider PETRA (Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage) des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY auf. Dort produzierten Forscher in hochenergetischen Elektron-Positron-Kollisionen Quark-Antiquark-Paare, die jeweils in entgegengesetzte Richtungen auseinanderflogen und auf Grund der starken Wechselwirkung zwei Jets weiterer Teilchen erzeugten. Sie fanden jedoch auch Ereignisse mit je drei solchen Jets – offenbar musste also ein weiteres Teilchen an der Reaktion beteiligt gewesen sein. Genauere Analysen zeigten, dass es sich hierbei um die gesuchten Gluonen handelte.

Auf diese Weise hatten die Quarks unerwartet physikalisch reale Gestalt angenommen. Sowohl Zweig als auch Gell-Mann hatten allerdings bereits 1964 vorausgesagt, dass Baryonen auch aus fünf Quarks beziehungsweise Aces bestehen könnten – neben den drei üblichen Valenzquarks sollten sie noch ein zusätzliches Quark-Antiquark-Paar enthalten – und Mesonen aus zwei Quark-Antiquark-Paaren, also aus vier Quarks. Man nennt derartige Strukturen Pentaquarks und Tetraquarks. Auch aus heutiger Sicht sind solche Multiquark-Systeme völlig kompatibel mit dem Standardmodell der Teilchenphysik. Anders als die virtuellen Seequarks bestimmen die zusätzlichen Quarks aber hierbei die Struktur und Quantenzahlen.

Basierend auf spezifischen quantenchromodynamischen Modellen gibt es inzwischen zahlreiche neuere theoretische Arbeiten dazu, insbesondere zur Berechnung der mittleren Lebensdauern der Multiquark-Zustände. Diese sind sehr kurz, kleiner als 10^{-21} Sekunden, und damit sind die Zustände im Experiment nicht direkt nachweisbar. Für Messungen stehen nur die langlebigeren Zerfallsprodukte zur Verfügung. Aus den Maxima in den resultierenden Massenspektren und den charakteristischen Verteilungen der Zerfallsprodukte je nach Streuwinkel lassen sich jedoch die relevanten Quantenzahlen wie Spin und **Parität** (das Verhalten bei Raumspiegelungen) der Multiquarks ableiten.

So hat sich die Suche nach Multiquark-Systemen im Lauf vieler Jahre zu einem Gebiet der experimentellen Teilchenphysik entwickelt, das zahlreiche Irrwege, mittlerweile aber auch Erfolge vorzuweisen hat. Den jüngsten erzielte die LHCb-Kollaboration am Large Hadron Collider LHC des europäischen Teilchenphysik-Forschungszentrums CERN in Genf in Proton-Proton-Kollisionen, bei denen zahlreiche, in der Regel bereits bekannte, Teilchen entstanden. Bei Energien von sieben und acht Teraelektronvolt haben die Forscher dabei Anzeichen für Pentaquarks gefunden (siehe »Zerfall des Lambda-Baryons«, S. 72).

Das überraschte die Forscher, da sich in den etwa 50 Jahren seit der Vorhersage bisher nur wenige überzeugende Kandidaten herauskristallisiert hatten. So gab es ab 2002 Berichte über Messungen von Pentaquark-Zuständen, vor allem der so genannten U^+-Resonanz. Unter einer Resonanz versteht man in der Teilchenphysik ein instabiles System, das oft aus mehreren Bausteinen besteht und nach kurzer Zeit weiter zerfällt.

Sein oder nicht sein? Wenn Resonanzen verklingen

Die U^+-Resonanz sollte etwa die 1,6-fache Protonenmasse besitzen und eine sehr kurze mittlere Lebensdauer von etwa 10^{-23} Sekunden aufweisen. In ihr vermutete man jeweils zwei leichte up- und down-Quarks sowie ein Anti-strange-Quark. Zunächst berichteten japanische Wissenschaftler, später auch andere Forschergruppen weltweit über diese Pentaquarks. Allerdings ließen sie sich in Folgeexperimenten nicht reproduzieren, und die Publikationen mussten wieder zurückgezogen werden. Vermeintlichen Pentaquarks mit zwei strange-Quarks erging es ebenso.

Besser sieht es bei den Tetraquarks aus. Die Belle-Kollaboration im japanischen KEK-Forschungszentrum in Tsukuba fand 2003 in Elektron-Positron-Kollisionen eine scharfe Resonanz, die dem J/ψ-Meson (Charmonium) ähnelte. Letzteres aus charm- und Anti-charm-Quark zusammengesetzte Meson war 1974 entdeckt und danach mit hoher Präzision vermessen worden. Die Resonanz zerfällt in Charmonium und zwei Pionen, enthält also ebenfalls charm- und Anti-charm-Quarks. Mit ihrer überraschend langen Lebensdauer passte sie jedoch nicht in das Schema der vermeintlich gut verstandenen charm-/Anti-charm-Zustände.

Die Belle-Resonanz ließ sich auch in anderen Experimenten in Stanford, am Fermilab oder am LHCb genau untersuchen, so dass es keinen Zweifel an ihrer Existenz gibt. Eine präzise Analyse durch die LHCb-Kollaboration am Genfer

AUF EINEN BLICK
DIE GESCHICHTE DER QUARKS

1 In den 1960er Jahren entdeckten Forscher, dass Proton und Neutron aus noch elementareren Bausteinen zusammengesetzt sind. Theoretiker begannen, ein Modell für diese Konstituenten – die Quarks – auszuarbeiten.

2 Nach und nach wurden immer mehr dieser Bausteine entdeckt: Das Standardmodell der Teilchenphysik zählt ihrer sechs. Zwischen ihnen wirkt die starke Wechselwirkung über die Gluonen.

3 Physiker haben bereits Gebilde aus vier und fünf Quarks nachgewiesen. Nach welchen Gesetzen diese sich bilden, wollen sie in künftigen Experimenten herausfinden.

MICHAEL HOCH UND MAXIMILIEN BRICE, CERN

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema Teilchenphysik finden Sie unter **spektrum.de/t/teilchenphysik**

Multiquarks im Experiment

1. Kollision

In Experimenten wie etwa dem **LHCb** am CERN bei Genf schießen Physiker hochenergetische Protonen aufeinander. Bei der Kollision werden neue Teilchen erzeugt. Über mehrere Zwischenschritte können dabei auch **Multiquark-Systeme** entstehen; indirekt beobachten ließen sich bisher **Tetra- und Pentaquarks** (Hadronen aus vier beziehungsweise fünf Quarks).

Proton

Kollision

Schwerpunktenergie: 7 bis 8 Teraelektronvolt

Proton

Pentaquark

kompaktes Tetraquark

oder

dimolekulares Pentaquark

dimolekulares Tetraquark

2. Multiquarksysteme

Die **Lebensdauer** von Tetra- und Pentaquarks ist mit weniger als 10^{-21} Sekunden zu kurz, um diese Systeme direkt zu detektieren. Indirekt nachweisen lassen sie sich aber anhand charakteristischer **Zerfallsprodukte.**

zusammengehalten durch Restwechselwirkung der **starken Kraft**

3. Zerfallsprodukte

Charmonium

Proton

Charmonium

π^+

π^-

Als **Zerfallsprodukte** von Tetra- und Pentaquarks treten **Baryonen** und **Mesonen** in unterschiedlichen Varianten auf. Die häufigsten und am besten untersuchten Möglichkeiten sind hier dargestellt. Auffällig ist, dass das **charm-Quark** und sein Antiteilchen bei den Multiquark-Systemen eine wesentliche Rolle zu spielen scheinen. Möglicherweise sind sie auf Grund ihrer Masse für den Zusammenhalt in diesen Agglomeraten verantwortlich.

Die wichtigsten Eigenschaften der Quarks

Quarks sind elementare Bausteine der Materie. Es gibt sechs von ihnen, zwei gehören jeweils einer Generation an. Sie zählen zu den **Fermionen**, das heißt, zwei Quarks mit identischen Quanteneigenschaften können niemals gemeinsam in einem System auftreten.

Die sechs Elementarteilchen unterscheiden sich deutlich in ihrer Masse und besitzen eine drittelzahlige elektrische Ladung. Hinzu kommen weitere Quanteneigenschaften wie **Spin** (quantenmechanischer Eigendrehimpuls) und **Parität** (die Eigenschaft gegenüber Raumspiegelung).

Generation	Quark / Antiquark	Ladung (e)	Masse (MeV)
1	up	+⅔	2,3
	Anti-up	−⅔	2,3
	down	−⅓	4,8
	Anti-down	+⅓	4,8
2	strange	−⅓	95
	Anti-strange	+⅓	95
	charm	+⅔	1275
	Anti-charm	−⅔	1275
3	bottom	−⅓	4180
	Anti-bottom	+⅓	4180
	top	+⅔	173210
	Anti-top	−⅔	173210

Zudem tragen Quarks eine **Farbladung,** die auf die starke Wechselwirkung anspricht. Übermittler dieser Kraft sind die Klebeteilchen oder **Gluonen**. Die Farbladung existiert in den drei Varianten »rot«, »blau« und »grün«. Alle drei Farben kommen mit derselben Wahrscheinlichkeit vor; addiert sind sie farbneutral. Ebenso neutralisieren sich **Farbe** und **Anti-Farbe**. Außerdem existiert zu jedem Quark ein **Antiquark** mit denselben Eigenschaften, aber umgekehrtem Vorzeichen.

Farbladungen Quarks

Farbladungen Antiquarks

GOLDEN SECTION GRAPHICS / CHRISTIAN EISENBERG; TEXT: FELICITAS MOKLER

GOLDEN SECTION GRAPHICS / CHRISTIAN EISENBERG; TEXT: FELICITAS MOKLER

Hadronen

Hadronen setzen sich aus mehreren Quarks zusammen. Dazu zählen die **Baryonen**, die jeweils aus drei Quarks bestehen. Die bekanntesten – da langlebigsten – Beispiele darunter sind das **Proton** und das **Neutron**; sie bilden die Atomkerne. Die weitaus kurzlebigeren **Mesonen** (10^{-8} Sekunden oder kürzer) bestehen jeweils aus einem Quark und einem Antiquark.

Sowohl Baryonen als auch Mesonen können aus den unterschiedlichsten **Quark-Kombinationen** existieren. Sie müssen sich nur den **Spielregeln der Quantenchromodynamik** entsprechend zusammensetzen und nach außen hin farbneutral sein. Einzeln kommen Quarks in der Natur nicht vor, da das Potenzial der starken Kraft mit wachsendem Abstand zwischen ihnen zunimmt.

Baryonen

Gluonen

Proton

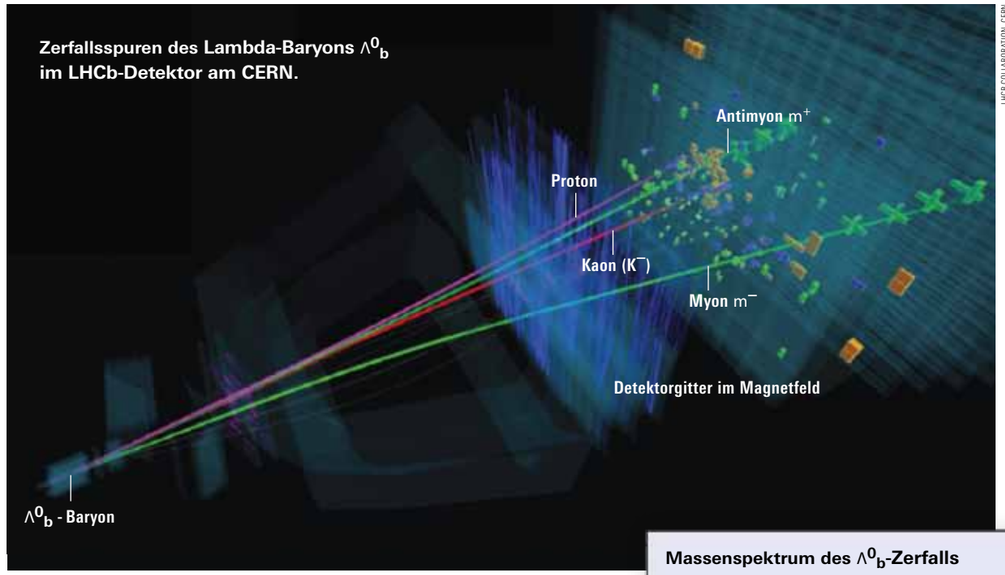
Neutron

Mesonen

π^+ / Pion

π^- / Pion

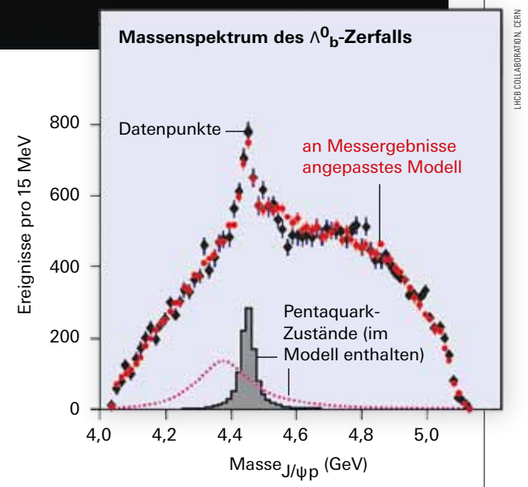
Charmonium



Zerfall des Lambda-Baryons

Mit dem LHCb-Detektor beobachteten Forscher erstmals den Zerfall eines neutralen Lambda-Baryons Λ^0_b (bestehend aus einem u-, einem d- und einem b-Quark) in ein negativ geladenes Kaon (K^-), ein Charmonium, das weiter in zwei entgegengesetzt geladene Myonen, μ, zerfällt, und in ein Proton. Im Detektor werden die Teilchen je nach Masse, kinetischer Energie und elektrischer Ladung durch ein Magnetfeld abgelenkt (oben).

Im Massenspektrum (rechts) des Λ^0_b-Zerfalls in ein Charmonium (J/ψ) und ein Proton tritt eine Resonanz bei 4,45 Gigaelektronvolt (GeV) auf. Sie ist mit Beiträgen von zwei Pentaquark-Zuständen mit einem Valenzquark-Gehalt $uc\bar{c}ud$ und positiver Ladung kompatibel.



LHC bestimmte Spin und Parität eindeutig. Das nach seiner invarianten Masse X(3872) (in Megaelektronvolt/c^2) benannte Teilchen ist mehr als viermal so schwer wie ein Proton. Seinem möglichen Valenzquark-Gehalt ($c\bar{c}u\bar{u}$) nach könnte es sich um ein echtes Tetraquark handeln; die Struktur ist bisher jedoch nicht völlig aufgeklärt.

Insbesondere könnte es sich auch um einen Zustand aus einem D^0-Meson und einem angeregten Anti-D-Meson handeln, der denselben Valenzquark-Gehalt, aber eine andere Struktur als ein echtes Tetraquark besäße: Die beiden Mesonen würden durch eine Restwechselwirkung in ähnlicher Weise wie Atome im Molekül zusammengehalten; man spricht deshalb von einem dimolekularen Zustand. Ein gewöhnliches, aus Quark und Antiquark bestehendes Meson ist ebenfalls noch nicht völlig ausgeschlossen, gilt jedoch auf Grund von Resultaten der LHCb-Kollaboration am CERN aus dem Jahr 2013 als weniger wahrscheinlich. Weiterführende Erkenntnisse versprechen sich die Experimentatoren erst vom derzeitigen Betrieb (Run II) des LHC bei einer Proton-Proton-Kollisionsenergie von 13 Teraelektronvolt, der seit 2015 läuft.

Es gibt aber zusätzliche Anzeichen für die reale Existenz von Tetraquarks. So konnte die Belle-Kollaboration 2007 mit dem so genannten $Z^+(4430)$ einen geladenen Tetraquark-Kandidaten mit einem möglichen Valenzquark-Gehalt von $c\bar{c}u\bar{d}$ nachweisen, dessen Resonanzcharakter die LHCb-Kollaboration 2014 mit einer statistischen Signifikanz von 13,9 Standardabweichungen bestätigte: Es handelt sich hier tatsächlich um ein neues exotisches Meson. Da es geladen ist, kann es kein gewöhnliches Meson aus Quark und Antiquark derselben Sorte sein. Zwei weitere Arbeiten zu möglichen Tetraquark-Kandidaten hat die LHCb-Kollaboration im Juni 2016 als Preprint veröffentlicht; sie warten noch auf die reguläre Publikation in einer Fachzeitschrift.

