

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

GRIPPEVIREN
Ein mathematisches Modell
lüftet ihr
Geheimnis

DEZEMBER 2015

GLUONEN

Der Klebstoff, der
die Welt zusammenhält

BÄUME

Wie wir Wälder für den
Klimawandel wappnen

RELATIVITÄT

Den Gravitationswellen
auf der Spur

Der Ursprung der **MYTHEN**

Am Anfang der Menschheitsgeschichte
stehen drei Erzählungen

12/15 Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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



THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT: **Spektrum KOMPAKT**

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

€ 4,99
je Ausgabe



Diese und weitere Kompaktausgaben erhalten Sie unter:
www.spektrum.de/kompakt

QR-Code per
Smartphone
scannen!





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Mythen – damals und heute

Mythen sind Erzählungen, mit denen Menschen die Welt sowie ihre eigene Stellung in ihr zu erklären versuchen und in einen größeren Zusammenhang einbetten. Dabei bedienen sie sich in der Regel übernatürlicher Elemente, beschreiben Dinge, die über die alltägliche Erfahrung hinausgehen und für die sich oft gar keine Worte finden lassen. Vermutlich gibt es Mythen, seit der Mensch anfing, über Grundbedürfnisse wie Essen, Sex und Selbstbehauptung hinauszudenken – frühe Hinweise darauf liefern schon Neandertalergräber.

Entsprechend interessieren sich auch Forscher bereits seit Längerem für das Thema. Zu ihnen gehört der französische Ethnologe Claude Lévi-Strauss (1908–2009), der Grundmuster und elementare Bausteine (»Mytheme«) identifizierte und den Zusammenhang mit Kultur und Denken herausarbeitete. Anders ging der Amerikaner Joseph Campbell (1904–1987) vor. Seine vergleichende Mythenforschung suchte nach Universalien, wobei er tiefenpsychologische Aspekte berücksichtigte. Bekannt wurde er durch seine detaillierte Erkundung des Mythentyps der Heldenreise, nach dem inzwischen fast jeder Hollywood-Blockbuster funktioniert, allen voran »Star Wars« von George Lucas, der sich ausdrücklich auf Campbell berief.

Neben den Heldengeschichten von der »Odyssee« bis zum »Herrn der Ringe« gibt es aber noch ganz andere Typen, die weniger eine spannende Story erzählen als vielmehr Situationen darstellen, die ein Licht auf das Verhältnis des Menschen zu seiner Umwelt werfen. Dazu gehören Welterschaffungsmythen, Gründungslegenden wie jene der Stadt Rom sowie Auseinandersetzungen mit den Grenzen und der Fehlbarkeit des Menschen – etwa die griechischen Sagen von Ikarus oder Prometheus, aber auch viele biblische Überlieferungen.

Da Mythen die längste Zeit mündlich weitergegeben wurden, veränderten sie sich naturgemäß immer wieder und passten sich dabei an neue Umstände an. Diese zeitliche Entwicklung stand bislang kaum im Fokus der Aufmerksamkeit von Forschern. Jetzt hat sich der junge französische Anthropologe Julien d’Huy vom Centre d’études des mondes africains in Paris eingehend damit beschäftigt (S. 66). Dazu nutzte er modernste Computeralgorithmen ähnlich jenen, mit denen Genetiker evolutionäre Stammbäume von Organismen konstruieren. So gelang es d’Huy, exemplarisch drei Mythenfamilien auf ihre Urformen zurückzuführen. Gleichzeitig geben seine Forschungen Aufschluss über die Wanderungsbewegungen der Menschen in der Steinzeit.

Kein Mythos ist leider die alljährlich wiederkehrende Grippewelle, die auch jetzt wieder auf uns zurollt. Warum ältere Menschen ebenso wie Kinder eine bessere Widerstandskraft gegenüber den auslösenden Viren haben als jüngere Erwachsene, erklärt der Epidemiologe Adam J. Kucharski ab S. 32. Außerdem stellt unser Artikel aktuelle Forschungen zur Entwicklung eines Universalimpfstoffs vor, der die jährliche Spritze überflüssig machen könnte.

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Dale W. Laird (links), **Paul D. Lampe** (Mitte) und **Ross G. Johnson** berichten ab S. 24 über ihre langjährige Erforschung der »Gap Junctions«, die ein aufwändiges Kommunikationssystem der Zellen in unserem Körper bilden.



Eine Immunisierung gegenüber Grippeerregern kann dazu führen, dass der Körper auf nachfolgende Infektionen nicht mehr so effektiv reagiert. Dieses verblüffende Phänomen untersucht der Epidemiologe **Adam J. Kucharski** mit Hilfe mathematischer Modelle (S. 32).



Die Teilchenphysiker **Rolf Eitel** (links), **Thomas Ullrich** (Mitte) und **Raju Venugopalan** beschreiben ab S. 58, warum wir über die Gluonen noch immer so wenig wissen – und wie sich das ändern soll.

3 Editorial

6 Spektrogramm

Frühes Säugetier mit Stachelfell • Ver-
eisungsschutz für Oberflächen • Glet-
scherspalten auf Saturnmond • Schlaf
bei Naturvölkern • Künstlicher Tast-
sinn • Neutronenwirbel in Pulsaren

9 Bild des Monats

In Pollen getränkt

10 Forschung aktuell: Die Nobelpreise

Nobelpreis für Chemie

Mechanismen zur Repara-
tur fehlerhafter DNA

Nobelpreis für Physik

Neutrinos sind überra-
schend wandelbar

Nobelpreis für Medizin

Durchschlagende Waffen
gegen Parasiten

Nobelpreis für

Wirtschaftswissenschaften

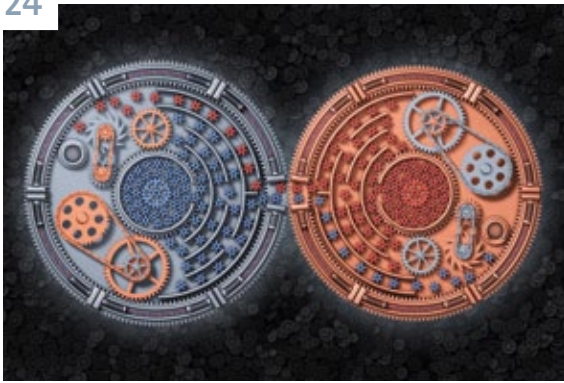
Konsumverhalten,
Lebensplanung und
Armutsbekämpfung

SPRINGER'S EINWÜRFE

**Muss Verhütung Frauen-
sache bleiben?**

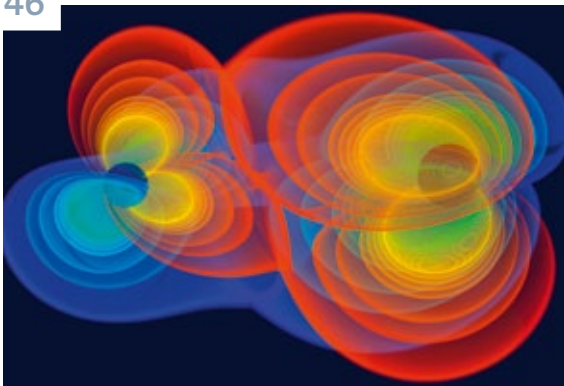
Konkrete Hoffnung auf
die Pille für den Mann

24



PETER KRAEMER

46



NUMERISCHE SIMULATION: C. REISSWIG (AEI), L. REZZOLLA (AEI/ITP); WISSENSCHAFTL. VISUALISIERUNG: M. KÖPPIZ (AEI/ZIB)

56



H. JOACHIM SCHLICHTING

BIOLOGIE & MEDIZIN

24 **Wie Zellen sich unterhalten**

Gap Junctions erlauben es den Bausteinen unseres Kör-
pers, untereinander Informationen auszutauschen – über
aufwändige Kanalsysteme.

Dale W. Laird, Paul D. Lampe und Ross G. Johnson

▶ 32 **Der blinde Fleck der Immunabwehr**

Eine überstandene Grippeinfektion schützt nicht unbe-
dingt vor ein wenig veränderten Erregern. Warum das so
ist, erklärt die »Antigenerbsünde«.

Adam J. Kucharski

40 **Köstliche Früchte ohne Gentechnik**

Der Geschmack von Obst und Gemüse geht beim Züchten
oft verloren. Jetzt gibt es molekulare Methoden, das Aroma
zurückzugewinnen.

Ferris Jabr

PHYSIK & ASTRONOMIE

SERIE »100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE« TEIL 3

▶ 46 **Warten auf die Welle**

Vor 100 Jahren sagte Albert Einstein Gravitationswellen
vorher. Mit neuen Detektoren hoffen Physiker die Schwin-
gungen der Raumzeit endlich direkt nachzuweisen.

Felicitas Mokler

SCHLICHTING!

56 **Kunst unter der Eisdecke**

Gefrierende Wasserflächen formen oft seltsame Strukturen.

H. Joachim Schlichting

▶ 58 **Der Klebstoff der Welt**

Gluonen halten die Materiebausteine zusammen. Aber
noch ist vieles an diesen Teilchen rätselhaft, denn sie sind
in Experimenten kaum fassbar.

Rolf Ent, Thomas Ullrich und Raju Venugopalan



► TITELTHEMA

ANTHROPOLOGIE

66 Die Urahn der großen Mythen

Julien d'Huy

Mit den Algorithmen der Genetiker verfolgen Anthropologen und Ethnologen die Evolution von Mythenfamilien wie zum Beispiel der »Polyphem«-Überlieferung zurück bis in vorgeschichtliche Zeit – und rekonstruieren sogar deren Urformen.

74



TJ WATT (TJWATT.COM)

86



MICHAEL TYKA ET AL., GOOGLE INC. / CC-BY-4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE). USING NETWORK TRAINED ON PLACES BY MIT COMPUTER SCIENCE AND AI LABORATORY. GOOGLERESEARCH.BLOGSPOT.DE/2015/06/INCEPTIONISM-GOING-DEEPER-INTO-NEURAL.HTML

ERDE & UMWELT

► 74 Dem Wandel gewachsen

Damit Kanadas Wälder fit für die Erderwärmung werden, sollen aus südlicheren Regionen eingeführte Bäume ihre Gene für Hitzetoleranz darin verbreiten.

Hillary Rosner

TECHNIK & COMPUTER

80 Die Synthesemaschine

Ein Automat, der selbsttätig kleine organische Moleküle zusammenbaut, befreit Chemiker von lästiger Routinearbeit.

Robert F. Service

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

86 Computer-Halluzinationen

Neuronale Netze erzeugen Bilder, in die sie Versatzstücke aus ihrer eigenen Erfahrung hineinfantasieren.

Brian Hayes

93 Wissenschaft im Rückblick

Vom Bruststimmen-Mikrofon zum Moor-Camembert

94 Rezensionen

Luc Jacquet: Zwischen Himmel und Eis • *Rudolf Taschner: Die Mathematik des Daseins* • *Tim Birkhead: Die Sinne der Vögel* • *Hans Biesalski: Mikronährstoffe als Motor der Evolution u. a.*

102 Leserbrief/Impressum

104 Futur III

Tian Li: Schlechte Einschaltquoten für Kleopatra

106 Vorschau

Titelmotiv: Bridgeman Images / 2015 Museum of Fine Arts, Boston (Museum purchase with funds donated in honor of Edward W. Forbes) / Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft, Anke Heinzlmann
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

PALÄONTOLOGIE

Frühes Säugetier mit Stachelfell

Außergewöhnlich gut erhaltene Überreste eines frühen Säugetiers erlauben einen neuen, detaillierten Blick in die Vergangenheit. Die versteinerten Knochen- und Gewebereste stammen von einem Kleinsäuger, der vor 125 Millionen Jahren in der Kreidezeit lebte, also zur Zeit der Dinosaurier. Sogar Teile der Haut und des Haarkleids haben die Jahrmillionen überstanden.

Paläontologen um Thomas Martin von der Universität Bonn haben die Überreste in der Fossilagerstätte Las Hoyas in Spanien entdeckt. Laut ihren Untersuchungen trug das etwa ratten-große Tier kleine Stacheln auf dem Rücken, vergleichbar vielleicht den Borstenhaaren heutiger Stachelmäuse. Diesem Merkmal verdankt es seinen Namen *Spinolestes xenarthrosus* (von lateinisch: spinosus = stachelig). Einige Fellreste zeigen dunkle, verkürzte

Haarschäfte, was die Forscher als Symptom einer Pilzinfektion interpretieren. Das Tier litt demnach an einer Fellerkrankung. Schon frühere Studien hatten ergeben, dass solche Infektionen bei heute ausgestorbenen Säugern verbreitet waren.

Spinolestes xenarthrosus lässt sich den Eutriconodonta zuordnen, einer Säugetiergruppe, die im Erdmittelalter lebte und in der Oberkreide ausstarb. Skelett- und Zahnmerkmale deuten darauf hin, dass das Wesen am Boden lebte und möglicherweise graben konnte. Insgesamt, schreiben die Forscher, verfügte das Tier schon über zahlreiche typische Säugereigenschaften.

Grafische Rekonstruktion eines *Spinolestes xenarthrosus*. Forscher haben von diesem kreidezeitlichen Säugetier außerordentlich gut erhaltene Überreste gefunden.

ten wie Haarkleid, Mähne und Ohrmuscheln.

Nature 526, S. 380–384, 2015



ILLUSTRATION: OSCAR SAINSDORO, MIT GENEHMIGUNG DER NATURE PUBLISHING GROUP



Mehr Aktualität!

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

PHYSIK

Schutz vor Vereisung

Auf Oberflächen, die sowohl Wasser anziehende (hydrophile) als auch Wasser abstoßende (hydrophobe) Regionen besitzen, entsteht Eis langsamer. Forscher um Amy Betz von der Kansas State University kehrten von dem üblichen Ansatz ab, die Eisbildung mit komplett hydrophoben Materialien behindern zu wollen. Stattdessen untersuchten sie auf verschiedenen Oberflächen, bei welcher Temperatur binnen dreier Stunden die Vereisung einsetzt.

Auf einem rein hydrophilen Stoff erstarrt das Wasser bei knapp unter null Grad Celsius. Bei hydrophoben Flächen dagegen sinkt der Gefrierpunkt um etwa ein Grad, da die Tropfen schlecht daran haften. Mischbeschichtungen schnitten noch deutlich besser ab – sie erniedrigten den Gefrierpunkt um mehrere Grad. Die

Erklärung der Forscher hierfür: Es bilden sich zwar in beiden Bereichen kleine Wasserkugeln, diese verschmelzen aber an den Grenzen miteinander und werden in den hydrophilen Regionen eingeschlossen. Die kombinierten Tropfen sind größer und müssen mehr Wärme abgeben, um zu erstarren. Zudem ist ihre Gesamtoberfläche kleiner als die der Vorgängertropfen. Dadurch wird Energie aus Oberflächen-spannung frei, was den Gefrierprozess weiter verlangsamt.

Den Wissenschaftlern zufolge hängt die Größe des Effekts davon ab, wie die hydrophilen und hydrophoben Regionen angeordnet sind. Basierend auf diesem Prinzip lassen sich möglicherweise Flugzeugflügel, Kühlschränke oder Klimaanlage entwickeln, die kaum vereisen.

Appl. Phys. Lett. 107, 141602, 2015

Gletscherspalten auf Saturnmond

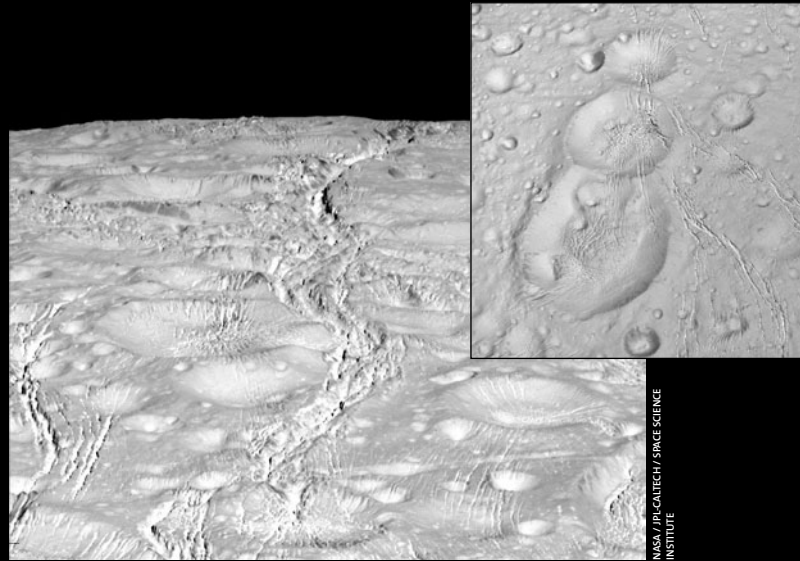
Die NASA hat erste Nahaufnahmen vom Saturnmond Enceladus präsentiert, gesendet von der Sonde Cassini. Die Bilder entstanden, während die Sonde mehrmals an dem Himmelskörper vorbeiflog. Aufgabe von Cassini ist es unter anderem, mehr über die geologische Aktivität des Monds herauszufinden.

Enceladus besitzt eine dünne Atmosphäre, Fontänen spuckende Geysire und unter seinem Wassereispanzer vermutlich einen salzigen Ozean. Wegen der Nähe zu Saturn und dessen anderen Trabanten wirken Gezeitenkräfte auf den Mond, die ihn erwärmen und seine Geysire antreiben. Auf den neuen Aufnahmen sieht man zahlreiche Krater, wie schon auf den Bildern der Voyager-Sonden, die Anfang der 1980er Jahre entstanden. Weil die Auflösung aber heute höher ist als damals, sind jetzt auch dünne Grate zu erkennen, die die Krater trennen, sowie Spalten und Gräben. Die Forscher nehmen an, dass Letztere durch unterirdische Eisbewegungen entstehen, ähnlich den Gletscherspalten auf der Erde. Für Aufsehen sorgte das Foto dreier Krater, die in ihrer Anordnung an einen Schneemann erinnern.

Bei weiteren Vorbeiflügen soll sich die Sonde bis auf 50 Kilometer dem Südpol nähern, der aktivsten Region des Monds. Dabei soll sie weitere Informationen über den

Ozean und die Geysire sammeln. Wissenschaftler wollen so herausfinden, ob Enceladus Leben beherbergen kann.

Pressemitteilung der NASA, 15. 10. 2015



Enceladus' Nordpolregion ist von Spalten und Kratern geprägt. Eine Kraterstruktur ähnelt einem Schneemann (kleines Bild).

Ausgeschlafene Naturvölker

Verhaltensforscher um Jerry Siegel von der University of Los Angeles beschäftigen sich mit den Schlafgewohnheiten von Naturvölkern, die traditionell als Jäger und Sammler leben – und gewinnen dabei zum Teil überraschende Erkenntnisse. Abgesehen von kleinen Feuerstellen haben die Indigenen kein künstliches Licht, das als wichtiger Verursacher von Schlafproblemen gilt. Und tatsächlich sind ihnen Schlafstörungen so fremd, dass sie keinen Begriff dafür kennen.

Trotzdem schlummern die Jäger und Sammler weniger als viele Wohlstandsmenschen: durchschnittlich 7,1 Stunden, in Hitzeperioden sogar nur 5,7. Ihr Schlafrhythmus hängt weniger vom Licht als von der Umgebungstemperatur ab. Sie legen sich zur Ruhe, wenn es spürbar kälter wird – im

Schnitt 3,3 Stunden nach Sonnenuntergang, bei Hitze fast eine Stunde später als an kühlen Abenden. Weitgehend unveränderlich ist dagegen der Zeitpunkt, an dem sie aufwachen: kurz vor Morgengrauen. Lediglich die San im Süden Namibias, wo es ausgeprägte Jahreszeiten gibt, verschlafen im Sommer die frühen Morgenstunden. Die beiden anderen Ethnien, die Hadza (Tansania) und die Tsimane (Bolivien), leben nah am Äquator, wo die Tageslänge übers Jahr kaum schwankt.

Insgesamt beobachtete das Team 94 Probanden durchschnittlich je zwölf Tage lang. Da deren Schlafmuster kaum voneinander abwichen, obwohl die Indigenen in sehr verschiedenen Umgebungen leben, spielen Umwelteinflüsse offenbar nur eine geringe Rolle für das Schlafverhalten. Womög-

ISTOCK / GETTY IMAGES / DAN KITWOOD



Die San sind im südlichen Afrika beheimatet und waren ursprünglich Jäger und Sammler. Einige leben noch heute so.

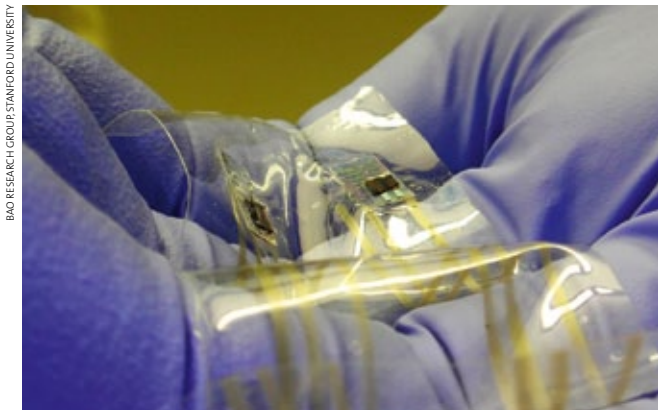
lich kann die Kombination von wenig Licht und niedriger Temperatur auch Wohlstandsmenschen zu einem besseren Schlummer verhelfen. Statistiken zufolge leiden in Deutschland etwa 25 Prozent der erwerbstätigen Bevölkerung an chronischen Schlafstörungen.