Die Suche geht weiter:
Gibt es auch uncharmante Multiquarks?

Weitere Kandidaten für exotische Mesonen wie das $Z_c(3900)$, das 2013 bei Belle und am chinesischen Beijing Electron Positron Collider gefunden wurde und in ein Charmonium und ein leichtes Meson zerfällt, lassen vermuten, dass nicht nur Tetraquarks, sondern auch andere Multiquark-Zustände – insbesondere Pentaquarks – nachweisbar sein könnten.

Während die Suche nach Pentaquarks aus den leichten up-, down- und strange-Quarks lange Zeit negativ verlief, konnten schließlich neue, 2015 publizierte Ergebnisse der LHCb-Kollaboration am Genfer Beschleuniger einen ersten großen Erfolg verbuchen. Die Forscher untersuchten in Proton-Proton-Kollisionen bei Energien von sieben und acht Teraelektronvolt Zerfälle von bestimmten dabei erzeugten Baryonen (Λ^0_b). Das geschah vor allem mit dem Ziel, die mittlere Lebensdauer dieser schnell zerfallenden Teilchen genauer zu bestimmen, als das in der Vergangenheit möglich war. Die neutralen Baryonen sind mit etwa 5,6 Gigaelektronvolt/c^2 fast sechsmal so massereich wie Neutronen. Wie Letztere bestehen sie aus drei Valenzquarks, von denen allerdings eines der beiden leichten down-Quarks im Neutron durch ein schweres bottom-Quark ersetzt ist.

In diesem Experiment bestimmten die Physiker nicht nur die mittlere Lebensdauer von 1,48 Pikosekunden ($1{,}48 \cdot 10^{-12}$ Sekunden) mit hoher Genauigkeit, sondern entdeckten den erstmals gemessenen Zerfall dieser Baryonen in ein negativ geladenes Kaon (ein aus Anti-up- und strange-Quark zusammengesetztes Meson, $\bar{u}s$), ein aus charm- und Anticharm-Quarks gebildetes Meson (J/ψ) sowie ein Proton (uud). Außerdem zeigte das Massenspektrum charakteristische Resonanzstrukturen bei Energien von 4,38 und 4,45 Gigaelektronvolt – das entspricht etwa der 4,7-fachen Protonenmasse. Diese Resonanzen zerfallen jeweils in ein J/ψ-Meson ($c\bar{c}$) und ein Proton (uud); demnach haben sie den Valenzquark-Gehalt $uc\bar{c}ud$.

Ungeklärt ist bisher, ob es sich bei den gemessenen Resonanzen um echte Pentaquarks handelt: also kompakte Gebilde aus fünf Quarks von sphärischer oder leicht deformierter Gestalt, die durch die starke, über Gluonen vermittelte Wechselwirkung aneinander gebunden sind. Es könnten nämlich auch Strukturen aus dem schweren J/ψ-Meson und einem Baryon sein, die eine Restwechselwirkung in ähnlicher Weise zusammenhält wie die Protonen und Neutronen in den Atomkernen oder die Atome in Molekülen. Man spricht deshalb bei dieser Variante wie bereits bei bestimmten Kombinationen aus zwei Mesonen auch von molekülartigen Strukturen.

Zu klären, wie sie genau aussehen, ist eine wichtige Aufgabe zukünftiger Forschung am LHC. Zwar sind die Experimentatoren heute noch weit entfernt von einer Messung des so genannten Quadrupolmoments der Pentaquark-Zustände, mit dessen Hilfe sich die räumliche Deformation beschreiben ließe, haben dies aber als mögliches Ziel bereits im Auge.

Ohne eine zuverlässige Theorie für die Wechselwirkungen in Multiquark-Systemen können die Wissenschaftler derzeit in weiten Teilen nur spekulieren, warum es einen Charmonium-Pentaquark-Zustand gibt, während Pentaquarks aus leichteren Quarks – wie deren wechselvolle Entdeckungsgeschichte gelehrt hat – möglicherweise gar nicht existieren: Vielleicht sind vergleichsweise schwere charm-Quarks für die Bildung von Multiquark-Systemen notwendig, weil sie eine stärkere Bindung ermöglichen. Die Kopplung der Quarks wäre dann nicht wie bisher angenommen und in der Quantenchromodynamik beschrieben universell, also für alle Quark-Sorten gleich, sondern hinge eventuell von der Masse der Valenzquarks ab, was Konsequenzen für die mathematische Formulierung der Quantenchromodynamik haben könnte.

Dementsprechend sollte es in Zukunft auch denkbar sein, Pentaquarks mit den mehr als dreimal schwereren bottom-Quarks zu finden. Vielleicht wird das bereits im derzeitigen Run II des LHC in Genf gelingen, bei dem die Forscher bis zu dreimal mehr Daten vorzugsweise zu den mutmaßlichen Pentaquark-Resonanzen sammeln und bis 2017/18 auswerten wollen. Dabei werden sie auch nach Pentaquarks mit nur einem schweren charm- oder bottom-Quark suchen. Zusätzliche Einsichten in die Natur der Pentaquarks könnten ferner geplante Experimente am US-amerikanischen Jefferson National Laboratory zur Erzeugung der Resonanzen bei Kollisionen zwischen Photonen und Protonen liefern.

Um die Quantenchromodynamik besser zu verstehen, werden in Zukunft solide experimentelle Ergebnisse zu Tetraquarks und Pentaquarks benötigt. Insofern stellen die neuen Entdeckungen der LHCb-Kollaboration einen wichtigen Schritt auf dem Weg zum genaueren Verständnis der starken Wechselwirkung dar. ◂

QUELLEN

Aaij, R. et al. (LHCb Kollaboration): Observation of J/Psi-p-Resonances Consistent with Pentaquark State. In: Physical Review Letters 115, 072001, 2015

Gell-Mann, M.: A Schematic Model of Baryons and Mesons. In: Physics Letters 8, 214, 1964

Zweig, G.: An SU3 Model for Strong Interaction Symmetry and its Breaking. CERN-TH-401. Preprint CERN Library, 1964

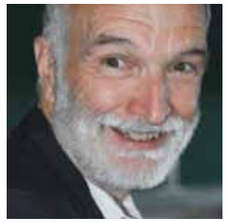
LITERATURTIPPS

LHCb Reports Observation of Pentaquarks. In: CERN Courier, 26. August 2015 (online)
Hier berichtet das CERN intern über die Pentaquark-Messungen.

Meißner, U.-G.: Charmante Pentaquarks? In: Physik Journal 10/2015, S. 21–22
Der Autor diskutiert, wie wichtig die Spezies der charm-Quarks für den Zusammenhalt der Pentaquarks ist.

Ziegler, T.: Pentaquarks – existieren sie wirklich? In: Physik in unserer Zeit 36, S. 157, 2005
Hier geht es um erste vermeintliche Messungen von Pentaquarks, die zunächst wieder revidiert werden mussten.

SCHLICHTING!
VORSICHT – EXPLODIERENDE SAMENKAPSELN!



Das Springkraut kann seine Samen meterweit schleudern. Dazu nutzt es die elastische Energie eines ausgeklügelten Systems winziger Federn.

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

spektrum.de/artikel/1417459

Früher hat der Bauer Getreide gesät, indem er es aus einem Behälter an der Hüfte in weitem Bogen ausgeworfen hat. Dieses naheliegende Prinzip, Saat weit zu verbreiten, hat die Natur lange vor dem Menschen perfektioniert. Das Indische Springkraut *(Impatiens glandulifera)* schlägt seine Samen kraftvoll von sich. Die aus Asien eingeschleppte Art ist mit dieser Technik so erfolgreich, dass sie bereits heimische Konkurrenten verdrängt.

Die Pflanze lässt sich leicht in Aktion erleben. Dazu muss man im Spätsommer oder Herbst lediglich versuchen, einen Strauß mit den schön anzusehenden und wohlriechenden Blüten zu pflücken. Sobald man Hand anlegt, antwortet das Kraut mit einem Bombardement kleiner Körner aus den bereits gebildeten Samenkapseln.

Wer dieses Phänomen verstehen möchte, sollte eine reife Kapsel vorsichtig zwischen Daumen und Zeigefinger zusammendrücken. Oft erfolgt bereits bei der ersten Berührung schlagartig ein Gegendruck. Die Hülle explodiert geradezu zwischen den Fingern und gibt die dunklen Samenkörner frei.

Die fünf länglichen Seitenteile des anfangs obeliskenförmigen Gehäuses ringeln sich dabei uhrfederartig auf (Fotos rechts oben, a bis d). Nicht nur die Form rechtfertigt diesen Vergleich – die gespeicherte Energie pro Masse ist sogar etwas größer als bei Federstahl. Versucht man, die Spiralen anschließend wieder geradezubiegen, leisten sie erstaunlich großen Widerstand. Entsprechend standen die Seitenteile der Kapsel vor der Explosion unter enormer Spannung.

Um diese bis zum Moment der Kapselsprengung aufrechtzuerhalten, sind die Streifen symmetrisch aneinandergefügt, was die Kräfte gleichmäßig verteilt. Nähte halten die Ränder zusammen. Sie sind anfangs fest, entwickeln sich mit zunehmender Reife jedoch zu Sollbruchstellen. Dann genügt ein kurzer Riss in einer der fünf Fugen, um die übrigen vier nahezu simultan – innerhalb von etwa 250 Mikrosekunden – ebenfalls reißen zu lassen. Eine solche konzertierte Aktion ist nötig, um die Samen maximal zu beschleunigen.

Entscheidend für diese Koordination ist eine Verbindung der gespannten Streifen durch flexible Membranen im unteren Teil. Wenn eine der Fugen bricht und sich die beiden daran angrenzenden Teile bewegen, drücken sie die Membranen auseinander. Das wiederum zieht an den übrigen Verbindungsstellen und löst auch sie.

Ungeheure Spannung entlädt sich und katapultiert die Körner meterweit

Nun schnurren alle fünf Gewebestränge wie winzige Uhrfedern zusammen und schleudern dabei den gemeinsamen Boden mitsamt den Samenkörnern hoch. Jede Kapsel enthält fünf bis zehn von ihnen mit einer Masse von je etwa 20 Milligramm. Sie hängen locker an einem dünnen zentralen Strang, der aus dem Kapselboden herauswächst. Während die Streifen aufgeringelt zur Ruhe kommen, fliegen die Samen wegen ihrer Trägheit weiter.

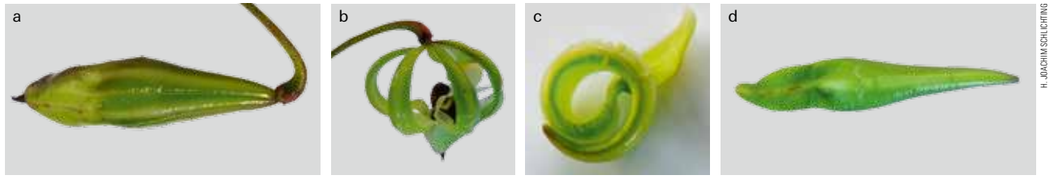
Um die Reichweite der Körner abschätzen zu können, habe ich eine rund 1,5 Meter hohe Springkrautpflanze frei gelegt und die Umgebung im Umkreis von mehr als zwei Metern mit einer Folie ausgelegt. Anschließend löste ich den Wurfmechanismus durch leichtes Anschlagen mit dem Finger aus, wodurch die Samen bis zu 1,8 Meter vom Stamm entfernt zu liegen kamen. Dabei nutzten einige sogar die weit ausladenden Blättern als Sprungbretter. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist von einer noch größeren Wurfweite von bis zu fünf Metern die Rede. Dabei dürfte aber noch Wind im Spiel gewesen sein.

Geht man der Einfachheit halber von einem waagerechten Wurf aus zwei Meter Höhe aus, so entspricht der von mir ermittelten Reichweite von 1,8 Meter bei Vernachlässigung des Luftwiderstands eine Startgeschwindigkeit von zirka 3,3 Meter pro Sekunde. Der Physiker Robert D. Deegan von der University of Michigan hat maximal vier Meter pro Sekunde gemessen. Der höhere Wert ist vermutlich hauptsächlich auf die zu überwindende Luftreibung zurückzuführen, die beim realen Flug dazukommt.

Deegan hat auch die mittlere elastische Energie bestimmt, die in den fünf gespannten Streifen gespeichert ist, und kam auf 0,9 Millijoule. Bei durchschnittlich sieben Samenkörnern pro Kapsel, die mit einer Geschwindigkeit von drei Metern pro Sekunde abgeschossen werden, benötigt dieser Vorgang bereits 0,63 Millijoule an kinetischer Energie. Bedenkt man, dass außerdem noch Arbeit in das Auftrennen der restlichen Nähte, die Beschleunigung der Streifen und das Überwinden von Reibungsvorgängen fließt, so offenbart sich hier ein äußerst effektiver Mechanismus und ein verblüffend hoher Wirkungsgrad, mit dem die elastische Energie in Wurfenergie umgewandelt wird.

Wegen der kurzen Auslösezeit von 250 Mikrosekunden kommen physiologische Prozesse für den Vorgang nicht in Frage – enzymatische Reaktionen benötigen viermal länger. Vielmehr baut sich die mechanische Spannung im Verlauf des Kapselwachstums auf und erreicht ihr Maximum zur Zeit der Reife. Dabei dürfte die Druckverteilung des Zellsafts in den Streifen eine wesentliche Rolle spielen. Als ein von mir zur Untersuchung gepflückter Springkrautstrauß zu welken begann, konnte ich keine Explosionen mehr auslösen. Nachdem ich ihn dann aber gleich in eine Vase mit Wasser stellte, regenerierte sich die Spannkraft und die Samen wurden wieder ausgestoßen.

Wie Federspannung grundsätzlich in pflanzlichem Gewebe entsteht, lässt sich mit einem einfachen Experiment zeigen: Feuchtet man den Streifen eines Löwenzahnstängels an, ringelt er sich auf. Die innen liegenden Zellen absorbieren im Gegensatz zur Außenhaut durch Osmose Wasser und quellen auf. Wenn man die Spirale entrollt, spürt man einen deutlichen Widerstand.



H. JOACHIM SCHLICHTING

An der unversehrten Kapsel des Indischen Springkrauts sind zwei von fünf durch Nähte getrennte Streifen zu sehen (a). Wenn sie zerbirst, schleudert sie schwarze Samenkörner (b) umher. Dabei rollt sich jedes Segment ein (c) und lässt sich nur unter Kraftaufwand wieder geradedrücken (d, unter einer Glasscheibe fixiert).

**… wie das Spannen einer Feder,
die, je mehr man sie dehnt,
an Kraft und Widerstand zunimmt,
bis sie jenen Zustand erreicht,
wo sie zurückschlagen muß.**
Hartmut Lange (* 1937)

FOTOLIA / HENRIK LARSSON

Blüten und Samenkapseln des Indischen Springkrauts *(Impatiens glandulifera)*.

QUELLE

Deegan, R. D.: Finessing the Fracture Energy Barrier in Ballistic Seed Dispersal. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 109, S. 5166–5169, 2012

TECHNIKGESCHICHTE

DIE VORFAHREN DER ENIGMA UND DES COMPUTERS

SERIE: GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ **Der Universalgelehrte hat seine mechanischen Wunderwerke nie voll funktionsfähig erlebt. Seit wir sie rekonstruiert haben, wissen wir: Leibniz war seiner Zeit um Jahrhunderte voraus.**

Klaus Badur hat eine Lehre als Maschinenschlosser und ein Ingenieurstudium in Hannover durchlaufen. Nach Tätigkeiten in der Industrie als Konstrukteur und Projektingenieur war er ab 1988 Geschäftsführer einer international tätigen Entwicklungsfirma für Mess- und Prüfmaschinen im Automobilbau. Seitdem er 2013 in Ruhestand ging, betreibt er private Forschung zu historischen mechanischen Rechenmaschinen, einerseits durch Studium der Werke Leibnizens, andererseits durch Restaurierung und Nachbau auch anderer Geräte.

spektrum.de/artikel/1382049

Ein wahrhaft monumentales Werk hat Gottfried Wilhelm Leibniz uns hinterlassen. Schon die schiere Menge des Materials ist beeindruckend: Die annähernd 100 000 Blatt Papier, die er im Lauf seines Lebens beschrieben hat, füllen ein Volumen von ungefähr zwei Kubikmetern. Und die hochphilosophischen Gedanken über die beste aller Welten (Teil 1 dieser Serie) sowie die Beherrschung des abstrakten Unendlichen (Teil 2) waren nur der theoretischere Teil seines Werks. Auf der praktischen Seite stehen nicht nur seine Arbeiten zur Experimentalphysik (Teil 3), sondern, noch handfester, auch die Beschäftigung mit merkwürdigen Zahnrädern und anderen mechanischen Bauteilen. Leibniz hat – neben vielen anderen Dingen – zwei geradezu visionäre Maschinen entworfen, die »Machina arithmetica« zum Rechnen und die »Machina deciphratoria« zum Ver- und Entschlüsseln von Texten.