Curr. Biol. 25, S. 1–7, 2015

PROTHETIK

Künstlicher Tastsinn

Wissenschaftler um Zhenan Bao von der Stanford University haben eine weiche Folie entwickelt, die bei mechanischem Druck ähnliche Signale erzeugt wie die Tastrezeptoren der menschlichen Haut. Damit lassen sich Hirnneurone direkt stimulieren. Gestützt auf diese Methode ist es vielleicht möglich, Prothesen zu entwickeln, die ihren Trägern bei Berührung eine sensorische Rückmeldung geben. An solchen »führenden Prothesen« besteht großer Bedarf, sie sind bislang technisch aber kaum realisierbar.



BAO RESEARCH GROUP/STANFORD UNIVERSITY

Dehnbare Folien, bedruckt mit organischen Schaltkreisen, können unseren Tastsinn imitieren.

Bestimmte Rezeptoren in der Haut, so genannte Merkel-Zellen, übersetzen Druckeinwirkungen in elektrische Impulse, deren Frequenz von der Druckstärke abhängt. Die Impulse laufen über Nervenbahnen ins Gehirn. Um jenes System nachzuahmen, versehen die Forscher eine Folie mit einem feinen Netz aus Schaltkreisen organischen Materials. Diese produzieren periodische Spannungsspitzen, die denen der natürlichen Rezeptoren ähneln. Um die Frequenz der Spannungsspitzen zu regulieren, setzen die Wissenschaftler piezoresistive Elemente ein, also solche, die ihren elektrischen Widerstand druckabhängig verändern. Mit zunehmendem Druck auf die Folie steigt die elektrische Spannung in den Schaltkreisen – und mit ihr die Frequenz des Ausgangssignals, was dem Verhalten der Merkel-Zellen entspricht.

Die so erzeugten Impulse leitete das Team über feine Drähte direkt in Gewebe aus dem somatosensorischen Kortex von Mäusen. In dieser Hirnregion liegen Neurone, die beim lebenden Tier den Tastsinn repräsentieren. Stimuliert von den künstlichen Spannungsspitzen, zeigten sie natürliche Aktivitätsmuster. In einem weiteren Experiment brachte das Team die Impulse über Lichtblitze ins Hirngewebe ein, ermöglicht durch eine optogenetische Manipulation der Gehirnzellen. Insbesondere die zweite Methode habe sehr gute Ergebnisse geliefert, so die Forscher.

Science 350, S. 313–316, 2015

ASTRONOMIE

Neutronenwirbel in Pulsaren

Pulsare sind rotierende Neutronensterne mit 10 bis 20 Kilometer Durchmesser, die Synchrotronstrahlung aussenden. Sie entstehen, wenn ein massereicher Stern als Supernova explodiert und sein Kern dabei zu einem extrem dichten Objekt kollabiert. In der Regel rotieren Pulsare schnell und äußerst regelmäßig. Manchmal jedoch beschleunigen sie ihre Drehbewegung kurz und bremsen dann langsam wieder ab. Diese so genannten Glitches sind eigentlich wegen der Energie- und Impulserhaltung unmöglich: Ein rotierendes Objekt sollte ohne Fremdeinwirkung nur langsamer, aber nicht schneller werden.

Astronomen um Wynn Ho von der University of Southampton können die Beobachtung nun erklären. Sie

postulieren, dass nicht nur in der inneren Kruste, wie bisher angenommen, sondern auch im Kern eines Neutronensterns suprafluide, also widerstandsfrei fließende Neutronen existieren. Dort bilden sich stabile Wirbel, die Rotationsenergie speichern. Verlangsamt der Neutronenstern seine

FOTOUIA / PITRIS (M)



Künstlerische Darstellung eines Pulsars. Mit ihrer hohen Massendichte verzerren diese Neutronensterne die Raumzeit stark.

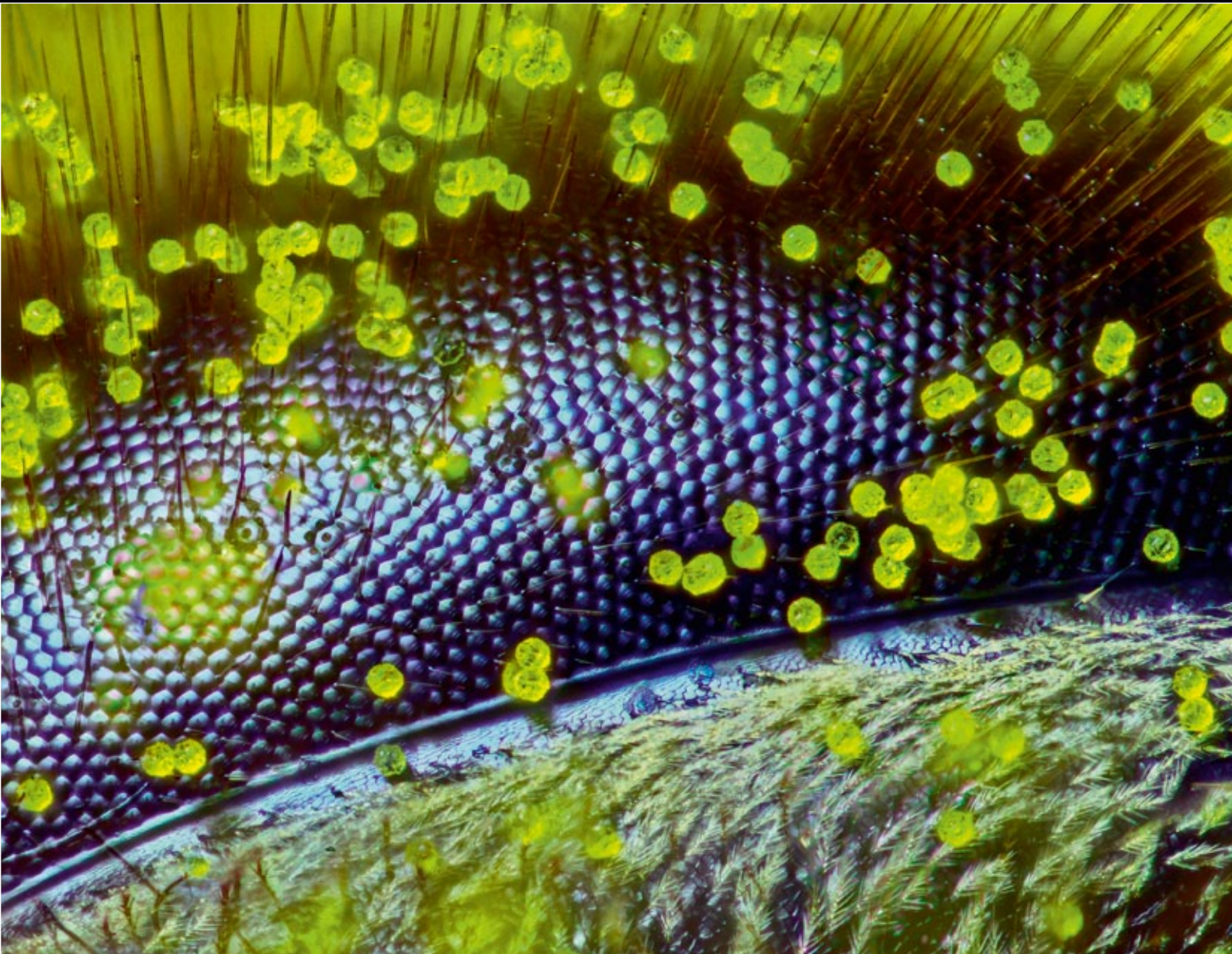
Drehung, so rotiert der suprafluide Bereich zeitweise schneller als die äußere Schale. Ab einem bestimmten Geschwindigkeitsunterschied lösen sich die Wirbel auf und geben Energie ab, was die Rotation der Kruste beschleunigt. Laut den Forschern stimmen die Vorhersagen dieses Modells gut mit den verfügbaren astronomischen Messungen überein.

Daraus leiten die Wissenschaftler zudem einen Zusammenhang zwischen Temperatur, Masse, Radius und Rotationsgeschwindigkeit von Pulsaren ab, anhand dessen sich die Masse solcher Objekte bestimmen lässt. Anders als bei bisherigen Methoden funktioniert das sogar bei Neutronensternen, die sich ohne Partner durchs All bewegen.

Sci. Adv. 1, e1500578, 2015

IN POLLEN GETRÄNKT

Beim jährlichen »Nikon Small World«-Wettbewerb zeichnet der japanische Hersteller von Präzisionsoptik besonders gelungene Mikroskopaufnahmen aus. Das Siegerbild 2015 zeigt die Facetten eines Bieneauges inmitten zahlreicher Löwenzahnpollen. Der australische Lehrer Ralph Claus Grimm verwendete dazu ein Lichtmikroskop mit 120-facher Vergrößerung. Er hat früher selbst Bienen gezüchtet und möchte mit dieser ungewöhnlichen Perspektive auch den Wert der Tiere für die Bestäubung in den Fokus rücken.

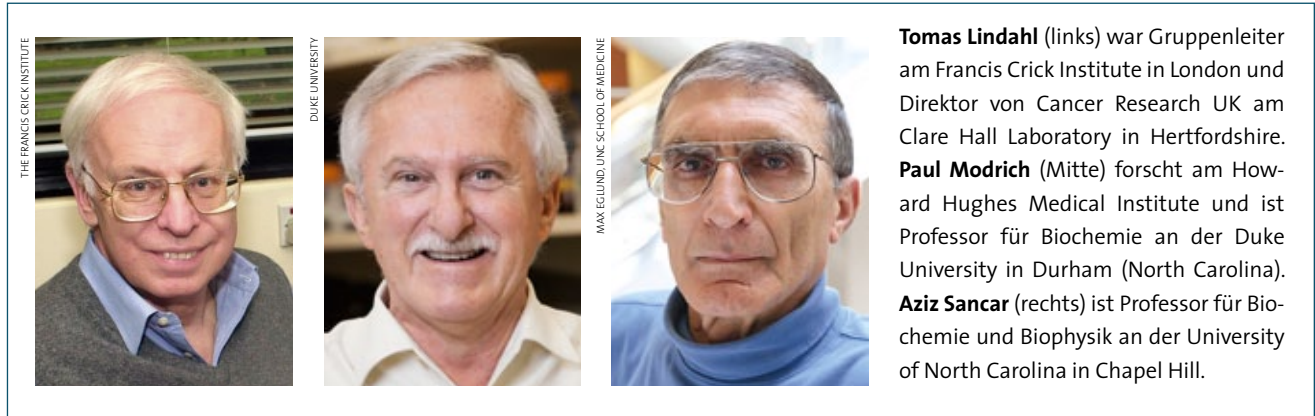


NOBELPREIS FÜR CHEMIE

DNA-Reparatur gegen Krebs und Altern

Tomas Lindahl, Paul Modrich und Aziz Sancar ergründeten, wie die Zelle Schäden im Erbgut ausbessert. Für ihre bahnbrechenden Erkenntnisse erhielten sie nun den Chemienobelpreis.

VON LARS FISCHER



Tomas Lindahl (links) war Gruppenleiter am Francis Crick Institute in London und Direktor von Cancer Research UK am Clare Hall Laboratory in Hertfordshire. **Paul Modrich** (Mitte) forscht am Howard Hughes Medical Institute und ist Professor für Biochemie an der Duke University in Durham (North Carolina). **Aziz Sancar** (rechts) ist Professor für Biochemie und Biophysik an der University of North Carolina in Chapel Hill.

Das Erbgut kann einiges wegstecken. Es erfüllt seine Aufgabe zuverlässig über Jahrzehnte und Dutzende von Zellteilungen, wie das dauerhafte Funktionieren unserer unzähligen Körperzellen belegt. Selbst über hunderte und tausende Generationen bleiben die informationstragenden Basenfolgen intakt, obwohl sie jeden Tag unzählige chemische und physikalische Angriffe erleiden und selbst kleine Mutationen

im schlimmsten Fall einen Totalschaden verursachen.

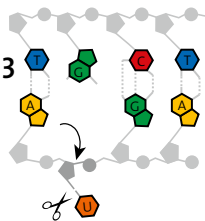
Was macht das Erbgut so robust? Einen Teil der Antwort fanden in den 1970er und 1980er Jahren Aziz Sancar, Tomas Lindahl und Paul Modrich, wofür sie nun den Chemienobelpreis erhielten. Die drei Forscher entschlüsselten damals mehrere Mechanismen, mit denen Zellen Fehler in ihrem Erbgut finden und beheben. »Die Fähigkeit,

solche Schäden zu reparieren, sorgt dafür, dass unser Genom stabil bleibt«, erklärt die Molekularbiologin Anna Müllner vom Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg. Das sei auch deshalb wichtig, weil DNA-Defekte uns schneller altern lassen und Krebs fördern. Tatsächlich sind in manchen Tumorzellen einige Reparaturmechanismen außer Kraft gesetzt.

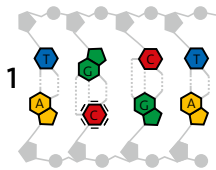
Lange bevor der Träger der Erbinformation bekannt war, wusste man bereits: Röntgenstrahlen und vergleichbare Einflüsse können Zellen auf mysteriöse Weise töten oder dauerhaft verändern. Als Grund stellte sich in den 1940er Jahren heraus, dass sie Schäden an der inzwischen als Erb molekül identifizierten DNA verursachen.

Eine zweite Beobachtung aus jener Zeit führte die Forscher auf die Spur der DNA-Reparatur: Zellen überlebten eine an sich tödliche Dosis Röntgenstrahlung, falls sie direkt danach in blauem Licht badeten. Und wenn sie durch UV-Strahlung die Fähigkeit eingebüßt hatten, zu wachsen und sich zu teilen, verhalf ihnen die gleiche Behandlung zu neuer Vitalität. Als verantwortlich für die überraschenden Heilkräfte des Blaulichts erwies sich ein Enzym namens Photolyase.

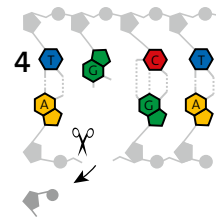
Bei der von Tomas Lindahl entdeckten Basenexzisionsreparatur entfernen Enzyme einzelne falsche Basen aus dem DNA-Molekül und ersetzen sie durch korrekte. Das ist zum Beispiel nötig, wenn sich Cytosin durch Desaminierung in Uracil verwandelt hat.



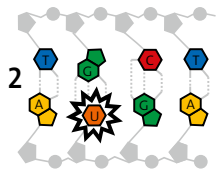
Das Enzym Glycosylase entdeckt den Fehler und schneidet das Uracil heraus.



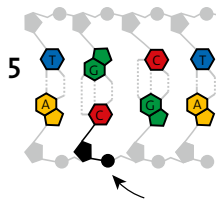
1 Cytosin verliert leicht eine Aminogruppe und verwandelt sich dabei in die Base Uracil.



4 Weitere Enzyme entfernen den Rest des Nucleotids aus dem DNA-Strang.



2 Uracil kann kein Basenpaar mit Guanin mehr bilden.



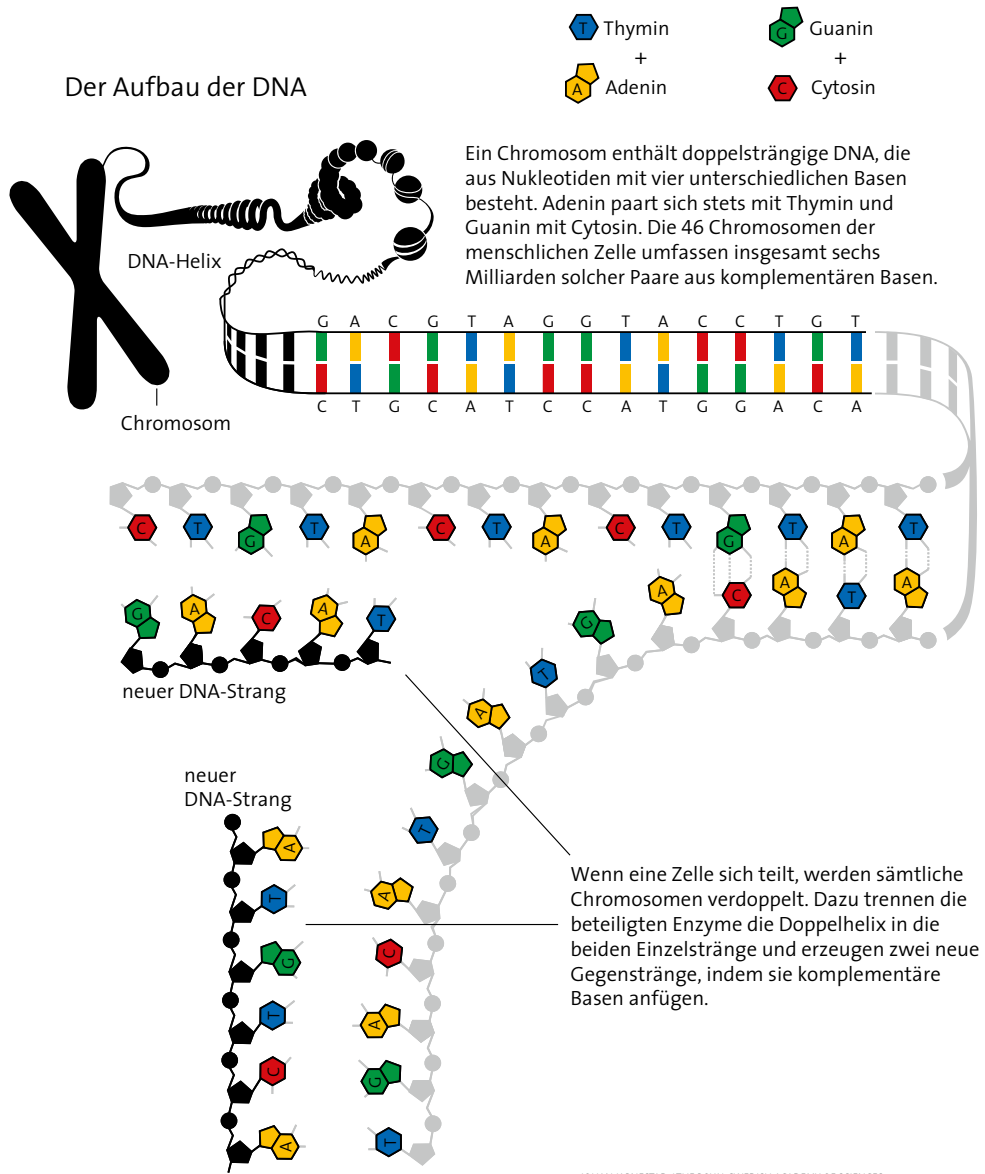
5 Die DNA-Polymerase füllt die Lücke auf, und die DNA-Ligase schließt den DNA-Strang wieder.

JOHAN JANNESTAD / THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

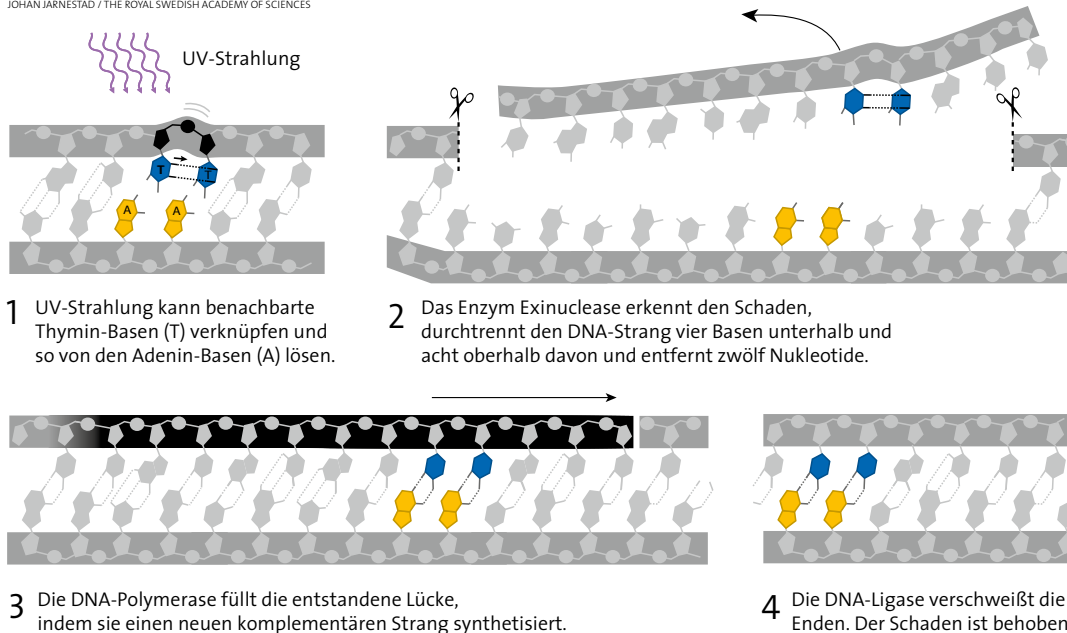
Dieses Molekül faszinierte den Mediziner Aziz Sancar so sehr, dass er es Mitte der 1970er Jahre zum Gegenstand seiner Doktorarbeit machte. Unzufrieden mit seiner Tätigkeit als Landarzt in der Türkei, war er in die USA gegangen, um an der University of Texas in Austin Molekularbiologie zu studieren. Tatsächlich gelang ihm 1976, das Photolyase-Gen in Bakterien zu klonieren und große Mengen des Enzyms zu gewinnen. Allein, sein Ergebnis begeisterte niemanden. Sämtliche Bewerbungen auf Postdocstellen, an denen er seine Arbeit hätte fortführen können, stießen auf Ablehnung. So blieb ihm nichts anderes übrig, als eine Stelle als Techniker an der Yale University in New Haven (Connecticut) anzunehmen, um überhaupt die Möglichkeit zu haben, weiter über die DNA-Reparatur zu forschen.