Zu seinen Lebzeiten hat die Rechenmaschine trotz intensiver Bemühungen nie richtig funktioniert, und die Chiffriermaschine ist nie gebaut worden. Das lag bei der Rechenmaschine nicht etwa daran, dass Leibniz beim Entwurf etwas falsch gemacht hätte. Für die Chiffriermaschine fand sich kein zahlender Interessent, vermutlich weil die Diplomaten der damaligen Zeit die Sicherheit ihrer etablierten Geheimverfahren überschätzten und daher keinen Aufwand für eine Verbesserung treiben mochten. Die Rechenmaschine ist daran gescheitert, dass die Mechaniker die geforderte Präzision bei der Fertigung der Bauteile nicht erreichten. Aber so wie Leibniz seine Maschinen entworfen hat, waren sie funktionsfähig. Wir wissen das, weil wir sie unter meiner Leitung nachgebaut haben. In der mehrjährigen Auseinandersetzung mit dieser Maschine und mit einer Rekonstruktion der Chiffriermaschine habe ich eine Reihe überraschender Erkenntnisse gewonnen.

Leibniz war nicht der Erste, der sich an einer Rechenmaschine versuchte. Schon 1623 hatte der Tübinger Mathematiker und Mechaniker Wilhelm Schickard (1592–1635) eine Maschine gebaut, die mechanisch addieren konnte und zum Multiplizieren zumindest Hilfen bereitstellte (Bild S. 78 unten). Das Gerät ging später verloren, konnte jedoch 1957 nach alten Aufzeichnungen Schickards in zwei Briefen an seinen Zeitgenossen Johannes Kepler rekonstruiert werden.

Der Mathematiker und Philosoph Blaise Pascal (1623–1662) entwickelte mit 21 Jahren die »Pascaline«, die seinem Vater, der im Steuerwesen tätig war, das Addieren der Geldbeträge erleichtern sollte (Bild S. 78 oben). Mit ihr konnte man bis zu achtstellige Zahlen addieren und – über ein Hilfsverfahren namens Komplementbildung – auch subtrahieren. Die Maschine wurde in mehreren Exemplaren gebaut.

Noch in Mainz hatte Leibniz von der Pascaline gehört und 1671, also im Alter von 25 Jahren, erste Ideen zu einer Rechenmaschine formuliert. »Denn es ist ausgezeichneter Männer unwürdig, ihre Zeit mit sklavischer Rechenarbeit zu

SERIE
Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716)

Teil 1: Juli 2016
Die vernünftig geordnete Welt von Hans Poser

Teil 2: Juli 2016
Vertreibung der Gespenster von Thomas Sonar

Teil 3: August 2016
Die perfekte Wasseruhr und das Prinzip der kleinsten Wirkung von Hartmut Hecht

Teil 4: September 2016
Die Vorfahren der Enigma und des Computers
von Klaus Badur

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ BIBLIOTHEK, NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK, HANNOVER (DIE VIER-SPEZIES-RECHENMASCHINE)

Die Machina arithmetica
Dies ist wahrscheinlich das einzige Exemplar von Leibnizens Arbeiten im Bereich der Mechanik, das gegenständlich erhalten geblieben ist. Heute steht die Maschine in der Gottfried Wilhelm Leibniz Bibliothek in Hannover.

verlieren, die mit Anwendung der Maschine jedem beliebigen mit Sicherheit übertragen werden könnte«, schrieb er. Die Pascaline, die er etwas abwertend als »Rechenkästchen« bezeichnete, wollte er ergänzen und übertreffen: Neben der Addition und der Subtraktion sollte seine Maschine auch multiplizieren und dividieren können. Der vorgeblichen Geringschätzung zum Trotz hat er 1672 in Paris die Pascaline eingehend studiert und in seinen Aufzeichnungen detailliert beschrieben.

Die Machina arithmetica

Seine eigene Maschine sollte einfach zu bedienen sein (ein »Kinderspiel«), unabhängig von der Geschicklichkeit des Bedieners zuverlässig rechnen und insbesondere für eine Multiplikation nur eine Kurbelumdrehung benötigen. Dies hätte jedoch aufwändige Übersetzungsgetriebe erfordert und wäre mit der pascalschen Konstruktion nicht vereinbar gewesen. Wohl deswegen hat Leibniz dieses Ziel nicht weiterverfolgt.

Stattdessen arbeitete er eigene Ideen aus und fand in dem hervorragenden Uhrmacher Olivier einen überaus kompetenten Partner. In der damaligen Zeit war ein Mechaniker gleichzeitig auch Konstrukteur. In diesem Fall hatte Olivier keine leichte Aufgabe, denn Leibniz war ein Kopfmensch, und da er sehr klare Vorstellungen hatte, hielt er es für eine Kleinigkeit, seine kargen und ungenauen Skizzen (Bild S. 80) in ein funktionierendes Gerät umzusetzen.

Ein erstes Modell, wahrscheinlich aus Holz, von dem keine genaue Beschreibung vorliegt, stellte Leibniz 1673 der Royal Society in London vor. Auch wenn er viele Funktionen daran noch nicht vorzeigen konnte, waren die Herren der Gelehrtengesellschaft von seiner Präsentation so beeindruckt, dass sie ihn gegen das Versprechen, demnächst eine vollständige Maschine vorzuführen, als Mitglied in die Gesellschaft aufnahmen.

Im Jahr 1675 präsentierte er der Académie des sciences in Paris ein zweites Modell, das Olivier wohl schon aus Messing gefertigt hatte. Auch diese Gesellschaft nahm ihn

MIT FRDL. GEN. DES ARITHMEUM - RECHNEN EINST UND HEUTE, UNIVERSITÄT BONN

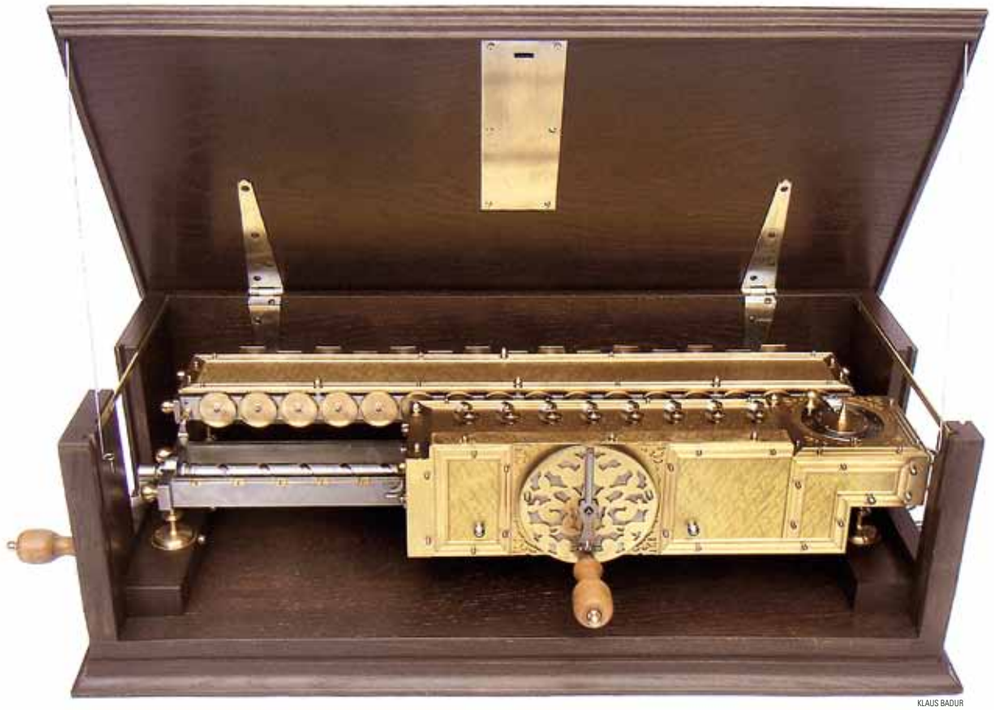
Die Pascaline

Einige Originale der Rechenmaschine von Blaise Pascal sind erhalten geblieben und im Pariser Musée des Arts et Métiers ausgestellt. Hier abgebildet ist ein Nachbau.

MIT FRDL. GEN. DES ARITHMEUM - RECHNEN EINST UND HEUTE, UNIVERSITÄT BONN

Wilhelm Schickards Rechenmaschine

Diese Maschine konnte in ihrem unteren Teil addieren und subtrahieren. Zur Multiplikation mehrstelliger Zahlen konnte man durch die Schieber im oberen Teil die Zwischenprodukte einstellen; die Methode ist von den »neperschen Rechenstäben«, Hilfsmitteln für die schriftliche Multiplikation, hergeleitet. Die so erhaltenen Zwischenergebnisse konnte man ablesen und im unteren Teil der Maschine aufaddieren. Das Ergebnis stand auf separaten Zahlenscheiben zur Verfügung. Die hier gezeigte Rekonstruktion ist im Arithmeum in Bonn ausgestellt.



KLAUS BADUR

Nachbau der Machina arithmetica durch Spektrum-Autor Klaus Badur und Wolfgang Rottstedt.

in ihre Reihen auf, allerdings erst 1700 und auf Grund seiner Arbeiten aus dem physikalischen Bereich.

Nachdem Leibniz 1676 seinen Dienst als Hofrat und Bibliothekar des Herzogs Johann Friedrich in Hannover angetreten hatte, setzte er dort ab 1680 die Arbeiten an der Rechenmaschine fort. In der Zeit wurde eine von Olivier begonnene erste vollständige Maschine mit acht Eingabestellen und zwölf Ergebnisstellen fertig gestellt. Sie wird in der Literatur als die ältere, kleine Maschine bezeichnet und ist verschollen.

Die 1690 begonnene Nachfolgerin (siehe das Bild auf S. 76/77) sollte mit acht Eingabe- und 16 Ergebnisstellen größer werden. Ihre Geschichte ist lang und enttäuschend, vor allem für Leibniz selbst, der insgesamt etwa 24 000 Taler (was heute ungefähr ein bis zwei Millionen Euro entspräche) in sein Werk investiert hatte und bis zu seinem Lebensende keinen durchschlagenden Erfolg verzeichnen konnte. Verschiedene Mechaniker fertigten Einzelteile, jetzt allerdings ohne Oliviers Beteiligung. Ab 1700 übernahm der Helmstedter Mathematikprofessor Rudolf Christian Wagner (1671–1741) die Leitung der weiteren Arbeiten. Die Mechaniker hatten größte Schwierigkeiten, die Einzelteile mit der geforderten Präzision herzustellen. Außerdem mussten viele Elemente immer wieder geändert und neu gefertigt werden. In einem Schreiben an Leibniz berichtet Wagner 1706 jedoch ausführlich von erfolgreich durchgeführten Rechnungen. Dennoch wollten vor allem die Zehnerüberträge im Rechenwerk nicht richtig funktionieren. Leibniz drängte ungeduldig auf die Fertigstellung, weil er endlich seine Erfindung funktionsfähig den Herrscherhäusern Europas präsentieren wollte.

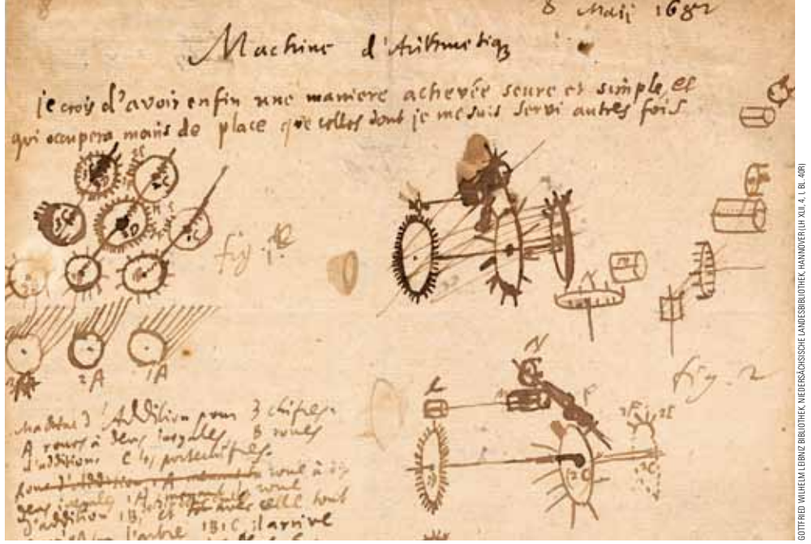
Auch als ab 1710 die Arbeiten in Zeitz unter der Leitung des dortigen Mathematikers Gottfried Teuber fortgesetzt wurden, gelang es nicht, die Maschine zufrieden stellend zum Funktionieren zu bringen. Bis zu Leibnizens Tod 1716 arbeiteten verschiedene Werker immer wieder an Verbesse-

AUF EINEN BLICK
LEIBNIZENS MASCHINEN

1 Leibniz hat eine Rechenmaschine konzipiert und über Jahrzehnte versucht, sie zum Funktionieren zu bringen. Aber die Feinmechanik seiner Zeit konnte den Entwurf schlicht noch nicht umsetzen.

2 Eine Maschine zum Ver- und Entschlüsseln geheimer Nachrichten ist über das Entwurfsstadium nicht hinausgekommen, weil die potenziellen Abnehmer keinen Bedarf sahen.

3 Der Nachbau beider Geräte hat den Beweis erbracht, dass Leibnizens Ideen nicht nur in die Realität umsetzbar, sondern ihrer Zeit sehr weit voraus waren.



GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ BIBLIOTHEK, NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK, HANNOVER (LH XII, A, 1, BL. 40R)

Skizze einer Rechenmaschine
»Endlich glaube ich ein sicheres und einfaches Verfahren erreicht zu haben, das auch noch weniger Platz beansprucht als diejenigen, die ich bis jetzt verfolgt habe«, so Leibniz in dieser Notiz vom 8. Mai 1682. Einem Uhrmacher blieb es überlassen, die zugehörigen Zeichnungen in eine funktionierende Mechanik umzusetzen.

rungen im Bereich der Zehnerüberträge. Später wurde die Maschine eingelagert und tauchte erst 1880 in Göttingen wieder auf (siehe »Das Schicksal der leibnizschen Rechenmaschine«, rechts).

Dieses Scheitern könnte das ganze Unternehmen als grundsätzlich verfehlt erscheinen lassen – was ein völlig falscher Eindruck wäre. Wesentliche Elemente der leibnizschen Maschine sind in den mechanischen Rechenmaschinen, die ab etwa 1850 bis in die 1960er Jahre hinein massenhaft in Gebrauch waren, verwirklicht worden: insbesondere die Staffelwalze, die Trennung von Eingabe- und Rechenwerk, die Verschiebbarkeit des Eingabewerks zur stellenrichtigen Ausführung der Multiplikation und die Aufteilung des Zehnerübertrags in zwei Stufen.

Damals jedoch waren die Anforderungen kaum zu bewältigen, die insbesondere die Zehnerübertragsmechanik an die Fertigungsgenauigkeit stellte. An insgesamt 1650 Zahnflankenpaarungen müssen die Maße auf hundertstel Millimeter genau eingehalten werden, und die Orientierung der einzelnen Wellen darf höchstens um 0,1 Grad von der exakten Position abweichen. Nur so ist eine störungsfreie Funktion zu gewährleisten. Es überrascht kaum, dass die Hersteller mit diesen Anforderungen Probleme hatten.