Auf demselben Gebiet tummelte sich damals auch Tomas Lindahl, der jedoch auf ganz anderem Weg dorthin gelangt war. Der schwedische Krebsforscher hatte sich gefragt, wie stabil die DNA unter normalen Umständen ist – also wenn man sie nicht gerade mit Röntgenstrahlung gezielt schädigt. Schon die Intuition sagt, dass kein Molekül der Welt ewig überdauert, und schon gar kein so großes wie die Erbsubstanz. In der Tat erleidet zum Beispiel die 3,3 Milliarden Basenpaare lan-

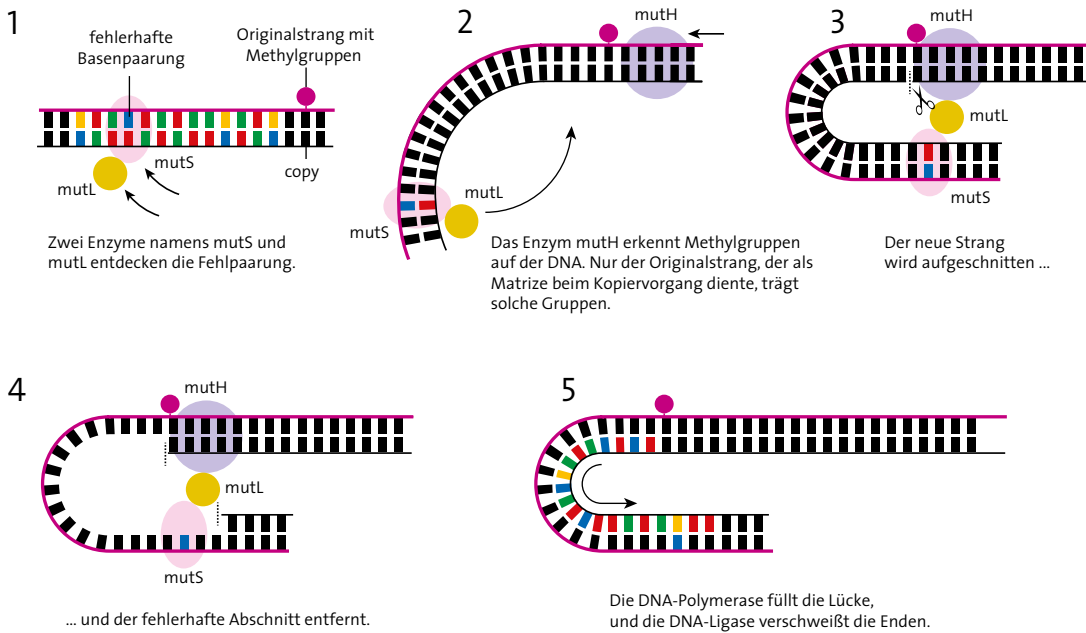
Der Aufbau der DNA



JOHAN JARNESTAD / THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Die von Aziz Sancar aufgeklärte Nucleotidexzisionsreparatur behebt Schäden durch UV-Strahlung oder karzinogene Substanzen, wie sie im Zigarettenrauch enthalten sind. Dabei wird ein größeres DNA-Stück herausgeschnitten und ersetzt.



JOHAN JARNSTAD / THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Beim Kopieren der DNA vor jeder Zellteilung setzt die DNA-Polymerase gelegentlich eine falsche Base ein. Die meisten solchen Fehlpaarungen erkennt die Replikationsmaschinerie selbst und repariert sie sofort. Zur späteren Korrektur der verbliebenen Fehler gibt es ein weiteres System, dessen genaue Funktionsweise Paul Modrich aufgeklärt hat.

ge DNA des Menschen in der Zelle unter normalen Umständen pro Tag mehrere tausend potenziell verhängnisvolle Verletzungen. Sie wird oxidiert oder methyliert, ja verliert sogar ganze Basen, die als Buchstaben des genetischen Alphabets dienen. Zudem kann der Erbfaden, die spiralförmige Doppelhelix, einfach reißen.

Besonders faszinierte Lindahl ein ebenso häufiger wie gefährlicher Vorgang: Die Base Cytosin kann spontan eine Aminogruppe verlieren. Dabei verwandelt sie sich in Uracil. Bei der Zellteilung unterscheiden sich beide Moleküle jedoch dramatisch. Während Cytosin mit Guanin ein Paar bildet, bindet sich Uracil an Adenin. Sobald sich die Zelle also teilt und ihre DNA verdoppelt, taucht an dieser Stelle ein neues Basenpaar auf.

Wie Lindahl erkannte, treten derartige Mutationen viel zu oft auf, als dass das Erbgut über Generationen stabil bleiben könnte. Folglich muss es Mechanismen geben, die solche Schäden rückgängig machen. In seinen Arbeiten identifizierte der Nobelpreisträger ein Enzym namens Glycosylase, welches das unerwünschte Uracil aus der DNA herauschneidet. Wenn er uracilhaltige DNA mit ihm zusammenbrachte, reichte sich die defekte Base langsam in der Lösung an – ein klares Zeichen da-

für, dass das Enzym sie aus der Erbsubstanz entfernt hatte.

Wie Lindahl in den nächsten Jahren feststellte, war die Glycosylase nur der erste Vertreter einer großen Gruppe ähnlicher Proteine, die alle vergleichbare Funktionen haben: Sie schneiden einzelne beschädigte Basen aus der DNA, so dass andere Reparaturenzyme die Lücke füllen können.

Derweil erwies sich Yale für Sancar als Glücksgriff. Er entwickelte dort eine Methode, mit Hilfe UV-geschädigter Bakterienzellen die zu bestimmten Genen gehörenden Proteine zu identifizieren. Damit untersuchte er, unterstützt von seinem Kollegen Dean Rupp, drei Gene, die für die DNA-Reparatur wichtig schienen; fehlte auch nur eines von ihnen, waren die Zellen viel anfälliger für Schäden durch UV-Licht.

Nachdem Sancar und seine Arbeitsgruppe größere Mengen der drei Proteine mit den Namen UvrA, UvrB und UvrC gewonnen hatten, begannen sie, deren Funktionsweise zu erforschen. UV-Strahlung bringt die DNA-Basen dazu, chemisch miteinander zu reagieren. Als Folge davon kann die Zelle ihr Erbgut weder korrekt auslesen noch bei der Zellteilung verdoppeln. Um diesen Defekt zu beheben, reicht es nicht mehr, eine einzelne Base zu entfernen. Sancar's Proteine schneiden deshalb

gleich einen ganzen Abschnitt der DNA heraus – jedoch nur am beschädigten Strang; sein Gegenstück bleibt erhalten. Dadurch können Reparaturenzyme anschließend die ursprüngliche Doppelhelix wiederherstellen.

Nach diesen Entdeckungen durfte sich Sancar dann doch wieder seiner zunächst verpönten Photolyase-Forschung widmen, und 1982 gelang es ihm schließlich, auch den chemischen Wirkmechanismus dieses Enzyms aufzuklären. Bis heute untersucht Sancar die betreffenden Reparaturmechanismen und hat dabei unter anderem festgestellt, dass sie an die »innere Uhr« gekoppelt sind.

Fehler bei der DNA-Verdopplung

Doch nicht nur äußere Einflüsse verursachen Schäden im Erbgut. Wie alle Mechanismen der Zelle ist auch die DNA-Verdoppelung nicht fehlerfrei. Obwohl die Polymerasen über eine integrierte Fehlerkorrektur verfügen, enthält der frisch gefertigte Strang im Mittel zwei falsche Basen pro Million. In solchen Fällen treffen zwei normale, aber nicht zueinander passende Basen aufeinander. Eine davon müssen die Reparaturenzyme entfernen, aber welche? Die Chance ist 50 zu 50, dass sie die falsche wählen. Wenn die Zelle solche Fehlpaarungen nach dem Zufallsprinzip korri-

gieren würde, entstünden also bei jeder Zellteilung im Menschen mehr als 3000 neue Mutationen. Das wäre ein bisschen viel.

Die Reparaturkolonne der Zelle muss also erkennen, welches der alte, korrekte DNA-Strang ist. Tatsächlich hat die Evolution auch für dieses Problem eine Lösung ersonnen. Auf sie stieß der dritte Nobelpreisträger, Paul Modrich, während seiner Arbeit an verschiedenen Molekülen, die allesamt mit der DNA interagieren. Eines davon, die Dam-Methylase, hängt aus mysteriösen Gründen ein Kohlenstoffatom samt dreier Wasserstoffe an die DNA. Was diese Methylgruppe dort sollte, wusste niemand, als Modrich an der Duke University in Durham (North Carolina) mit seinen Untersuchungen begann.

Immerhin hatte sein Kollege Matthew Meselson von der Harvard Uni-

versity in Cambridge (Massachusetts) eine Vermutung. Demnach waren die Methylgruppen für ein weiteres unerklärtes Phänomen verantwortlich: In einem Doppelstrang mit Fehlpaarungen verändern Enzyme bevorzugt denjenigen von beiden, der kein solches Anhängsel trägt. Zu Beginn der 1980er Jahre begannen Modrich und Meselson diese Hypothese zu testen. Zuerst bestätigten sie anhand unterschiedlich methylierter DNA-Doppelstränge, dass tatsächlich derjenige ohne die Methylgruppen eher ausgebessert wurde. Dann entwickelte Modrich einen systematischen Weg, die Reparatur zu erfassen und zu messen. Schließlich identifizierte er die beteiligten Enzyme nebst ihren Kofaktoren und isolierte sie. Als eindrucksvolle Krönung seiner Arbeit schaffte er es 1989, das komplette Enzymsystem außerhalb lebender Zellen

zu rekonstruieren und sein Wirken im Detail zu entschlüsseln.

Modrich gehört zu jenen Forschern, die den Nobelpreis nicht einer genialen Eingebung verdanken, sondern sich ihre bahnbrechenden Ergebnisse ausgehend von einer Grundidee über Jahre erarbeitet haben. Auch Sancar und Lindahl bauten ihre ersten Einsichten in der Folgezeit entscheidend aus. Insofern würdigt das Nobelkomitee mit dem diesjährigen Preis für Chemie nicht nur bedeutende Erkenntnisse auf einem zentralen Gebiet der Genetik, sondern zugleich drei ausgesprochen produktive Forscherkarrieren, die weniger durch Heureka-Erlebnisse als durch beharrliche, mühevolle Arbeit geprägt waren.

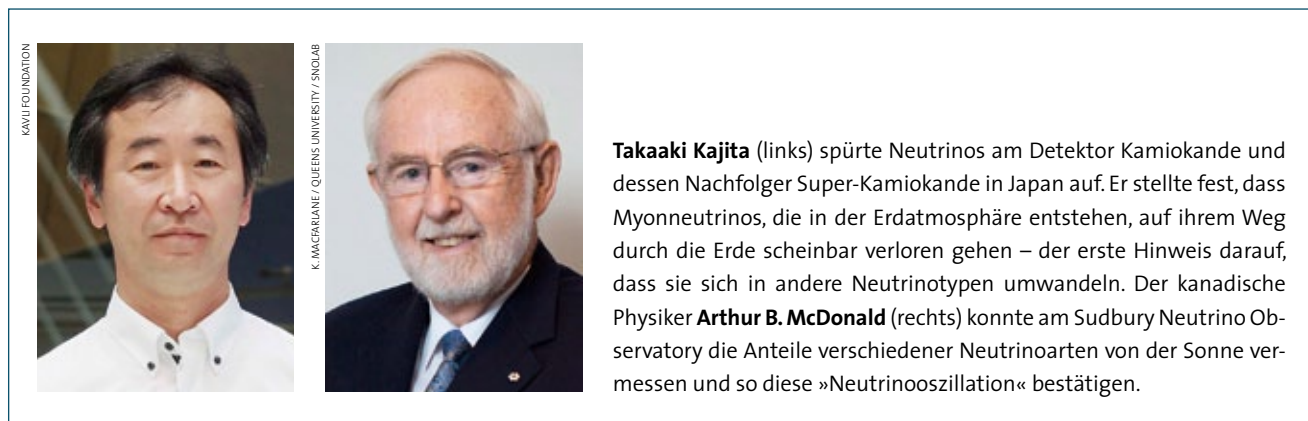
Lars Fischer ist studierter Chemiker, Mitglied der Redaktion von »Spektrum.de« und Leiter des Blogportals »Scilogs«.

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

Teilchen, wechsle dich

Neutrinos lassen sich nur extrem schwer aufspüren. Umso aufwändiger war es festzustellen, dass sie entgegen der Vorhersage des Standardmodells eine Masse besitzen. Diese Leistung wird mit dem Nobelpreis für Physik 2015 ausgezeichnet.

VON PHILIPP HUMMEL



Takaaki Kajita (links) spürte Neutrinos am Detektor Kamiokande und dessen Nachfolger Super-Kamiokande in Japan auf. Er stellte fest, dass Myonneutrinos, die in der Erdatmosphäre entstehen, auf ihrem Weg durch die Erde scheinbar verloren gehen – der erste Hinweis darauf, dass sie sich in andere Neutrinoarten umwandeln. Der kanadische Physiker **Arthur B. McDonald** (rechts) konnte am Sudbury Neutrino Observatory die Anteile verschiedener Neutrinoarten von der Sonne vermessen und so diese »Neutrinooszillation« bestätigen.

Neutrinos sind nach den Photonen die häufigsten Teilchen im Universum. Sie entstehen beispielsweise, wenn kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft, bei den Vorgängen in der Sonne, aber auch in Kernkraftwer-

ken. Billionen davon strömen jede Sekunde durch unseren Körper. Doch im Gegensatz zu den meisten anderen Teilchen bemerken wir sie nicht, da sie kaum mit der übrigen Materie wechselwirken.

Schon 1930 hatte der österreichische Physiker Wolfgang Pauli elektrisch neutrale, leichte Partikel ersonnen, um mit ihnen den radioaktiven Betazerfall schlüssig zu erklären. Kurz darauf gab ihnen sein italienischer Kollege Enrico

Fermi ihren Namen. 1956 gelang es schließlich, die Existenz von Neutrinos nachzuweisen.

Doch die schwer fassbaren Teilchen blieben mysteriös. Neutrinos kommen in drei »Flavours« vor (englisch für Geschmacksrichtungen) – so viel konnten die Physiker seither herausfinden. Neben den Elektronneutrinos gibt es auch Tau- und Myonneutrinos. Theorien zu den Prozessen in der Sonne sagten vorher, dass dort zahlreiche Elektronneutrinos entstehen würden, die sich auf der Erde nachweisen lassen müssten.

1970 erschienen ihre Spuren erstmals in einem Detektor in einer ehemaligen Goldmine in Süddakota. Als Teilchenphysiker die Ergebnisse dieses Versuchs und anderer Experimente auswerteten, entdeckten sie aber lediglich einen Bruchteil der vorhergesagten Neutrinos. Bis zu zwei Drittel fehlten einfach. Wo also waren die restlichen solaren Neutrinos geblieben? Oder traf etwa die Theorie der Kernreaktionen in der Sonne nicht ganz zu?

Der diesjährige Nobelpreis für Physik an Takaaki Kajita und Arthur B. Mc-

Donald würdigt unter anderem die Lösung dieses Rätsels. 1000 Meter unter der Erde nordwestlich von Tokio befindet sich der riesige Detektor Super-Kamiokande. Er besteht aus einem 40 Meter hohen Tank mit 50000 Tonnen hochreinem Wasser. Es ist so klar, dass sich Licht darin 70 Meter ausbreiten kann, bevor es die Hälfte seiner Intensität verloren hat. In einem gewöhnlichen Schwimmbecken geschieht das bereits nach ein paar Metern.

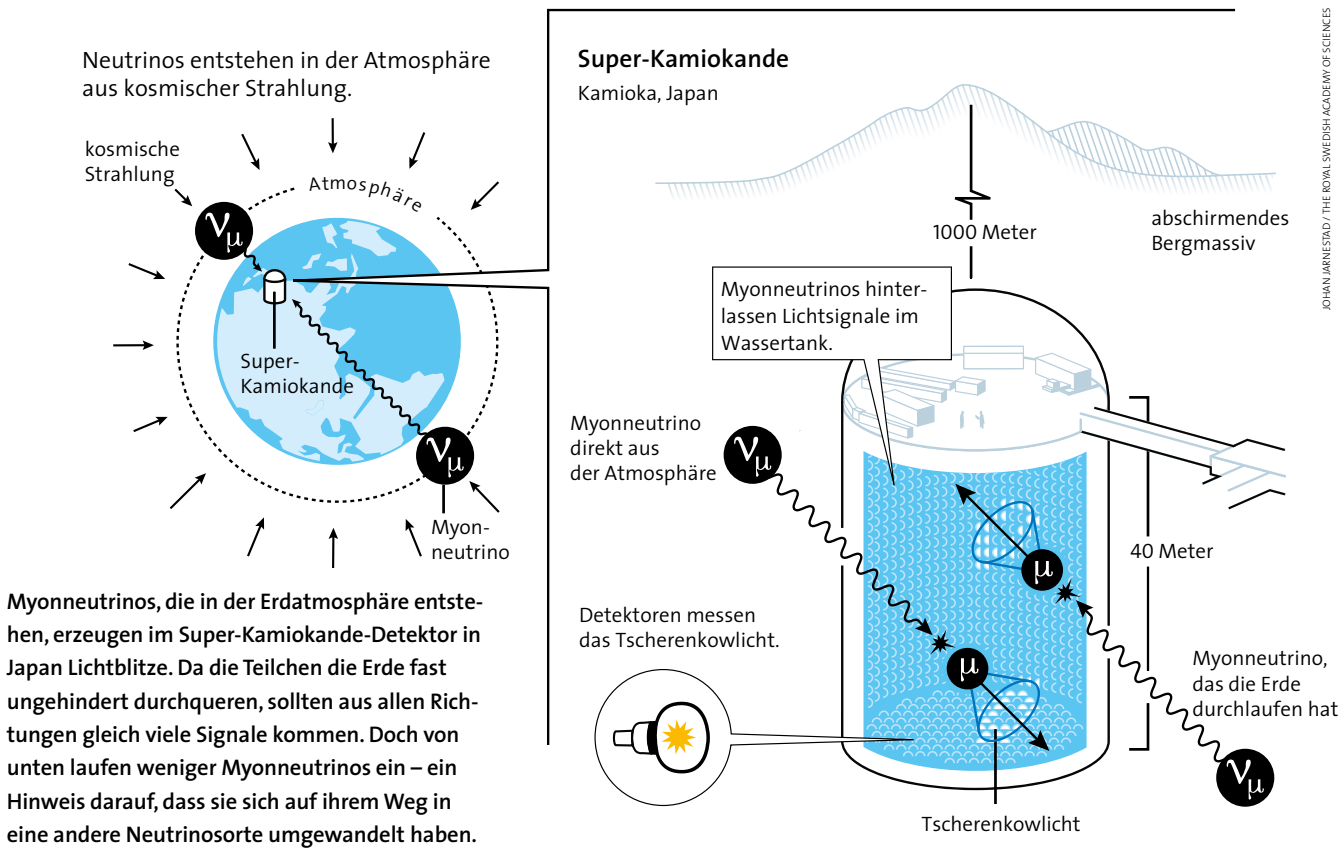
Blaue Blitze durchfahren gigantische Wasserbecken

Rundum sind an der Innenseite mehr als 11000 Strahlungsdetektoren angebracht. Sie können es registrieren, wenn Neutrinos durch den Tank strömen, die in unserer Atmosphäre durch kosmische Strahlung entstehen. Zwar passiert die weitaus überwiegende Zahl der Teilchen das Wasser ohne jegliche Wechselwirkung, doch es kommt vor, dass ein Neutrino mit einem der Moleküle zusammenstößt. Dann entsteht ein blauer Blitz aus so genannter Tscherenkowstrahlung.

Nun lassen sich mit Super-Kamiokande nicht nur Neutrinos nachweisen, die einen direkten Weg von der Atmosphäre zu dem Detektor hinter sich haben, sondern auch jene, die nach ihrer Entstehung quer durch die Erde geflogen sind. Denn selbst unser Planet ist für die meisten der Neutrinos kein nennenswertes Hindernis.

Als die Forscher um Takaaki Kajita aber ihre Daten analysierten, stellten sie fest, dass die Myonneutrinos, die direkt von oberhalb des Detektors ankamen, zahlreicher waren als jene, die erst den längeren Weg durch die Erde nehmen mussten. Wo blieb der Rest? Die Zahl der Elektronneutrinos entsprach hingegen den Vorhersagen; Tauneutrinos ließen sich mit dem Detektor nicht messen. Eine mögliche Erklärung der Forscher aus dem Jahr 1998: Die Myonneutrinos verwandelten sich auf ihrer Reise durch die Erde.