Die Leibniz-Rechenmaschine arbeitet auch ohne konstruktive Änderungen stets korrekt

Insgesamt sind 14 Nachbauten der Rechenmaschine bekannt. Einige Konstrukteure, darunter Nikolaus Joachim Lehmann (1921–1998), der Computerpionier der DDR, und Erwin Stein, Professor für Technische Mechanik in Hannover, haben die Konstruktion der Maschine selbst – erfolgreich – geändert, um den problematischen Zehnerübertrag zu verbessern. Allerdings wird die Maschine dadurch wesentlich komplizierter, und die Einzelteile müssen noch genauer justiert werden. Darüber hinaus hat Stein zusammen mit dem Getriebespezialisten Franz Otto Kopp (1937–2015) eine detaillierte mathematische Analyse der leibnizschen Konstruktion durchgeführt und deren Ergebnisse in den Bau einer optimierten Vorführmaschine im Maßstab 2:1 übernommen.

Dagegen haben der Mechanikermeister Wolfgang Rottstedt und ich uns bei unserem Projekt für einen originalgetreuen Nachbau entschieden, um das komplexe Gerät möglichst detailliert zu untersuchen. In mehreren Sitzungen fertigten wir mehr als 200 Fotos vom Original an, zum Teil mit einem Spiegel, um auch alle Einzelteile zu erfassen, die nicht von außen erreichbar waren. Das Original durfte dabei nicht betätigt oder gar demontiert werden.

Anhand dieser Informationen entstand dann ein vollständiger, normgerechter Zeichnungssatz. Anschließend haben wir in mehr als 1500 Stunden die über 650 Einzelteile der Maschine gefertigt und montiert (Bild S. 79).

Mit fortschreitender Arbeit wuchs unser Respekt vor der Leistung von Leibniz als Ideengeber und vor seinen Mechanikern, die als Konstrukteure und Fertiger die Ideen umgesetzt hatten. Mit welchen geringen Mitteln hatten diese Leute vor mehr als 300 Jahren eine solch großartige Maschine gefertigt! Es gab ja damals nur einfache Bohrmaschinen und Drehbänke mit manuellem Antrieb. Alles andere musste man mit der Feile erledigen. Heute sind diese Genauigkeitsanforderungen mit modernen Werkzeugmaschinen zu bewältigen.

Die Arbeit wurde belohnt. Mit dem originalgetreuen Nachbau konnten wir nachweisen, dass die Maschine bei ausreichend genauer Fertigung und geringer Erweiterung des Rechenalgorithmus ohne konstruktive Änderung am Konzept vollständig und korrekt rechnet (siehe »Die Funktion der leibnizschen Rechenmaschine«, S. 82/83).

Neben den extremen Genauigkeitsanforderungen ist das Projekt der leibnizschen Rechenmaschine damals sicherlich auch daran gescheitert, dass mehrere Mechaniker nacheinander an der Maschine gearbeitet haben und Leibniz sie nur sehr selten persönlich in Augenschein genommen hat. Aber es war wie bei anderen seiner genialen Ideen nicht ein Scheitern des Konzepts, sondern nur der Umsetzung. Leibniz war auch hier seiner Zeit weit voraus.

Als Leibniz seine Rechenmaschine der Royal Society präsentierte, stellte ein Mitglied den Sinn eines solchen Geräts in Frage. Es sei ja sehr umständlich zu bedienen, und schriftlich, von Hand, würde man schneller und einfacher rechnen. Heute erscheint dieser Einwand vollends anachronistisch; man bedenke jedoch, dass unsere heutigen Computer im Grunde nur Weiterentwicklungen der leibnizschen Ideen sind.

Die Machina deciphratoria nahm moderne Methoden der Verschlüsselung um Jahrhunderte vorweg

Die Technik der Ver- und Entschlüsselung war für Leibniz schon von Berufs wegen relevant. Immerhin hatte er als Diplomat häufig geheime Nachrichten zu versenden, zu übermitteln und zu empfangen. Er hat sich jahrelang sehr ausführlich mit dem Thema Kryptografie beschäftigt und eine Reihe bedeutender wissenschaftlicher Erkenntnisse gewonnen, wie viele seiner erhaltenen Aufzeichnungen und Briefe belegen. Das Material ist sehr umfangreich und noch nicht erschöpfend ausgewertet.

Im Verkehr mit seinen Briefpartnern verwendete Leibniz unter anderem eine Verschlüsselung, die einfach durchzuführen ist und nur erfordert, dass beide Partner ein einziges Wort (das »Schlüsselwort«) als Geheimnis teilen. Man schreibe in ein Schema mit 2 mal 13 Kästchen zunächst das Schlüsselwort, in diesem Beispiel »LABYRINTHUS«, und dann alle noch nicht verwendeten Buchstaben des Alphabets in der üblichen Reihenfolge:

L	A	B	Y	R	I	N	T	H	U	S	C	D
E	F	G	J	K	M	O	P	Q	V	W	X	Z

Zum Verschlüsseln ersetzt man jeden Buchstaben durch denjenigen, der unmittelbar darunter- oder darübersteht; zum Entschlüsseln verfährt man genauso. Zum Beispiel wird aus dem Klartext

LEIBNIZ MACHINA ARITHMETICA

der Chiffretext

ELMGOMD IFXQMOF FKMPQILPMXF.

Eine derartige Verschlüsselung würde allerdings einem Angriff nicht lange standhalten. Denn die Zuordnung von Klartext- und Chiffretextbuchstaben ist eindeutig; zum Beispiel wird aus einem I immer ein M. Daher führt eine schlichte Häufigkeitsanalyse meistens schon zum Ziel. Der häufigste Buchstabe des Chiffretextes entspricht – nicht in diesem kurzen Beispiel, aber in der Regel – dem Klarbuchstaben E, weil dieser Buchstabe in einem (deutschen) Text am häufigsten vorkommt. Unter dieser Schwäche leiden alle monoalphabetischen Verfahren, das sind solche, die nur eine Zuordnung von den Klartext- zu den Chiffretextbuchstaben (ein »Alphabet«) verwenden.

Dem wäre durch polyalphabetische Chiffren abzuhelfen: Man verschlüsselt den ersten Buchstaben mit einem Alphabet, den zweiten mit einem anderen, den dritten mit wieder einem anderen und so weiter. Wenn das Sortiment der Alphabete erschöpft ist, fängt man wieder von vorne an. Und damit handelt man sich eine – geringere, aber immer noch erhebliche – Schwäche ein. Wenn man beispielsweise zehn Alphabete immer wieder rundum verwendet, ist jeder zehnte Buchstabe mit demselben Alphabet verschlüsselt. Ein gewisser Rest dieser periodischen Struktur bleibt im Chiffretext erhalten und bietet Angriffsmöglichkeiten.

Für das Problem gibt es im Wesentlichen zwei Lösungen. Man arbeitet entweder mit sehr ▸ *Lesen Sie weiter auf S. 84*

Das Schicksal der leibnizschen Rechenmaschine

1671–1672	Leibniz stellt erste Überlegungen zur Rechenmaschine an.
1672	Er übersiedelt nach Paris. Ein erstes Holzmodell entsteht.
1673	Präsentation des Modells bei der Royal Society in London
1675	Präsentation eines neuen, von Olivier aus Messing gefertigten Modells bei der Pariser Académie des sciences
1676	Leibniz zieht nach Hannover.
1979–1694	Bau einer älteren, kleinen Rechenmaschine mit acht Eingabe- und zwölf Ergebnisstellen, wahrscheinlich aus dem von Olivier gefertigten Modell
Ab 1693	Weiterbau und Verbesserung dieser Maschine durch den Uhrmacher Georg Heinrich Kölbing
Ab 1690	Fertigung der Einzelteile für die jüngere, große Rechenmaschine mit acht Eingabe- und 16 Ergebnisstellen
Ab 1700	Rudolf Christian Wagner betreut die weiteren Arbeiten in Helmstedt mit dem Werker Levin und dem Schlosser Georg Warnecke.
Ab 1701	Montage der jüngeren großen Maschine
1702–1710	Erprobung, Umbauten und Verbesserungen durch Levin und Warnecke an der Maschine unter der Aufsicht von Wagner
1710–1716	Weitere Arbeiten an beiden Rechenmaschinen in Zeitz unter Gottfried Teuber
1716	Nach Leibnizens Tod wird die große Maschine in Hannover eingelagert.
1764	Die große Maschine wird Abraham G. Kästner an der Universität Göttingen zur Untersuchung übergeben und später in der Modellkammer der Georgia Augusta eingelagert.
Seit 1880	Die Maschine befindet sich in der heutigen Gottfried Wilhelm Leibniz Bibliothek in Hannover.
1894–1896	Der Rechenmaschinenfabrikant Gottfried Burkhardt restauriert die Maschine in Glashütte.

Die Funktion der leibnizschen Rechenmaschine

Im Prinzip addiert die Maschine zwei Zahlen so, wie man es in der Grundschule lernt. Man arbeitet von rechts nach links, und wenn man beim Addieren über die Neun hinauskommt, addiert man für die Zehn eine Eins in der nächsthöheren Stelle.

Am Eingabewerk der Maschine stellt man die zu addierenden Zahlen ein und überträgt sie durch eine einzige Drehung mit der Antriebskurbel (»Magna Rota«) in das Rechenwerk; dort wird sie zu dem bisherigen Inhalt des Rechenwerks hinzuaddiert.

Zu Beginn der Rechnung ist das Rechenwerk auf null gesetzt. Nachdem man den ersten Summanden im Eingabewerk eingestellt und die Kurbel gedreht hat, steht dieser im Rechenwerk. Daraufhin stellt man den zweiten Summanden ein, dreht die Kurbel und findet im Rechenwerk die Summe vor, abzulesen an den Scheiben der Ergebnisanzeige.

Zum Aufaddieren dient ein spezielles Bauteil: die Staffelwalze. Leibniz hat sie erfunden und wegen ihrer speziellen Form als »Wendeltreppchen« bezeichnet. Man kann sie sich folgendermaßen aufgebaut vorstellen: Auf einer gemeinsamen Achse, der »Eingabewelle«, sitzen neun Zahnräder mit je 22 Zähnen. Aber von Zahnrad 1 sind alle Zähne bis auf einen entfernt, Zahnrad 2 hat nur zwei Zähne, und so weiter. Auch die neun Zähne von Zahnrad 9 verteilen sich nicht gleichmäßig über den Umfang, sondern lassen eine Lücke; die ist notwendig, damit der Zehnerübertrag (siehe unten) reibungslos funktioniert. Für die Ziffer Null wird die Staffelwalze außer Eingriff mit dem Rechenwerk geschoben.

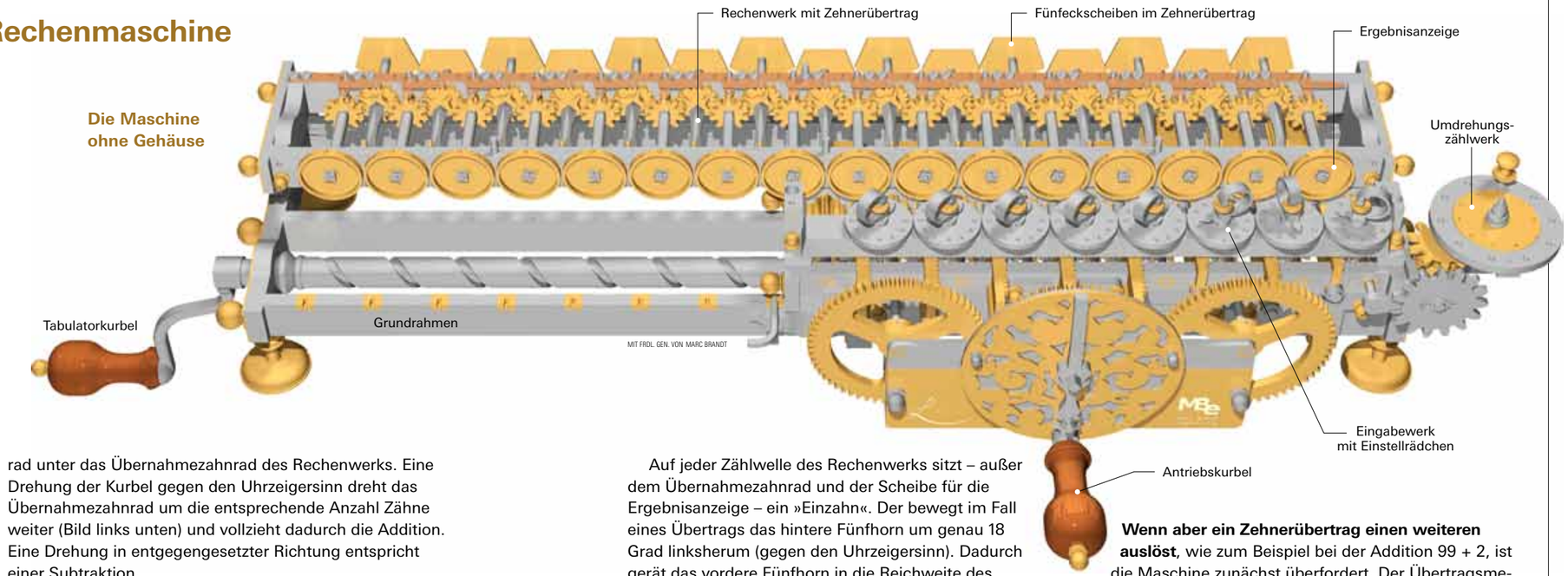
Zum Einstellen eines Summanden hebt man ein Einstellrädchen leicht an, dreht es, bis die Zeigerspitze auf die richtige Ziffer zeigt, und lässt es einrasten. Dadurch schiebt eine Zahnstange die Staffelwalze mit dem richtigen Zahnrad unter das Übernahmezahnrad des Rechenwerks. Eine Drehung der Kurbel gegen den Uhrzeigersinn dreht das Übernahmezahnrad um die entsprechende Anzahl Zähne weiter (Bild links unten) und vollzieht dadurch die Addition. Eine Drehung in entgegengesetzter Richtung entspricht einer Subtraktion.

Die Multiplikation wird als wiederholte Addition ausgeführt. Man stellt den Multiplikanden im Eingabewerk ein und dreht die Kurbel so oft, wie die Einerstelle des Multiplikators angibt. Das Umdrehungszählwerk dient zur Kontrolle. Dann verschiebt man mit Hilfe der Tabulatorkurbel das gesamte Eingabewerk um eine Stelle nach links, dreht die Kurbel so oft, wie die Zehnerstelle des Multiplikators angibt, und so weiter. Auf diese Weise erfordert zum Beispiel eine Multiplikation mit 134 nicht etwa 134 Kurbelumdrehungen, sondern nur 1 + 3 + 4 = 8.

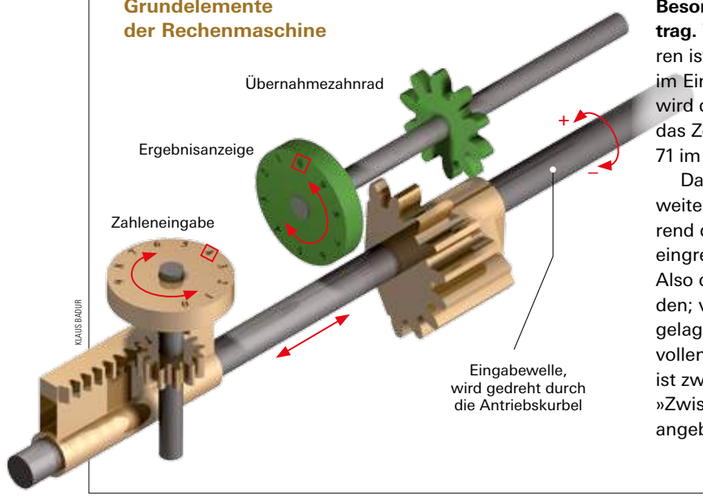
Besondere Aufmerksamkeit erfordert der Zehnerübertrag. Wenn beispielsweise die Addition 39 + 42 auszuführen ist, dann steht bereits 39 im Rechenwerk, während 42 im Eingabewerk eingestellt ist. Durch die Kurbeldrehung wird das Einerrad des Rechenwerks um zwei Zähne und das Zehnerrad um vier Zähne weitergedreht, es steht also 71 im Rechenwerk, während 81 richtig wäre.

Das Zehnerrad muss also noch um den Übertrag 1 weiterbefördert werden. Das ist aber nicht möglich, während die Staffelwalzen noch in die Übernahmezahnräder eingreifen, weil sonst alle Zahnräder blockieren würden. Also darf der Übertrag nicht gleichzeitig ausgeführt werden; vielmehr wird er in einer Warteposition zwischengelagert und erst in der zweiten Hälfte der Kurbeldrehung vollendet, wenn die Staffelwalzen »zahnlos« sind. Dazu ist zwischen je zwei Achsen des Rechenwerks eine »Zwischenwelle« angeordnet, auf der zwei Fünfhörner angebracht sind (Bild rechts).