Kurz darauf gelang es Wissenschaftlern um Arthur B. McDonald am Sudbury Neutrino Observatory in Kanada, einen ähnlichen Effekt für Elektronneutrinos aus den Kernreaktionen der



JOHAN JÄRNSTADT / THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

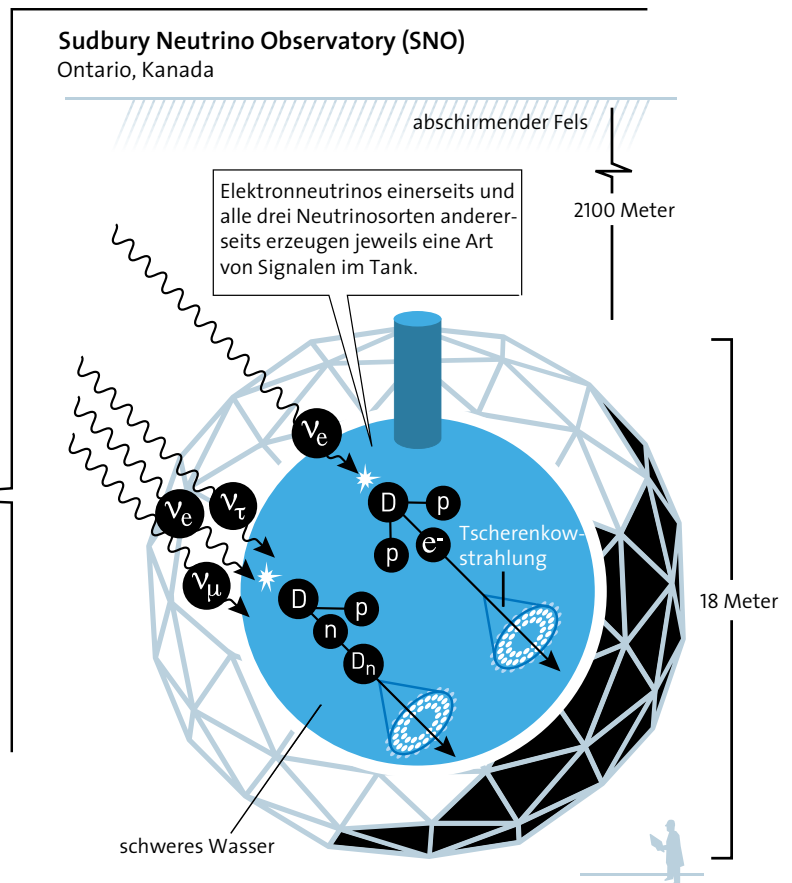
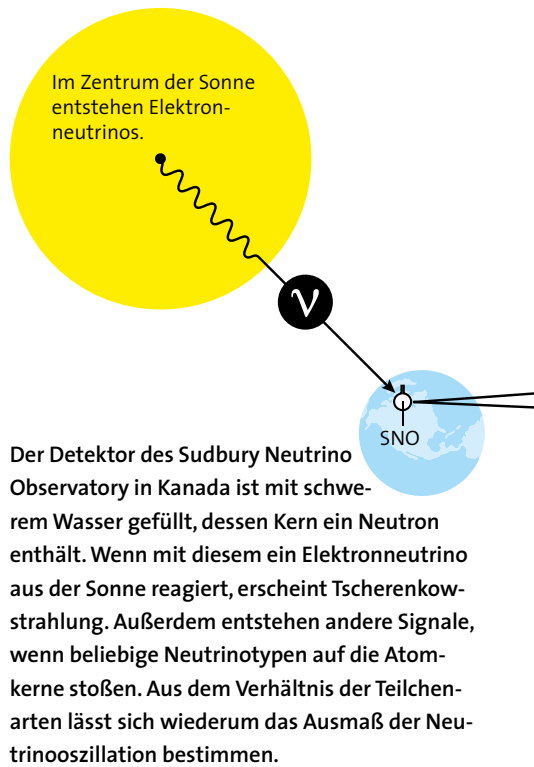
Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.de

Neutrinos aus der Sonne



JOHAN JARNESTAD / THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Sonne zu messen. Der dortige 18 Meter hohe Detektor befindet sich zwei Kilometer unter der Erde. 9500 Strahlungsdetektoren verzeichnen die Wechselwirkung der solaren Neutrinos mit 1000 Tonnen schwerem Wasser, also solchem, das statt Wasserstoff das um ein Neutron reichere Deuterium enthält. Der massigere Atomkern bietet zusätzliches Stoßpotenzial.

Die Anlage in Kanada kann zwei Arten von Ereignissen nachweisen. Eintreffende Elektronneutrinos reagieren mit den Neutronen des Deuteriums zu einem Proton und einem extrem schnellen Elektron. Letzteres erzeugt Tscherenkowstrahlung, die Signale in den Detektoren auslöst. Die anderen Neutrinoarten sind dazu nicht in der Lage, können aber, wie zusätzlich auch die Elektronneutrinos, durch Stöße mit dem schweren Wasser wechselwirken. Auch dabei entstehen Signale, die aber von denen aus dem ersten Reaktionsweg unterschieden werden können.

Da in der Sonne laut Theorie nur Elektronneutrinos entstehen sollten, er-

warteten die Forscher für beide Erscheinungen dieselbe Häufigkeit. Dennoch fanden sie weniger Ereignisse für Elektronneutrinos als solche für die Summe aller drei Neutrinoarten. Die Erklärung: Die Elektronneutrinos mussten auf ihrem 150 Millionen Kilometer langen Weg zur Erde eine Transformation durchgemacht und sich zum Teil in mindestens eine der beiden anderen Sorten umgewandelt haben. Aus Elektronneutrinos waren Tau- oder Myon-neutrinos geworden.

Eine winzige Masse mit schwer wiegenden Folgen

Die Neutrinos wechseln ihre Gestalt jedoch nicht zufällig, sondern mit einer Regelmäßigkeit, die es erlaubt, dem Verwandlungsprozess eine Wellenlänge und Frequenz zuzuschreiben, wie man das von periodischen Prozessen kennt. Deshalb spricht man auch von Neutrinooszillationen.

Ihre Ergebnisse veröffentlichten die Forscher um Arthur B. McDonald 2001 und 2002. Zusammen mit den Messun-

gen des Teams von Takaaki Kajita am Super-Kamiokande-Detektor bestätigen die Resultate, dass Neutrinos ihren Flavour wechseln. Das hat weit reichende Auswirkungen auf das Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Nach ihm sind die Neutrinos einerseits masselos, andererseits können nur massebehaftete Partikeln ein solches Verhalten zeigen. Da mit den Oszillationen nachgewiesen ist, dass Neutrinos entgegen der ursprünglichen Vorstellung doch eine – wenn auch geringe – Masse haben, muss das Standardmodell in seiner bislang akzeptierten Form überarbeitet werden.

Es gilt nun auf dem Weg zu einer neuen Physik weitere Rätsel zu lösen: Was ist die genaue absolute Masse der Neutrinos? Warum sind sie so leicht? Gibt es noch mehr Flavours als die drei bereits bekannten? Können Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sein?

Bei einem Telefonat mit einer Journalistin kurz nach der Verkündung wollte diese von Arthur B. McDonald wissen, was die Entdeckung denn nun be-

deute und was der praktische Nutzen sei. McDonald musste ein wenig nachdenken, bis ihm doch noch etwas einfiel, was über den reinen Erkenntnisgewinn hinausgeht: Man verstehe jetzt auch die Prozesse in der Sonne besser; das könne für die Erforschung der Kernfusion auf der Erde nützlich

sein. Kajita ließ sich bei seinem Interview erst gar nicht darauf ein: »Meine Arbeit bringt nicht gleich Nutzen. Wenn man es schön ausdrückt, dann erweitert sie den Horizont des menschlichen Wissens. Der Nobelpreis hat Licht darauf geworfen, und ich bin dankbar dafür.«

Philipp Hummel ist Wissenschaftsjournalist in Berlin.

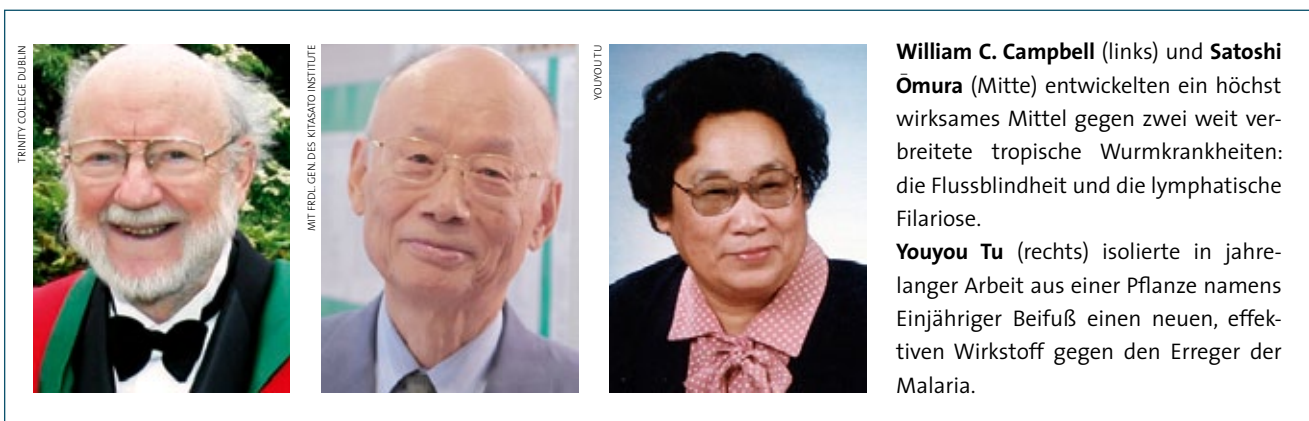
Hinweis: Ein Artikel von Takaaki Kajita erschien in der Oktoberausgabe 1999 von »Spektrum der Wissenschaft«. Sie können den Text »Der Neutrinomasse auf der Spur« kostenfrei online lesen: www.spektrum.de/artikel/825785

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE ODER MEDIZIN

Durchschlagende Waffen gegen Parasiten

Die diesjährigen Preisträger sind drei bislang wenig bekannte Pharmakologen. Ihren hartnäckigen jahrelangen Entwicklungsarbeiten an Parasitenmedikamenten verdanken Millionen von Menschen vor allem in armen Ländern der Tropen ihr Leben und eine Zukunft.

VON JAN OSTERKAMP



William C. Campbell (links) und **Satoshi Ōmura** (Mitte) entwickelten ein höchst wirksames Mittel gegen zwei weit verbreitete tropische Wurmkrankheiten: die Flussblindheit und die lymphatische Filariose.

Youyou Tu (rechts) isolierte in jahrelanger Arbeit aus einer Pflanze namens Einjähriger Beifuß einen neuen, effektiven Wirkstoff gegen den Erreger der Malaria.

Mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin sind in den letzten Jahrzehnten vorwiegend Experten aus dem Bereich der zell- und molekularbiologischen Grundlagenforschung ausgezeichnet worden. Nicht so dieses Jahr: Den Preis erhalten drei Außenseiter, deren Arbeit bereits Millionen von Menschenleben gerettet haben dürfte.

Der US-Amerikaner William C. Campbell und der Japaner Satoshi Ōmura entdeckten den Wirkstoff Avermectin gegen Wurmparasiten und entwickelten ihn weiter zum äußerst effektiven Ivermectin. Letzteres bekämpft heute so erfolgreich die verbreiteten Tropenkrankheiten Flussblindheit und lymphatische Filariose (Elephantiasis), dass diese womöglich bald ausgerottet sein könnten. Die beiden Forscher teilen

sich den Preis mit der Chinesin Youyou Tu, die nach jahrelangen Bemühungen aus Pflanzen Artemisinin isolieren konnte – ein heute unverzichtbarer, hochwirksamer Bestandteil von Medikamentencocktails gegen Malaria, der häufigsten tödlichen Tropenkrankheit.