Die Maschine ohne Gehäuse

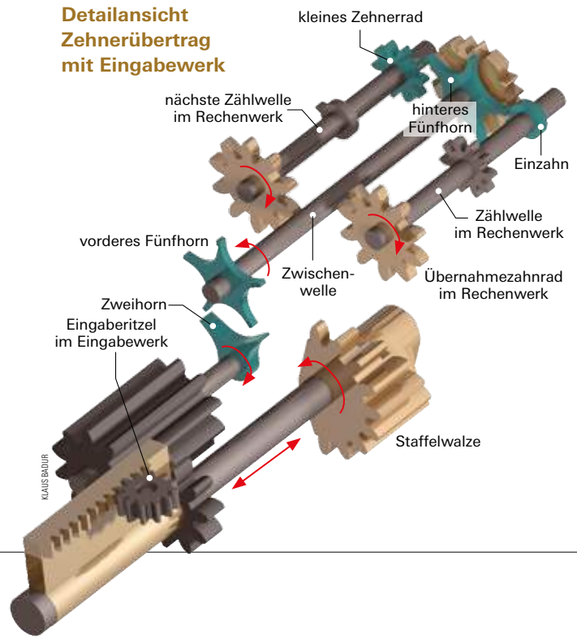


Grundelemente der Rechenmaschine



Auf jeder Zählwelle des Rechenwerks sitzt – außer dem Übernahmezahnrad und der Scheibe für die Ergebnisanzeige – ein »Einzahn«. Der bewegt im Fall eines Übertrags das hintere Fünfhorn um genau 18 Grad linksherum (gegen den Uhrzeigersinn). Dadurch gerät das vordere Fünfhorn in die Reichweite des Zweihorns. Dieses wiederum sitzt auf einer Welle, die von der Kurbel mitgedreht wird, und dreht nun das vordere Fünfhorn um weitere 54 Grad linksherum. Dabei dreht das hintere Fünfhorn das kleine Zehnerrad der links benachbarten Zählwelle (die für die nächsthöhere Stelle zuständig ist) um einen Zahn weiter, womit der Zehnerübertrag abgeschlossen ist. Das geschieht an allen Stellen des Rechenwerks gleichzeitig.

Detailansicht Zehnerübertrag mit Eingabewerk



Wenn aber ein Zehnerübertrag einen weiteren auslöst, wie zum Beispiel bei der Addition 99 + 2, ist die Maschine zunächst überfordert. Der Übertragsmechanismus stellt das Zehnerrädchen korrekt auf null, und dessen Einzahn bewegt die Fünfhörner der Welle zwischen Zehner- und Hunderterstelle. Aber das Zweihorn greift nicht mehr ein, denn es ist ja längst am vorderen Fünfhorn vorbeigelaufen. Also bleibt der Übertrag von der Zehner- zur Hunderterstelle unvollendet und das Ergebnis falsch.

Am hinteren Ende jeder Zwischenwelle ist eine Scheibe in Gestalt eines regelmäßigen Fünfecks angebracht. Dieses zeigt bei einem unvollendeten Übertrag mit einer Spitze nach oben. Man könnte die Situation bereinigen, indem man die entsprechenden Fünfeckscheiben von Hand ein Stück weiterdreht. So hatte es Wagner auch Leibniz vorgeschlagen – was dieser aber als »unrecht« verwarf.

Daraus wurde in der Vergangenheit der Schluss gezogen, dass die Maschine nicht korrekt arbeite. Das ist falsch, denn es gibt eine einfache Abhilfe. Wenn am Ende einer Rechnung noch unvollendete Zehnerüberträge ausstehen, stellt man die Eingabe am Eingabewerk in allen acht Stellen auf null und dreht dann die Kurbel noch ein paar Mal. Bei jeder Umdrehung werden bis zu zwei Überträge vollendet, und am Ende hat man ohne Eingriff in die Maschine das richtige Ergebnis. Schließt man an eine Rechnung eine weitere an, so erledigen die Kurbeldrehungen alle ausstehenden Überträge aus der alten Rechnung mit. Die beschriebene Bereinigung ist also nur bei der jeweils letzten aus einer Folge von Rechnungen durchzuführen.

Die Enigma

Die Chiffriermaschine der Deutschen im Zweiten Weltkrieg arbeitet mit einem sehr komplexen und dadurch sehr schwer zu entschlüsselnden Substitutionsverfahren. Bei ihr wird die zu verschlüsselnde Nachricht über die Tastatur wie bei einer Schreibmaschine eingetippt. Mittels elektrischer Schaltkreise, die über mehrere Kontaktwalzen und Stecker nach jeder Tasteneingabe verändert werden, wird der kodierte Buchstabe im Lampenfeld angezeigt. Durch die rotierenden Kontaktwalzen ändert sich nach jedem eingegebenen Buchstaben das Geheimalphabet.

MIT FREUNDL. GEN. DES ARITHMEUM - RECHNEN EINST UND HEUTE, UNIVERSITÄT BONN

Die Geheimnismaschine von Leibniz

Nicholas Rescher, Jahrgang 1928, ist Professor für Philosophie an der University of Pittsburgh (Pennsylvania). Neben vielen anderen Dingen beschäftigt er sich intensiv mit der Philosophie von Leibniz.

Seit der Antike dient die Verschlüsselung zur vertraulichen Übermittlung, und in der Renaissance kamen mechanische Hilfsmittel dafür in Gebrauch, darunter Alphabetschieber und -scheiben mit einer Mechanik vergleichbar derjenigen eines Rechenschiebers oder einer Rechenscheibe. Die Arbeit mit diesen Geräten war langsam, mühevoll und fehlerträchtig, so dass es sinnvoll erschien, sie an mechanische Automaten zu delegieren. Das geschah mit zunehmender Intensität im Verlauf des 20. Jahrhunderts, vorrangig für militärische und diplomatische Zwecke.

Weit früher, 1688, hatte jedoch Leibniz in einem Schriftsatz für eine Audienz bei Kaiser Leopold I. in Wien in allen Einzelheiten eine Chiffriermaschine beschrieben, die er schon seit einiger Zeit im Sinn hatte. Damit nahm er um reichlich 200 Jahre das Prinzip der Rotor-Schlüsselmaschine von Arvid Damm (1869–1927) vorweg, nach dem die erste Generation der mechanischen Chiffriermaschinen (ab 1918) funktionierte. Wie die berühmte Enigma hatte Leibnizens Maschine eine Tastatur zur Eingabe von Buchstaben, die zugleich das Chiffrieralphabet weiterschaltete, und eine Anzeige für das Ergebnis. Allerdings war, der Zeit entsprechend, die Tastatur nicht von der Schreibmaschine inspiriert, sondern vom Klavier, und die Anzeige nicht elektrisch, sondern mechanisch. Nicht eine Elektronik wechselte für den jeweils nächsten Buchstaben in möglichst undurchschaubarer Weise die Verschlüsselung, sondern die Staffelwalze, die Leibniz bereits für seine Rechenmaschine verwendet hatte.

Wie alle späteren kryptografischen Maschinen stellte auch Leibnizens Gerät eine ungeheure Anzahl an Verschlüsselungsmöglichkeiten bereit. Aber diese Angabe ist geeignet, die Anwender in falscher Sicherheit zu wiegen. Es kommt nämlich nicht auf die schiere Anzahl

Fortsetzung von S. 81

vielen Alphabeten, mehr, als die typische Nachricht Zeichen hat, so dass es keine für den Kodeknacker nutzbaren Wiederholungen gibt. Oder man beschränkt sich auf eine überschaubare Anzahl von Alphabeten, wechselt diese aber in einer völlig undurchschaubaren Folge ab.

Nach dem ersten Prinzip funktionierte die Enigma (Bild links), jene Maschine, welche die Deutschen im Zweiten Weltkrieg verwendeten und für unknackbar hielten – ein Irrtum, der erst 30 Jahre später aufgeklärt wurde. Die Enigma erzeugte das von Buchstabe zu Buchstabe neue Alphabet durch eine Art Zählwerk, dessen Stellung über elektrische Kontakte ausgewertet wurde (**Spektrum** Juni 1999, S. 26). Ein entsprechendes Verfahren wäre zu Leibnizens Zeiten kaum praktikabel gewesen. An Stelle des Zählwerksmechanismus hätten beide Seiten mit umfangreichen Papierlisten arbeiten müssen.

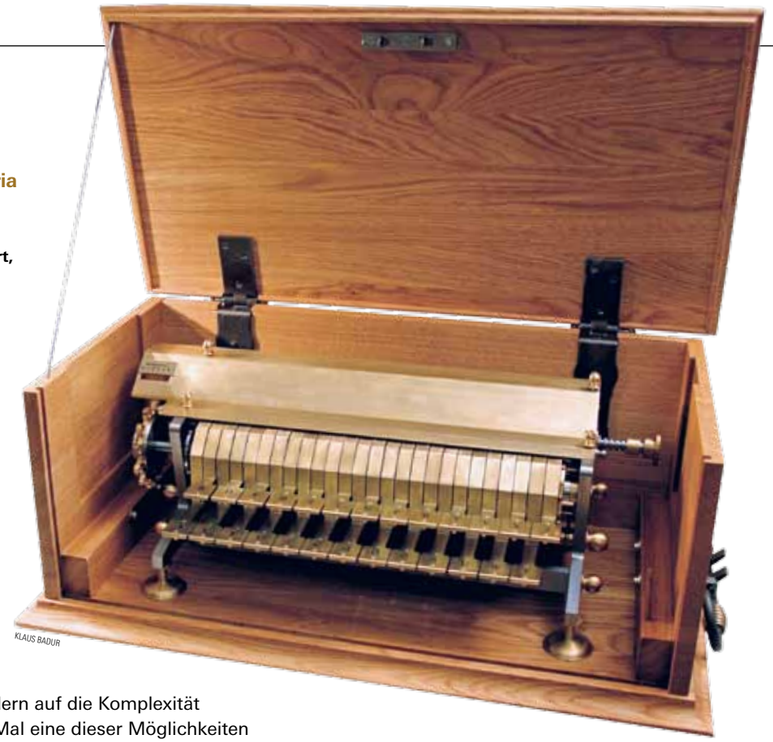
Leibniz wählte daher den zweiten Weg. Aber auch wenn sich dabei der Umfang des zum Chiffrieren benötigten Materials in Grenzen hielt, blieben sowohl das Verschlüsseln als auch das Entschlüsseln mühsame und fehlerträchtige Tätigkeiten. So lag es nahe, diese Arbeit an eine Maschine zu delegieren. Zur Vorbereitung einer Audienz bei Kaiser Leopold I. in Wien schrieb Leibniz 1688:

»Dergleichen sind meine Machina deciphratoria damit ein potentat mit vielen ministris, in unterschiedlichen ziphern gleich correspondiren, und ohne einige muhe entweder die zipher die er schreiben will, und den verstand dessen so ihm in zipher zugeschickt wird gleichsam wie auff einem musicalischen instrument oder clavicordio greiffen könne, also dass es gleich mit berührung der clavir darstehe, und nur abcopiret werden dürffe.«

Auch in der Korrespondenz mit Herzog Johann Friedrich beschreibt er seine Ideen zu einer Chiffriermaschine. Ob er selbst den Bau einer solchen Maschine weiter betrieben hat,

Die Machina deciphratoria

Nicholas Rescher hat das Prinzip aus Leibnizens Aufzeichnungen rekonstruiert, Klaus Badur den Entwurf in ein funktionierendes Gerät umgesetzt.



KLAUS BADUR

der Möglichkeiten an, sondern auf die Komplexität des Verfahrens, das jedes Mal eine dieser Möglichkeiten auswählt, und vor allem auf das – neue und bisher nicht praktizierte – Verfahren selbst.

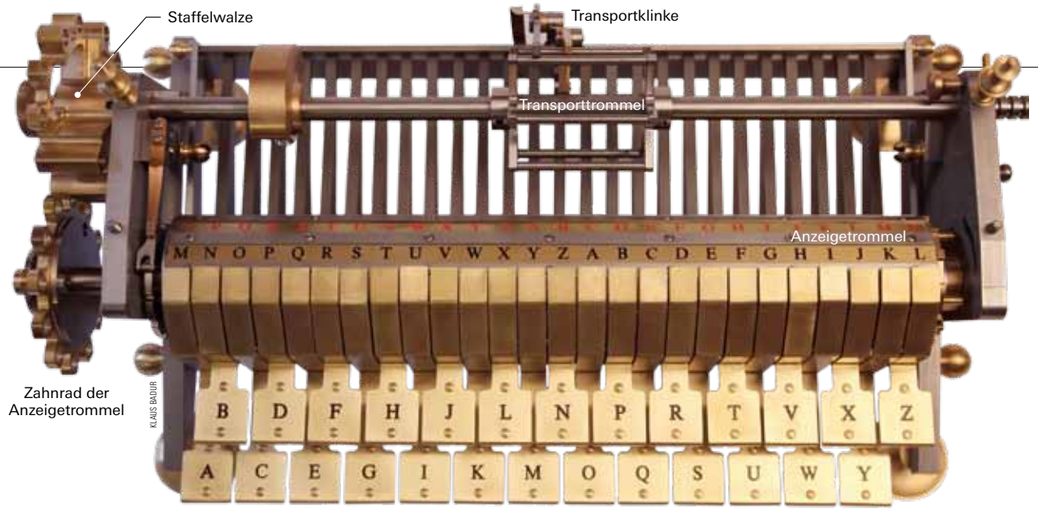
Genau daran ist die Enigma im Zweiten Weltkrieg gescheitert. Die ursprüngliche kommerzielle Version aus den 1920er Jahren wurde schrittweise verbessert, indem man neue Elemente einführte – aber immer nur eines auf einmal. Mit allen Neuerungen zugleich ausgestattet, wäre sie vielleicht unüberwindlich gewesen; aber so konnten zuerst die Polen, später die Briten mit jeder der kleinen Verbesserungen mithalten. (Die größte unter ihnen war die Einführung eines vierten Rotors in die Marineversion der Enigma.) Dagegen hat die astronomisch hohe Zahl an Verschlüsselungsmöglichkeiten nicht geholfen.

Kaiser Leopold hat Leibnizens Angebot damals nicht angenommen, weil seine Berater ihre etablierten Verfahren (fälschlich) für sicher hielten. Gleichwohl war Leibnizens Maschine eine geniale Errungenschaft, die selbst die Enigma in den Schatten stellte. Mit der irregulären Alphabetumschaltung durch die Staffelwalze hätte Leibniz die Kryptografie weiter vorangebracht, als sich irgendjemand anders hätte denken können – damals und noch mehr als 200 Jahre danach. Höchstwahrscheinlich hätte die moderne Theorie – ohne Computer und bei den damals geringen Datenmengen – den besten Kodeknackern nicht gegen diese Maschine geholfen.

QUELLEN

Rescher, N.: Leibniz and Cryptography. Kapitel 17 in: On Leibniz. Expanded Edition. University of Pittsburgh Press, 2013

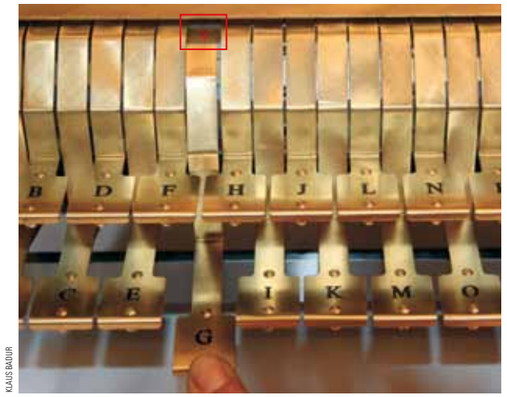
Winkel, B. J. et al. (Hg.): The German Enigma Cipher Machine. Artech House, Boston /London 2005



Die Machina deciphratoria – Umschaltmechanismus

Im vorderen Bereich befinden sich 26 Tasten zur Eingabe der Buchstaben von A bis Z. Wer Zahlen übermitteln will, muss sie wie bei der Enigma in Buchstaben ausschreiben.

Ein Tastendruck (im gezeigten Beispiel G) gibt erstens den Blick auf einen Buchstaben (hier ein rotes Y) frei.



Dieser gehört zu einem Streifen, der seinerseits auf einer quer liegenden Anzeigetrommel befestigt ist. Die Anzeigetrommel hat auf ihrem Umfang Platz für sechs Paare von Streifen. Ein Streifen eines Paars enthält in schwarzer Schrift die Geheimbuchstaben, die an die Stelle der Klartextbuchstaben A, B, C, … treten sollen, der andere führt in roter Schrift der Reihe nach zu jedem Geheimbuchstaben den richtigen Klartextbuchstaben auf. Auf der Trommel sind immer ein schwarzer und der zugehörige rote Streifen untereinander angeordnet. Welcher von beiden angezeigt wird, hängt davon ab, ob das Zahnrad der Anzeigetrommel auf C (Chiffrieren) oder D (Dechiffrieren) eingestellt ist (Bild rechts oben).

Zweitens dreht auf einen Tastendruck hin eine Transportmechanik aus Transporttrommel und Transportklinke die Staffelwalze um 60 Grad. Wie in der Rechenmaschine kann man sich dieses Bauteil als mehrere – diesmal fünf – aufeinandergelegte Zahnräder auf einer gemeinsamen Achse vorstellen. Diesmal allerdings liegen die zwölf Zähne im Prinzip gleichmäßig über den gesamten Umfang verteilt. Auch hier fehlen Zähne, aber nicht so systematisch wie bei der Rechenmaschine, sondern ungeordnet.

Die Staffelwalze
Links ein Computermodell, oben links die Staffelwalze eingreifend in das Zahnrad (oben rechts).

Durch seitliche Verschiebung der Staffelwalze kann man einstellen, welches ihrer fünf lückenhaften Zahnräder wirksam ist, das heißt in das Zahnrad der Anzeigetrommel eingreift.

Je nachdem, ob die Staffelwalze in ihrer gegenwärtigen Position Zähne oder Lücken hat, treibt sie ein Zahnrad, das mit der Anzeigetrommel verbunden ist, ebenfalls um 60 Grad (zwei Zähne) weiter oder auch nicht. Durch den Tastendruck wird also einerseits der nächste ver- oder entschlüsselte Buchstabe angezeigt (und der Anwender muss ihn auf Papier notieren), andererseits das Verschlüsselungsalphabet durch das jeweils nächste ersetzt – oder auch nicht.

Da die Anzeigetrommel für das Chiffrieren wie für das Dechiffrieren nur sechs verschiedene Stellungen hat, bräuchten die Staffelwalze und das zugehörige Zahnrad eigentlich nur je sechs Zähne (bei der Staffelwalze die Lücken mitgezählt). Dadurch würden aber die wenigen Zähne im Vergleich zum Rest des Rads ungünstig groß und würden nicht mehr gut aneinander abgleiten. Deswegen ist gewissermaßen jeder der sechs großen Zähne durch zwei gleiche kleine ersetzt worden.

ist nicht bekannt. Aber es ist anzunehmen, dass er mit den Kenntnissen, die er bei den Arbeiten an seiner Rechenmaschine gewonnen hatte, sehr wohl ein solches Projekt erfolgreich hätte durchführen können.

Immerhin waren seine Aufzeichnungen so aussagekräftig, dass es gelungen ist, sie in eine praktikable Bauanleitung umzusetzen. Nicholas Rescher, Professor für Philosophie an der University of Pittsburgh (Pennsylvania), beschäftigt sich seit vielen Jahren mit Leibniz und seiner Kryptografie (siehe seinen Beitrag »Die Geheimnismaschine von Leibniz«, S. 84/85). Zusammen mit dem Ingenieur Richard Kotler hat er einen detaillierten Konstruktionsentwurf erstellt. Nach diesen Vorgaben wurden unter meiner Leitung Detailkonstruktionen erstellt und zwei dieser Maschinen in Hannover gefertigt (Bild S. 85 oben). Eine der Rekonstruktionen befindet sich heute in Pittsburgh, die zweite in einer Dauerausstellung der Leibniz Universität Hannover.

Vorbild für die Ausführung war dabei das vorhandene Original der Leibniz-Rechenmaschine. Insbesondere haben wir uns bei einem zentralen Bauteil, der Staffelwalze, von ihrer Verwendung in der Rechenmaschine leiten lassen. Durch die Lücken in ihrer Zahnreihe erzeugt die Staffelwalze einen unregelmäßigen Wechsel unter den verschiedenen Chiffrieralphabeten. Da sie gewissermaßen aus fünf verschiedenen, in unterschiedlicher Weise lückenhaften Zahnrädern besteht, kann man dem Angreifer durch Wechsel von einem Zahnrad zum anderen das Geschäft zusätzlich erschweren (siehe »Die Machina deciphratoria – Umschaltmechanismus«, oben).

Damit die geheime Nachrichtenübermittlung funktioniert, müssen Sender und Empfänger der Nachricht über identische Maschinen verfügen und vorab einen »Schlüssel« verabreden. Dieser beschreibt diejenige unter den vielen möglichen Einstellungen der Maschine, die beide Beteiligten für eine konkrete Nachrichtenübermittlung anzuwenden haben. Typischerweise legt man für jeden Tag der absehbaren Zukunft, zum Beispiel für das nächste Jahr, einen Schlüssel fest. Dieses Schlüsselverzeichnis nimmt der Diplomat im versiegelten Umschlag mit, wenn er in sein Gastland entsandt wird, und hütet es sorgfältig. Die chiffrierte Nachricht selbst kann dann »über einen unsicheren Kanal« verschickt werden, also über einen Weg, auf dem ein Gegner sie kopieren kann: heute das Internet, damals die gewöhnliche oder auch die Diplomatenpost.

Für die leibnizsche Maschine besteht der Schlüssel aus

- einem Sortiment von sechs Chiffrieralphabeten, die mitsamt den zugehörigen Dechiffrieralphabeten auf die Trommel aufzubringen sind;
- der Angabe, welches von zwölf möglichen Lückenzahnrädern zum Einsatz kommt;
- der Anfangsposition dieses Lückenzahnrads.

Für die sechs Chiffrieralphabete hat man im Prinzip die Auswahl aus 26! = 1 · 2 · … · 26 ≈ 4 · 10^{26} Möglichkeiten. Realistischerweise hätte man dem Diplomaten wohl kaum mehr als 50 Alphabetpaare in den Geheimkoffer gegeben. Aber solange der Spion nicht an den Koffer kommt, muss er das komplette Sortiment der Möglichkeiten in Betracht ziehen. Und selbst mit 50 Alphabetpaaren bleiben 50! / (50 – 6)! = 11 441 304 000 Möglichkeiten, sie auf der Trommel zu montieren – die Reihenfolge der Streifen mitgerechnet.

Das jeweils zuständige Zahnrad aus dem Sortiment, das die Staffelwalze bietet, stellt man ein, indem man die Staffelwalze entlang der Trommelachse verschiebt und möglicherweise die ganze Staffelwalze auswechselt.

Insgesamt hätte Leibnizens Chiffriermaschine sowohl nach der Zahl der möglichen Geheimalphabete als auch nach der Schwierigkeit der Entschlüsselung durchaus mit der modernen Enigma mithalten können. ◂

QUELLEN

Badur, K., Rottstedt, W.: Und sie rechnet doch richtig! Erfahrungen beim Nachbau einer Leibniz-Rechenmaschine. In: Studia Leibnitiana 36, S. 129–146, 2004

Breger, H.: Zwischen Philosophie, Mathematik und Politik: Leibniz und die Kryptographie. In: Herbst, J. et al. (Hg.): Einheit in der Vielfalt. VIII. Internationaler Leibniz-Kongress. Gottfried Wilhelm Leibniz Gesellschaft, Hannover 2006

Von Mackensen, L.: Die Vorgeschichte und die Entstehung der 4-Spezies-Rechenmaschine von Gottfried Wilhelm Leibniz. Dissertation, München 1968. In: Studia Leibnitiana, Supplementa 2, S. 34–68, 1969

Rescher, N. et al.: Design and Construction of Leibniz's Proposal for a Machina Deciphratoria. Erscheint in: X. Internationaler Leibniz-Kongress 2016. Gottfried Wilhelm Leibniz Gesellschaft, Hannover 2016

Stein, E., Kopp, F. O.: Konstruktion und Theorie der Leibnizschen Rechenmaschine im Kontext der Vorläufer, Weiterentwicklungen und Nachbauten. In: Studia Leibnitiana 42, S. 1–128, 2010

Walsdorf, A. et al.: Das letzte Original. Die Leibniz-Rechenmaschine der Gottfried Wilhelm Leibniz Bibliothek. Olms, Hildesheim 2014

Walsdorf, A.: Von der Idee der »Lebendigen Rechenbank« zur Konstruktion der Staffelwalze — Die erste Entwicklungsphase der Leibniz-Rechenmaschine. Erscheint in: X. Internationaler Leibniz-Kongress 2016. Gottfried Wilhelm Leibniz Gesellschaft, Hannover 2016

REZENSIONEN

Die Beinhaltung der Blutroten Heidelibelle *(Sympetrum sanguineum)* stellt sicher, dass ihr Körper stets das Gleichgewicht bewahrt.

Mehr Rezensionen auf **spektrum.de/rezensionen**

Monique Berger,
Michel Gaudichon
DAS GEHEIME LEBEN DER INSEKTEN
Luftakrobaten und Kletterkünstler in unseren Gärten
Ulmer, Stuttgart 2016
192 S., € 29,90

ZOOLOGIE

WELT DER KRABBELTIERE

Vom Bienen-Blumen-Komplex bis zum allgemeinen Körperbau der Kerbtiere: Ein Streifzug durch die Insektenkunde.

Dieses Werk ist Bildband und Sachbuch zugleich. Monique Berger, passionierte Naturfotografin, und Michel Gaudichon, lang gedienter Biologielehrer, geben einen umfassenden Einblick in das Leben, die Entwicklung und den Körperbau der Insekten. Auch deren ökologische Bedeutung ist immer wieder ein Thema. Da die Autoren dies alles anschaulich und leicht verständlich erklären und dabei fast vollständig ohne lateinische Artnamen auskommen, dürfte das Buch auch fachfremde beziehungsweise jüngere Leser ansprechen. Die rund 420 Farbfotos tragen dazu maßgeblich bei. Wer meint, nur tropische Kerbtiere könnten mit Farbenpracht und Formenvielfalt auftrumpfen, erlebt hier so manche Überraschung.

Zunächst erfahren wir einiges über den Bienen-Blumen-Komplex – allerdings auch, dass die emsigen Honigproduzenten beileibe nicht die einzigen Blütenbestäuber sind. Käfer, Schmetterlinge, Fliegen und viele weitere Insekten sind im Zuge der Evolution ebenfalls enge Beziehungen mit Blütenpflanzen eingegangen. Wie es dazu kam und wie dieses beiderseits ertragreiche Verhältnis im Detail funktioniert, schildern die Autoren anhand zahlreicher Nahaufnahmen von Blütenbesuchen. Die allerdings teils recht wolkigen Formulierungen – mögen sie der Übersetzung geschuldet oder schon im Original vorhanden sein – lassen erahnen, dass das Buch in Frankreich entstanden ist. Etliche Passagen dürften frankophilen Lesern Vergnügen bereiten, die anderen aber ein wenig ratlos zurücklassen.

Der Fokus des Werks liegt zweifellos auf der farbintensiven Bebilderung. Es sind ausschließlich heimische Insekten zu sehen, und zwar oft in Situationen, die dem Untertitel »Luftakrobaten und Kletterkünstler in unseren

Ein Kleinlibellenpaar.

BEIDE FOTOS: MONIQUE BERGER, AUS MONIQUE BERGER UND MICHEL GAUDICHON: DAS GEHEIME LEBEN DER INSEKTEN. MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES VERLAGES E. ULMER, STUTTGART

REZENSIONEN

Gärten« alle Ehre machen. Zusätzlich versorgen uns die Autoren mit der richtigen Dosis an aufschlussreichen Infografiken, wann immer ein Sachverhalt nicht direkt aus Bild oder Text ersichtlich ist und zusätzlicher Klärungsbedarf besteht. Wie beispielsweise das Kopplungssystem von Vorder- und Hinterflügeln bei den Hautflüglern funktioniert, begreift man mit einer Schemazeichnung besser als anhand einer halben Textseite.

Gut nachvollziehbar zeigen die Autoren biologische Grundprinzipien der extrem artenreichen und diversifizierten Insekten auf, ohne dabei zu sehr ins Detail zu gehen. Mit Hilfe des generellen Bauplans dieser Tierklasse (Kopf, Brust, Hinterleib, drei Beinpaare und meist zwei Flügelpaare) lässt sich ein Insekt fast immer sofort als solches identifizieren – und von seinen nahen Verwandten, den Spinnenartigen, unterscheiden. Zahlreiche Fotos veranschaulichen das Erklärte. So wird das Prinzip, wonach die Form der Funktion folgt, anhand der Angepasstheit verschiedener Insektenbeine an die jeweilige Umwelt deutlich. Die stark verlängerten Mittel- und Hinterbeine etwa, mit denen sich Wasserläufer auf der Wasseroberfläche halten, oder die zu Fangarmen umgestalteten Vorderextremitäten der Gottesanbeterin sind nur zwei Beispiele dafür.

Hin und wieder wechseln die Themen innerhalb einzelner Kapitel etwas sprunghaft. Dennoch leisten Berger und Gaudichon einen wichtigen Beitrag dazu, die große Relevanz der Insekten in verschiedenen Ökosystemen aufzuzeigen. Durch die Verbindung von Ästhetik und Nutzen tragen Bücher wie »Das geheime Leben der Insekten« zu einem positiveren Image der Kerbtiere bei und schaffen ein Bewusstsein dafür, wie wichtig es ist, diese zu schützen.

Arne Baudach ist Doktorand der Biologie in Gießen.

DIE MACHT DER INFORMATION
Zeichen und Symbole
Dokumentation, England 2016
Komplett-Media, Grünwald 2016
DVD, Lauflänge zirka 60 Minuten
€ 19,99

INFORMATIK
VON DER KEILSCHRIFT ZUM COMPUTER

Unsere Welt ist geprägt von Informationstechnologien, deren Wurzeln bis in die Frühgeschichte der Menschheit reichen.

Information ist überall. Irgendwie enthält alles eine Fülle von Daten, sogar jedes Sandkorn: Richtig befragt, gibt es Auskunft über seine geologische Herkunft und vielleicht über Spuren menschlicher Bearbeitung. Die Hochkulturen begannen mit dem schriftlichen Speichern der Lautsprache. In Stein gehauene oder in Ton gedrückte Keilschriftzeichen hielten Transaktionen von Gütern und Menschen dauerhaft fest, oft unter Anrufung von Göttern und Herrschern. Sie verraten uns heute etwas über Handel und Politik vergangener Jahrtausende.

Mit der Keilschrift beginnt der britische Physiker und Fernsehjournalist Jim Al-Khalili auf vorliegender DVD eine optisch unterhaltsame Reise durch die Geschichte der Information. Er weist auf den Fortschritt hin, den der Übergang von der Bilderschrift (Hieroglyphen) zur symbolischen Aufzeichnung von Silben und Konsonanten darstellte. Die Lautschrift klebt nicht mehr am Erscheinungsbild der Dinge, sondern profitiert von der Abstraktheit der gesprochenen Sprache.

Den nächsten großen Sprung machte die Informationsverarbeitung mit der industriellen Revolution. Der mechanische Webstuhl wurde schon um 1800 mit Lochkarten gesteuert, um komplizierte Stoffmuster herzustellen. Hier sorgt Al-Khalili für eine Klarstellung der Technikgeschichte, denn viele führen den Ersteinsatz von Lochkarten auf den amerikanischen Ingenieur Herman Hollerith (1860–1929) anlässlich der US-Volkszählung von 1890 zurück.

Nach kurzer Würdigung des Morsealphabets geht Al-Khalili auf Claude Shannon (1916–2001) ein, den Begründer der Informationstheorie, und auf Alan Turing (1912–1954), der die Grundidee des modernen Computers einwickelte. Hier beackert der Film bekanntes Terrain, bleibt oberflächlich und kann auch in der visuellen Umsetzung – Kabel und Antennen, Bildschirme und Chips – nicht allzu sehr überraschen.

Nur an einer Stelle geht Al-Khalili in die Tiefe. Er illustriert den Zusammenhang von Information und Entropie mit Hilfe des maxwellschen Dämons, eines Gedankenexperiments des schottischen Physikers James Clerk Maxwell (1831–1879): Besäße ein mikroskopischer Dämon Informationen über das unterschiedliche Tempo einzelner Gasatome, so könnte er sie in zwei Behälter sortieren, dadurch die Entropie senken und aus dem Temperaturunterschied Energie gewinnen, was nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verboten ist. Der Streit der Theoretiker, warum das prinzipiell nicht funktionieren kann, endete erst 1982, als der amerikanische Informatiker Charles Bennett nachwies, dass der Dämon seinen begrenzten Informationsspeicher gelegentlich leeren muss – und dabei die gewonnene Energie unweigerlich wieder verbraucht (siehe »Maxwells Dämon« von Charles Bennett, **Spektrum** Januar 1988, S. 48).

Leider werden Shannon und vor allem Turing nicht ebenso gründlich behandelt. Man darf aber hoffen, dass die insgesamt attraktiv gestaltete DVD interessierte Betrachter dazu anregt, die angerissenen Themen selbst zu vertiefen.

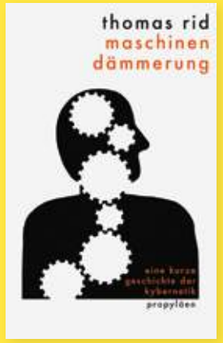
Michael Springer ist Physiker, Schriftsteller und Wissenschaftsredakteur.

KYBERNETIK
MENSCH UND TECHNIK – KONFLIKT ODER SYMBIOSE?

Die Kybernetik war oft mit militärischen Anwendungen verflochten. Und immer spiegelte sie gesellschaftliche Hoffnungen und Ängste.

Monströse Visionen haben Sciencefiction-Autoren seit den 1970er Jahren entwickelt: Die Kriege der Zukunft würden von Stahlkolossen, Kampfrobotern und Cyborgs geführt. Entweder, so die Prognose, bilde der Mensch in diesen dystopischen Welten eine Einheit mit der Maschine oder die Killerroboter agierten autonom und bedürften des *Homo sapiens* gar nicht mehr. Läuft die Menschheit am Ende sogar Gefahr, von ihren eigenen Maschinen beherrscht zu werden?

Die nach dem Zweiten Weltkrieg entstandene Wissenschaft der Kybernetik hat solche Vorstellungen befeuert. Ihr Forschungsgebiet ist die Regelung und Steuerung von Maschinen. Als ihr Gründervater gilt der amerikanische Mathematiker Norbert Wiener (1894–1964). Die Disziplin wurzelte ursprünglich in der Suche nach einer effektiveren Luftabwehr gegen deutsche Bomberangriffe. Dazu brauchte es besser koordinierte Abwehrsysteme, um den Luftraum zu kontrollieren. Hierfür wurden (und werden) immer leistungsfähigere Computer und Netzwerke entwickelt.



Thomas Rid
MASCHINENDÄMMERUNG
Eine kurze Geschichte der Kybernetik
Aus dem Englischen von Michael Adrian
Propyläen, Berlin 2016
496 S., € 24,–

Thomas Rid, Professor für Security Studies am Londoner King's College, zeigt im vorliegenden Buch, dass es ohne Kybernetik nicht möglich gewesen wäre, die heutigen digitalen Welten zu entwickeln. Der Begriff »Cyber«, vom englischen »cybernetics«, stehe heute für alles Mögliche: Internet, Cyberkrieg, Hackerangriffe, Cybersex, Cyberraum, Cyberpunk und so weiter. Diese Vielschichtigkeit führt Rid auf die Ideengeschichte der Kybernetik vor dem Hintergrund gesellschaftlicher und technischer Erwartungen zurück.

Militärische Anwendungen, schreibt Rid, seien ein wesentlicher Teilaspekt der Kybernetik. Sie liefen auf eine immer stärker automatisierte und computergesteuerte Waffentechnik hinaus. Allerdings stieß das schon bald auf Vorbehalte. Suchte man während des Weltkriegs noch nach Möglichkeiten, die Luftabwehr zu verbessern, meldeten sich ab den 1950er Jahren kritische Stimmen zu Wort: Drohe künftig eine Kriegführung auf Knopfdruck? Werde der Mensch gegenüber den automatisierten Waffensystemen und einer automatisierten Industrieproduktion letztlich sogar überflüssig?

Die Mechanisierung von Organismen kam schnell als populäres Thema hinzu, wie der Autor darlegt. Maschinelle Antriebselemente lassen sich als Muskeln, elektrische Leitungen als Nerven, Sensoren als Sinnesorgane interpretieren. Schon Wiener hatte das getan. Die Implantierung von Technik in den menschlichen Körper ließ das Konzept des Cyborgs (»cybernetic organism«) entstehen. Diese Hybriden könnten gefährliche Aufgaben im Weltraum oder in der Tiefsee übernehmen, hieß es. Schon früh erkannten Experten die Möglichkeit, der Medizin neue Perspektiven zu eröffnen, indem man amputierte

Klaus Echle
und Joachim Wimmer
NATIONALPARK SCHWARZWALD
Knesebeck, München 2016
160 S., € 29,95

ÖKOLOGIE
100 QUADRATKILOMETER GESCHONTE NATUR

Eine Hommage an den Nationalpark Schwarzwald.

Die renommierten Tierfotografen Joachim Wimmer und Klaus Echle würdigen den 2014 gegründeten Nationalpark Schwarzwald. Auf mehr als 10 000 Hektar Fläche soll sich dort die Natur ohne menschliche Eingriffe entfalten. Der beeindruckende Bildband nimmt Interessierte mit auf eine Reise durch Flora und Fauna dieses Ökosystems. Neben schönen Aufnahmen, etwa von balzenden Auerhähnen und verträumten Waldlandschaften, liefern die Autoren etliche Informationen über tierische und pflanzliche Bewohner. Auch den geschichtlichen Hintergrund und die Entwicklung des Nationalparks beleuchten sie. Einige mahnende Worte zum Thema Naturschutz belegen ihr einschlägiges Engagement. »Nationalpark Schwarzwald« ist ein gelungenes Werk, das Lust auf einen Besuch dort macht und konkrete Ausflugstipps liefert. Sabrina Schröder

REZENSIONEN

Gliedmaßen durch bewegliche und fühlende Prothesen ersetzt. Für den Dschungelkrieg in Vietnam ließ das amerikanische Militär vierbeinige Exoskelette als Laufmaschinen entwickeln. Prototypen wie der Walking Truck sollten in unwegsamem Gelände Radfahrzeuge ersetzen; das Projekt wurde allerdings gestoppt und die Aufgabe Transporthubschraubern übertragen.

Ebenso zeigt Rid in seinem Buch, dass viele Esoteriker die Kybernetik in den 1950er Jahren für sich entdeckten. Dabei wurden sie von der Sciencefiction inspiriert. Zu ihren bekanntesten Vertretern zählt Lafayette Ronald Hubbard (1911–1986), der Begründer der Scientology-Sekte. Er interpretierte den menschlichen Geist als »Rechenmaschine«, die mit den »richtigen« Eingangsdaten gefüttert werden müsse. Aus falschem Input resultiere ein unnormales menschliches Verhalten, das sich aber mittels seiner (Hubbards) Methoden »therapieren« ließe. Wiener distanzierte sich von diesen Ansichten vehement und warnte vor Missbrauch und Gefahren, die daraus erwachsen könnten.

In den 1970er und 1980er Jahren, so Rid, wendete sich die Aufmerksamkeit dem virtuellen Raum im Innern von Computernetzwerken zu. Der Autor thematisiert Datenhandschuhe, -brillen und -anzüge, was bei Lesern, die diese Zeit selbst erlebt haben, Erinnerungen wecken dürfte. Damals begann die Jagd nach Rechnern und Netzwerken mit immer höherer Arbeitsleistung. Denn es zeichneten sich die enormen Möglichkeiten des Cyberspace ab, zum Beispiel für militärische Simulationen.

In den 1990er Jahren erblühte das Internet, was bei manchen Aktivisten die Hoffnung auf eine neue Ordnung ohne staatlichen Zugriff schürte. Sehr schnell rückte auch das Militärische wieder in den Fokus, wie aus dem Buch hervorgeht – denn es zeichnete sich immer deutlicher ab, dass Cyberwars zwischenstaatliche Konflikte entscheiden könnten, noch bevor überhaupt ein Schuss fällt. Das setzt allerdings voraus, per Hackerangriff die gegnerischen Computersysteme zu kapern und zugleich die Kontrolle über die eigenen zu behalten. Die neuen Netze erwiesen sich auf diese Weise als gefährliche Waffe, aber auch als enorme Schwachstelle.

Rid legt mit seinem Werk eine kenntnisreiche Geschichte der Kybernetik vor. Leider fokussiert er dabei zu stark auf den angloamerikanischen Raum. Auch fehlen weitergehende Einschätzungen der kybernetischen beziehungsweise Cyberentwicklung. Dennoch ist das Werk für technikhistorisch und technikvisionär interessierte Leser empfehlenswert. Denn der Autor zeigt, wie die Disziplin von ihren inneren Spannungen ebenso wie von äußeren Erwartungen und Ängsten vorangetrieben wurde. Seiner Meinung nach waren und sind die Visionen der Kybernetiker überspannt. Sowohl ihre utopischen als auch ihre dystopischen Vorstellungen seien stets am technisch Machbaren gescheitert.

Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.

Jeanine Daems, Ionica Smeets
MIT DEN MATHEMÄDELS DURCH DIE WELT
Aus dem Niederländischen von Matthias Löwe und Bettina Walden
Springer, Berlin, Heidelberg 2016
169 S., € 19,99

MATHEMATIK
AUS EINER KUGEL MACH ZWEI

Vom Blog zum Buch: Eine Reise durch mathematische Geschichten, Rätsel und Basteleien.

Wenn man sich auf eine bestimmte Krankheit testen lässt, und das Ergebnis fällt positiv aus, wie groß ist dann die Wahrscheinlichkeit, dass man die Krankheit tatsächlich hat? Angenommen, der Test sei zu 99 Prozent zuverlässig (vereinfachend gelte das sowohl für falsch positive als auch falsch negative Klassifikationen). Bedeutet ein positives Testergebnis dann, dass die Erkrankung fast sicher vorliegt? Nicht unbedingt. Wenn die Krankheit nämlich sehr selten ist, beispielsweise bei einem von 10 000 Menschen vorkommt, erklärt der Test zwar nur einen von 100 Kranken für gesund, aber eben auch einen von 100 Gesunden für krank. Ein positives Ergebnis besagt in diesem Fall, dass man mit einer Wahrscheinlichkeit von rund einem Prozent zu den Erkrankten gehört. Von 100 positiv getesteten Personen sind also 99 gesund.

Wer sind die »Mathemädels«, die uns dieses und viele weitere verblüffende mathematische Phänomene vorstellen? Angefangen haben sie 2006 als Studentinnen mit dem Blog www.wiskundemeisjes.nl, in dem sie vier Jahre lang beinah täglich ein interessantes Thema aus der Mathematik präsentierten. Daraus wurde erst eine 14-tägige Kolumne in der niederländischen Tageszeitung »de Volkskrant« und schließlich das vorliegende Buch. Inzwischen sind die Mädels groß geworden: Ionica Smeets unterrichtet heute Wissenschaftskommunikation an der Universität Leiden, Jeanine Daems arbeitet in der Lehrerausbildung an der Hogeschool Utrecht und lehrt Mathematikgeschichte an der Universität Utrecht.

Mit vielen anschaulichen Beispielen und gekonntem Stil gelingt es den Autorinnen, Mathematik interessant zu machen. Hinzu kommen zahlreiche spannende Rätsel und ausgefallene Basteltipps – etwa, wie sich aus drei Taschentüchern eine »Kleinsche Flasche« nähen lässt, bei der innen gleichzeitig außen ist und umgekehrt. Hinweise auf Bücher, Filme und Ausflugsziele sowie dramatische Geschichten runden das Buch ab – beispielsweise die traurige Begebenheit, als Archimedes nach dreijähriger Belagerung von Syrakus durch die Hand eines römischen Soldaten starb (»Störe meine Kreise nicht«).

Chilischoten kennzeichnen die etwas komplizierteren Abschnitte, so dass man diese leicht überspringen kann. Dazu zählt das Paradoxon von Banach und Tarski: Man kann eine Kugel, zum Beispiel eine Orange, in fünf Stücke zerlegen und diese zu zwei Kugeln der gleichen Größe zusammensetzen – vorausgesetzt, die Stücke besitzen so bizarre Formen, dass sich ihnen kein Volumen zuschreiben lässt. Leider sind manche Erklärungen unzureichend: Bei der Lektüre wird etwa nicht klar, warum Kontaktpersonen im Netz durchschnittlich mehr Freunde haben als man selbst (die Lösung: weil es bei stärkerer sozialer Vernetzung einer Person wahrscheinlicher ist, mit ihr befreundet zu sein).

Dennoch lohnt es sich, das Buch zu lesen – egal, ob mathematikbegeistert oder (noch) nicht.

Miriam Philipp hat ein Schülerpraktikum bei **Spektrum** absolviert.

Mehr Wissen auf
Spektrum.de
Mehr Rezensionen finden Sie unter
spektrum.de/rezensionen

KOLONISATION
BESIEDLUNG DES MARS

Stephen Petranek
UNSER LEBEN AUF DEM MARS
Aus dem Amerikanischen von Bettina Engels
S. Fischer, Frankfurt 2016
112 S., € 9,99

Könnten schon in naher Zukunft Menschen auf dem Mars leben? Ja, die ersten würden bereits 2027 auf unserem Nachbarplaneten landen, prognostiziert der Zukunftsforscher und Journalist Stephen Petranek. Die dabei notwendige Technik gebe es schon seit Langem. Petranek beschreibt, wie wir es schaffen können, auf dem Roten Planeten fast ohne Sauerstoff, so gut wie ohne Atmosphäre und bei antarktischen Temperaturen zu überleben. Es sei sogar möglich, den Mars mit »Terraforming« allmählich erdähnlicher zu machen. Im Mittelteil des Werks finden sich viele schöne Bilder. Der Autor schreibt interessant und gut, allerdings wirkt er streckenweise zu optimistisch. Miriam Philipp

DER NEUE BILDKALENDER
HIMMEL UND ERDE 2017

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

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

So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
sterne-und-weltraum.de/kalender
E-Mail: service@spektrum.de

LESERBRIEFE

PIONIERE DES UNTERWASSERKABELS

Die Materialwissenschaftlerin Ainissa Ramirez schilderte, wie vor 150 Jahren die erste transatlantische Nachrichtenverbindung die Gesellschaft nachhaltig veränderte. (»Ein Kabel quer durch den Ozean«, **Spektrum** Juli 2016, S. 80)

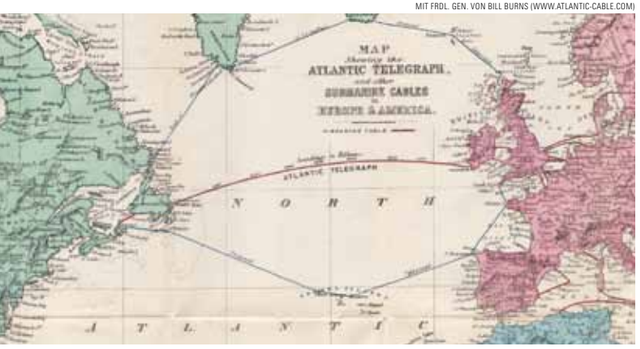
Friedrich Leymann, Oldenburg: Ich möchte einige ergänzende Anmerkungen zu dem Artikel machen:

1. Mit Guttapercha umpresste Kabel verwendete Werner von Siemens schon seit 1846; er gilt seit 1847 als ihr Erfinder. Nachzulesen in seinen »Lebenserinnerungen« (Julius von Springer, Berlin, 13. Auflage 1988, S. 81).

2. Dieselbe Quelle schildert, welche Erfahrungen von Siemens mit der Konstruktion und Verlegung von Unterwassertelegrafiekabeln bereits lange vor der im Artikel beschriebenen Atlantikverlegung machte und welche erfolgreichen Lösungen er fand und anwendete.

Ihrem Artikel ist leider nicht zu entnehmen, wie bei der dort erwähnten Kabelverlegung verfahren wurde. Ein Vergleich wäre interessant.

MIT FRDL. GEN. VON BILL BURNS (WWW.ATLANTIC-CABLE.COM)



Auf dieser Karte von 1865 sind mehrere, damals noch hypothetische Telegrafenkabel quer durch den Atlantik eingezeichnet.

GROSSE STREUBREITE ALS FEHLERQUELLE

Zwei Experimente zur Bestimmung der Lebensdauer von Neutronen kommen zu abweichenden Ergebnissen. Die Physiker Geoffrey L. Green und Peter Geltenbort diskutierten, wie sich die Diskrepanz erklären könnte. (»Das Neutronenrätsel«, **Spektrum** Juli 2016, S. 36)

Bruno Egli, Goldach (Schweiz): Dass die Messungen verschiedene Resultate liefern, ist offensichtlich auf die Verschiedenheit der Messmethoden zurückzuführen. Was zeigen die Messresultate wirklich? Im ersten Fall die Zerfallsrate freier, statischer Neutronen in einem begrenzten, feldfreien Raum; im zweiten Fall die Zerfallsrate von strömenden Neutronen in einem elektrischen Feld, eventuell auch in anderem Volumen. Bei der zweiten Methode sind die Randbedingungen also verschieden von denen im ersten Fall.

Meines Erachtens stellt sich daher zunächst die Frage: Wie verhalten sich die Neutronen in der »Flaschenfalle«, wenn dort gleichzeitig ein elektrisches Feld angelegt wird? Andererseits wäre auch die Anzahl der Protonen als gültiges Maß für die Zerfallsrate zu hinterfragen.

Abgesehen von einem etwaigen relativistischen Effekt (der erst bei einer Strahlgeschwindigkeit von 13,7 Prozent der Lichtgeschwindigkeit die Abweichung erklären würde) könnte die Bewegungsenergie aus dem Strahl einigen Protonen (ein Prozent würde genügen!) ermöglichen, die Austrittsbarriere der elektrischen Falle zu überwinden, und so das Resultat verfälschen.

Jedenfalls legen die Messresultate nahe, dass das Elektrofallen-Ergebnis auf Grund der großen Streubreite eher fehlerbehaftet ist. Interessant wären daher Messungen mit der elektromagnetischen Falle unter Variation der elektrischen Feldstärke oder der Strahlgeschwindigkeit oder des Messvolumens.

Sollten sich dabei Streubreite und Abstand des Resultats zum Flaschenfallenwert etwa proportional ändern, wäre wohl die Ursache für die Diskrepanz der Messresultate gefunden.

Leserbriefe sind willkommen!

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

ERRATUM

»Wie Lithiumakkus funktionieren«
Chemische Unterhaltungen, **Spektrum** Juli 2016, S. 76

In der rechten Spalte oben ist uns leider ein Fehler unterlaufen: Die Richtungspfeile für die Reaktion des Lithiums am Minuspol beim Laden und Entladen müssen vertauscht werden. Mehrere Leser haben uns darauf aufmerksam gemacht. Danke!

Richtig: Minuspol: $Li \underset{\text{laden}}{\overset{\text{entladen}}{\rightleftharpoons}} Li^+ + e^-$

unsplash / Anna Demianenko / CC0

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

www.SciViews.de

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Mit den besten Videos unserer nationalen und internationalen Medienpartner:

HZB Helmholtz Zentrum Berlin · LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS · universität innsbruck · nature · Alexander von Humboldt Stiftung/Foundation · arte FUTURE · dasgehirn.info Der Kosmos im Kopf

futur III

Alle Blumen brauchen Wasser …

… selbst wenn sie aus Kunststoff sind. **Eine Kurzgeschichte von Kelly Sandoval**

Jeden Dienstag gießt Susan die Blumen. Natürlich sind sie nicht echt. Lebende Blumen sind so eine Verschwendung, und Aaron mag nicht, wenn sie welken. Aber an sich mag er Blumen. Darum füllt Susan die Gießkanne und macht ihre Runde, wobei die Kanne am Ende genauso viel Wasser enthält wie am Beginn.

Wenn Aaron daheim ist, macht Susan dann Frühstück. Speck mit Ei für ihn, eine Tasse Tee für sie. Aber er ist nicht daheim, und die Eier sind ihr vor zwei Wochen ausgegangen. Sie werkelt in der Küche, öffnet und schließt Schubladen, trägt das Frühstücksgeschirr vom Schrank zum Geschirrspüler, als wäre es tatsächlich benutzt worden. Wenn sie fertig ist, sitzt sie am Tisch und starrt auf den leeren Platz gegenüber, auf dem Aaron nicht sitzt. Sie nickt, beugt sich vor, legt den Kopf zur Seite, als hörte sie zu. Dann lacht sie, aber nur leise. Aaron sagt immer, dass er ihr Lachen gernhat.

Die Frühstückszeit geht vorbei, und Susan zählt jede Millisekunde.

Es klingelt an der Tür.

Sie bleibt sitzen. Wer es auch sein mag, der Besuch gilt nicht ihr. Millisekunden verstreichen, dann ganze Sekunden. Eine Minute. Es klingelt noch einmal.

Susan will vermeiden, dass jemand vor Aarons Tür herumsteht und Aufsehen erregt.

»Ich komme!«, ruft sie. Sie prüft ihr Aussehen im Flurspiegel. Das Haar ist unfrisiert, aber das Kleid gebügelt und das Make-up frisch. Sie fährt sich mit den Fingern durchs Haar und gibt Acht, dass keine Strähne bricht. Haare sind nicht billig.

»Entschuldigen Sie«, sagt sie beim Öffnen der Tür. »Wir – ich war beim Frühstück.«

Die junge Frau auf der Schwelle ist 173 Zentimeter groß und wiegt ungefähr 77 Kilogramm. Ihre Aufmachung ist schrill, würde Aaron sagen. »Oh Gott«, murmelt die Frau und bedeckt den Mund mit einer Hand.

»Suchen Sie Aaron?«, fragt Susan. »Er ist leider verreist.«

»Nein«, stammelt die Frau. »Nein … das nicht. Sie sind Susan?«

»Ja.«

»Ich bin Michelle. Aarons Tochter.«

Jetzt erkennt Susan die Ähnlichkeit. Die Form der Lippen, die blaugraue Iris. Michelles Augen sind rot und verweint. Aaron würde Hilfe anbieten.

»Möchten Sie nicht hereinkommen?« Susan öffnet die Tür weit und führt Michelle zum Küchentisch. »Ich werde Tee machen.«

»Danke.« Michelle wirft ihr nervöse Seitenblicke zu. Sie knetet den Rand des Tischtuchs, und Susan nimmt sich vor, es später zu bügeln.

Sie stellt Teekanne, Tassen und Zucker auf den Tisch. »Ich fürchte, die Milch ist sauer geworden«, sagt sie beim Eingießen.

Michelle starrt in ihre Tasse. »Ist schon recht.«

»Stört Sie meine Anwesenheit?«, fragt Susan. »Ich könnte hinausgehen. Sie würden mich trotzdem hören.«

»Nein.« Michelle wirft ihr einen forschenden Blick zu. »Bleiben Sie. Tut mir leid. Sie … Sie sehen meiner Mutter sehr ähnlich.«

»Oh ja.« Susan kennt die Bilder. »Ihr Tod ging Aaron sehr nahe.«

»Und dann hat er Sie ins Haus geholt?« Susan weiß nicht, ob Michelles scharfer Ton Ärger oder Trauer ausdrückt.

»Eigentlich zum Putzen«, antwortet sie. »Kochen. Hausarbeit. Aber wir kamen uns näher. Er brauchte einen Gesprächspartner.«

»Und Sie?«

Susan zuckt die Achseln; die Geste hat sie sich von Aaron abgeschaut. »Ich gab mein Bestes. Mit der Zeit lernte ich, Konversation zu machen.«

Michelle schüttelt den Kopf. »Das ist nicht … aber lassen wir das. Wir müssen etwas besprechen.«

»Ich habe kein Geld«, sagt Susan. »Falls Sie Geld brauchen. Das müsste Aaron besorgen.«

Darüber kichert Michelle und reibt sich die nassen Augen mit dem Ärmel. »Geld ist nicht das Problem«, antwortet sie. »Das ist schon erledigt. Alles ist organisiert. Sogar Sie.«

»Ich verstehe nicht.« Susan findet es immer am besten, ihre Beschränktheit ehrlich einzugestehen.

»Papa ist nicht verreist«, erklärt Michelle. »Er wurde krank. Sehr krank. Aber nun ist alles überstanden. Er starb am Samstag.«

Susan spürt keine Trauer. Emotionen sind chemisch-physikalische Rückkopplungsschleifen. So nimmt Susan die Welt nicht wahr. Aber etwas geschieht, ein Stottern und Stolpern, wie eine Panne. Ihre gesamte Programmierung ist auf Aaron ausgerichtet.

»Nur keine Angst.« Michelle ergreift Susans Hand und drückt sie. »Es steht alles in seinem Testament. Streng genommen hat er Sie mir vermacht. Aber es braucht sich nichts zu ändern. Ich dachte nur, na ja, ich weiß nicht. Ich wollte nicht, dass Sie beunruhigt sind. Falls Sie sich Sorgen machen.«

Susan hat sich keine Sorgen gemacht. Sie kann jahrzehntelang sorglos existieren, bis ein irreparabler Defekt sie außer Gefecht setzt. »Werden Sie mich umprogrammieren lassen?«, fragt sie. Das wäre das Ende. Wer ist sie ohne ihr Programm? Sie ist gut gebaut. Bei guter Wartung könnte ihr Körper noch 100 Jahre durchhalten.

Michelle antwortet nicht sofort. »Würden Sie das wollen?«

»Ich weiß nicht.« Wollen hat für Susan normalerweise keine Bedeutung.

»Natürlich wollen Sie das nicht.« Michelle drückt wieder Susans Hand. Das tut sie oft. »Gut, denken Sie in Ruhe darüber nach. Ich werde nächste Woche wiederkommen, und wir reden weiter. Sie können bei mir wohnen, wenn Sie möchten.«

Beim Abschied umarmt Michelle Susan sogar und hinterlässt Tränenspuren auf Susans Kleid. Danach geht Susan mit der noch immer vollen Teetasse ins Wohnzimmer. Auf dem Tisch steht eine Blumenvase, ein elegantes Arrangement von Kunststofflilien. Aaron liebt diese Einfachheit.

Aaron ist tot.

Susan trägt die Vase in die Küche und wirft die Lilien weg. Wenn Michelle wiederkommt, um zu fragen, was Susan will, wird sie ihr eine Antwort geben können: Susan will einen Strauß von echten Stockrosen und Ringelblumen. Sie wird ihnen Sonnenlicht und Wasser geben, und sie werden ihr nichts zurückgeben als ihre Schönheit.

Und wenn sie welken, wird Susan sich eben etwas anderes ausdenken, was sie will.

»Werden Sie mich umprogrammieren lassen?«, fragt sie. Das wäre das Ende. Wer ist sie ohne ihr Programm?

DIE AUTORIN

Kelly Sandoval hat ihre Geschichten unter anderem in der Zeitschrift »Asimov's Science Fiction« publiziert und ist Mitherausgeberin des Onlinemagazins »Liminal Stories«. Ihre Homepage findet sich unter kellysandoval fiction.com.

©Nature Publishing Group; www.nature.com;
Nature 534, S. 584, 23. Juni 2016

Spektrum der Wissenschaft

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator 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 Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

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

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

Redaktionsassistenz: Barbara Kuhn

Assistenz des Chefredakteurs: Hanna Hillert

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg

Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Mike Beckers, Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Luise Loges, Dr. Ursula Loos.

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 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A)/ € 8,50 (L)/ sFr. 14,–; im Abonnement € 89,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,– im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,– ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Sektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Gesamtbereichsleitung: Michael Zehntmaier, Tel. 040 3280-310, Fax 0211 887 97-8550; Anzeigenleitung: Anja Väterlein, Speersort 1, 20095 Hamburg, Tel. 040 3280-189

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 37 vom 1.1. 2016.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche 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. Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe,
Executive Vice President: Michael Florek

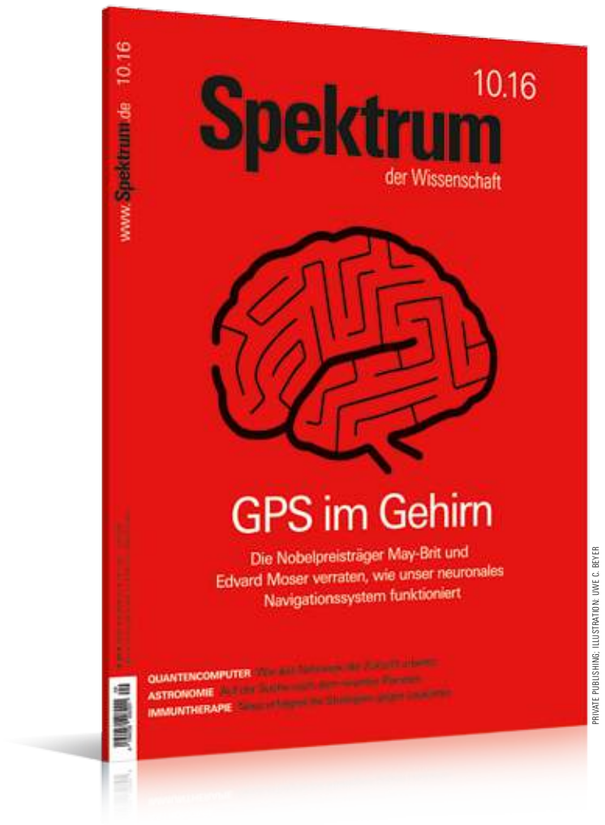
Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

Das Oktoberheft ist ab 24. 9. 2016 im Handel.

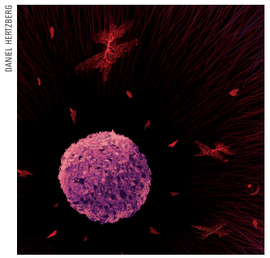
VORSCHAU

DAS GPS IN UNSEREM KOPF

Wie finden wir den Weg von A nach B? Das Forscherehepaar May-Brit und Edvard I. Moser, Nobelpreisträger des Jahres 2014, erläutert exklusiv in **Spektrum**, wie unser neuronales Navigationssystem arbeitet.



PRIVATE PUBLISHING; ILLUSTRATION: UWE C. BEYER



DANIEL HERZBERG

IMMUNTHERAPIE GEGEN KREBS

In letzter Zeit konnten Mediziner spektakuläre Behandlungserfolge etwa bei Leukämie erzielen, indem sie das körpereigene Abwehrsystem auf die Tumoren hetzten. Allerdings drohen ohne sorgfältig abgestimmtes Vorgehen schwere Nebenwirkungen.

RON MILLER

GESUCHT: PLANET X

Am Rand des Sonnensystems – im Kuipergürtel – tummeln sich zahlreiche Kleinkörper. Manche von ihnen tanzen auf ihrer Bahn aus der Reihe. Dies deuten Astronomen als einen Hinweis auf die Existenz eines noch unbekannten Planeten.

JAMES GURNEY

AUFSTIEG DER SÄUGETIERE

Zwar führten die frühen Säuger nur ein Schattendasein neben den Dinosauriern. Doch schon damals zeichneten sie sich durch ihre erstaunliche Anpassungsfähigkeit an die verschiedensten Lebensbedingungen aus – ein Kennzeichen auch ihrer modernen Nachfahren.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren jedes neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Verpassen Sie keine Ausgabe!

JAHRES- ODER GESCHENKABO

Ersparnis:
12 x im Jahr Spektrum der Wissenschaft für nur € 89,– (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10 % günstiger als der Normalpreis.

WunschGeschenk:
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.

Keine Mindestlaufzeit:
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.

Auch als Kombiabo:
Privatpersonen erhalten für einen Aufpreis von nur € 6,–/Jahr Zugriff auf die digitale Ausgabe des Magazins im PDF-Format.

Füllhalter »pur« von Lamy:
Der elegante Füllhalter »pur« aus dem Hause Lamy mit Stahlfeder und Etui ist garantiert auch auf Ihrem Schreibtisch ein Blickfang.

Buch »Die verborgene Wirklichkeit«
Brian Greene zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind.

Wählen Sie Ihr Geschenk

Bestellen Sie jetzt Ihr Abonnement!

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

Der Hintergrund

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

Das Projekt

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

Unser Ziel

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

Die Partner

Robert Bosch Stiftung

Spektrum der Wissenschaft

nature

Sie wollen mehr erfahren?

www.academia-net.de