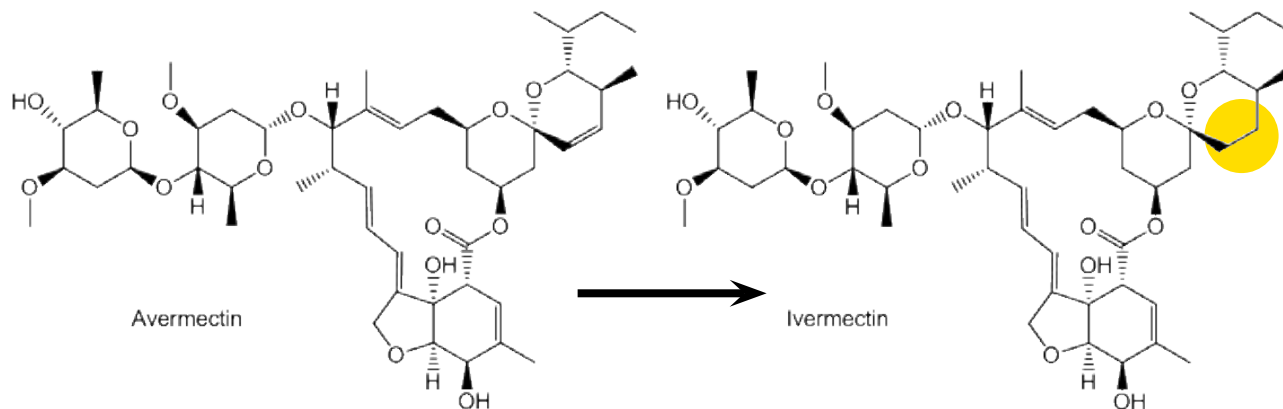
Artemisinin wird vom Einjährigen Beifuß produziert, botanisch *Artemisia annua* genannt. In der traditionellen chinesischen Medizin setzt man ihn in vielfältigster Form allerlei Arzneien gegen die verschiedensten Wehwehchen zu. Das war im Westen niemandem aufgefallen – der nun preisgekrönten chinesischen Pharmakologin Youyou Tu aber schon.

Offiziell gehört die 74-Jährige auch im Ruhestand noch der Akademie für traditionelle chinesische Medizin in

Peking an, wo sie jahrzehntelang geforscht hat. Bereits in den späten 1960er Jahren machte sie sich mit allem damals verfügbaren wissenschaftlichen und technischen Knowhow daran, herauszufinden, welche potenziellen Wirkstoffe tatsächlich in der Pflanze stecken. Tu gelang es schließlich, einzelne biochemisch aktive Komponenten zu isolieren – zunächst allerdings mit wechselnden, kaum reproduzierbaren Ergebnissen.

Hinweise aus alten Schriften

Der Durchbruch, so erzählt sie, kam schließlich aus unerwarteter Richtung: Sie fand in alten chinesischen Schriften Hinweise auf die korrekte Aufbereitung der Pflanze und konnte den Wirkstoff dadurch in den frühen 1970er Jahren



Avermectin und sein chemisches Derivat Ivermectin. Der Unterschied in der Struktur ist gelb markiert.

sauberer herausfischen und schließlich testen. Das ergab, dass Artemisinin gegen Malariaparasiten (Einzeller namens *Plasmodium falciparum*) im Blut von Versuchstieren und Menschen wirkt.

Seit 2001 empfiehlt die WHO den Einsatz der Substanz zusammen mit weiteren Wirkstoffen. Eine solche »Artemisinin-basierte Kombinationstherapie« ist effizienter als etwa die Behandlung mit dem bekannten Chinin, gegen das mittlerweile viele Malariastämme weltweit resistent sind. Die Malaria-todesfälle sind allein in Afrika dadurch um mehr als 20 Prozent zurückgegangen, bei Kindern sogar um gut 30 Prozent; jedes Jahr sterben dort etwa 100 000 Menschen weniger.

Eisenionen lassen aggressive Sauerstoffradikale entstehen

Wie Artemisinin gegen die Parasiten wirkt, die rote Blutkörperchen befallen, ist noch nicht vollständig geklärt. Allgemein nimmt man heute an, dass der sekundäre Pflanzenstoff – chemisch gesehen ein so genanntes Sesquiterpen – die Plasmodien mit seiner ungewöhnlichen Peroxidbrücke angreift (siehe die Strukturformel rechts oben).

Diese zerfällt in Gegenwart von Eisenionen und produziert chemisch äußerst reaktive freie Sauerstoffradikale. Da in roten Blutkörperchen das eisenhaltige Sauerstofftransportmolekül Hämoglobin vorkommt und die Plasmodien dort ebenfalls Eisenionen anreichern, kann so eine für den Parasiten tödliche Reaktion in Gang kommen. Unklar ist noch, ob die Radikale einfach

den Krankheitserreger direkt töten oder selektiver wirken. Denn es gibt Hinweise darauf, dass sie in den Einzellern die Kalziumpumpe PfATP6 abschalten und diese damit eliminieren. Daneben scheint sich das Molekül aber auch noch an andere Proteine des Parasiten zu binden, die damit mögliche Angriffspunkte darstellen.

Die komplizierte chemische Struktur des Naturstoffs Artemisinin macht die Substanz wirksam, aber auch teuer, weil sie sich lange Zeit nicht nachbauen ließ, sondern aus Pflanzen mühsam isoliert werden musste. Erst in den letzten Jahren gelang es Forschern, Wege für eine großtechnische Produktion zu finden und die Herstellungskosten zu senken.

Geld verdient übrigens niemand mit dem Wirkstoff, wie das Nobelpreiskomitee anlässlich der Bekanntgabe betonte: Die heute massenhaft in den Fabriken eines Pharmariesen hergestellten halb synthetischen Artemisinine stehen auf einer WHO-Liste, die den Zugang lebenswichtiger Medikamente für die Ärmsten der Welt sicherstellen soll. Darauf geführte Wirkstoffe entstehen durch »nicht gewinnorientierte und verlustfreie« Produktion.

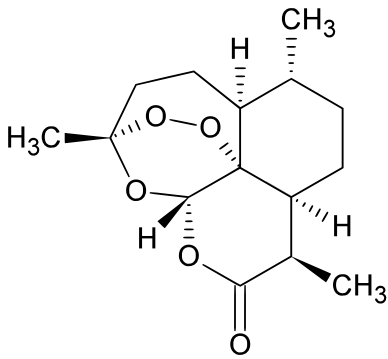
Auch Artemisinin dürfte jedoch keine ultimative Waffe gegen Malaria darstellen: Es muss zum Beispiel in recht kurzen Abständen immer wieder eingenommen werden und das aus gutem Grund nur in Kombinationspräparaten, um die wohl unausweichliche Entwicklung von Resistenzen zu erschweren. Immerhin: Bislang sind solche auf

Südostasien beschränkt und fehlen in Afrika.

Mit diesem Problem hat Ivermectin – das Produkt der beiden anderen frischgebackenen Nobelpreisträger – derzeit noch kaum zu kämpfen. Tatsächlich ist das Wurmmittel so wirksam, dass es seine Hauptangriffsziele fast schon ausgerottet hat: die Nematodenparasiten (Fadenwürmer), welche die tropischen Krankheiten Onchozerkose (Flussblindheit) und lymphatische Filariose verursachen; letztere heißt wegen der dabei anschwellenden Extremitäten auch Elephantiasis. Beide Infektionen zählt die WHO zu den so genannten vernachlässigten Krankheiten. Sie kommen dort vor, wo Ärzte wie Arzneimittel Mangelware sind, und treffen vor allem arme Menschen. Diese stecken sich in ihrer Heimat ständig neu an, wenn die Krankheitserreger dort nicht ganz zurückgedrängt werden.

Einmalige Einnahme genügt

Hier gelang in den letzten Jahren ein Befreiungsschlag: Gab es noch 2008 etwa 100 Millionen Elephantiasis-Betroffene, so ist die Krankheit dort fast verschwunden, wo das ungemein wirksame Ivermectin flächendeckend eingesetzt wird. Der Erfolg des Medikaments, für dessen Entdeckung nun William C. Campbell und Satoshi Ōmura geehrt wurden, beruht darauf, dass es schon bei einmaliger Einnahme heilt. So erfordert es nicht die sonst oft notwendige nachhaltige Betreuung, an der es in den vernachlässigten Regionen der Erde meist mangelt.



Der Malaria-Wirkstoff Artemisinin

Ivermectin ist eine chemische Variante des Avermectins, das zuerst der 1935 in Japan geborene Chemiker Ömura isoliert hat (siehe Strukturformeln links oben). Er hatte an der Kitasato-Universität, wo er bis zu seiner Emeritierung 2007 tätig war, in den 1970er Jahren begonnen, die natürlichen biochemischen Produkte von Bodenbakterien systematisch zu untersuchen, und

dabei ein besonderes Augenmerk auf die Antibiotika herstellende Gattung *Streptomyces* gelegt. In langwierigen und sorgfältigen Versuchsreihen gelang es ihm schließlich, bislang unbekannte Stämme mit einem in vielerlei Hinsicht interessanten biochemischen Produktportefeuille zu isolieren. Aus Tausenden solcher Stämme wählte er dann die etwa 50 vielversprechendsten aus, um ihre Wirksamkeit gegen verschiedene schädliche Organismen genauer zu prüfen. Einer davon – *Streptomyces avermitilis* – entpuppte sich als Volltreffer.

Auf diesen Versuchen baute der 1930 geborene Campbell auf, der von 1957 bis 1990 für die Pharmafirma Merck am Institute for Therapeutic Research in Washington arbeitete und dort ständig nach neuen Antibiotika suchte. Dem Parasitologen gelang es, die bioaktive Substanz des Bodenbakteriums zu isolieren: Avermectin, biochemisch ein makrozyklisches Lacton, das als neuartiges

Neurotoxin Milben und Parasiten tötet. Mit chemischen Modifikationen ließen sich in den folgenden Jahren noch wirksamere Varianten der Substanz produzieren – wie etwa Ivermectin, das sich schließlich als besonders effektive Waffe entpuppte. Eine einzige geschluckte Dosis reicht aus, um bestimmte, nur bei Wirbellosen vorkommende Ionenkanäle so zu manipulieren, dass der dadurch ausgelöste Einstrom von Chloridionen in Zellen die Parasiten tötet.

Die Forschungsarbeiten von Tu, Campbell und Ömura haben vielen Menschen das Leben gerettet, resümiert das Nobelpreiskomitee: Mit den neuen Möglichkeiten haben sich Behandlung und Erfolgsaussichten in der Tropenmedizin drastisch verbessert. Darüber hinaus kommt das Zurückdrängen dieser Krankheiten der gesamten Gesellschaft in den betreffenden Ländern zugute.

Jan Osterkamp ist Redakteur bei »Spektrum.de«.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT

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

Dann profitieren Sie als Teilnehmer der Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« und »Das Interview« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg

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

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

Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit:

Telefon: 06221 9126-743
spektrum.de/schreibwerkstatt

E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN

Der Konsument, das unbekannte Wesen

Der Preis der schwedischen Reichsbank für Wirtschaftswissenschaften im Gedenken an Alfred Nobel geht an Angus Deaton »für seine Analyse von Konsum, Armut und Wohlfahrt«.

VON CHRISTOPH PÖPPE



Angus Deaton, geboren am 15. Oktober 1945 in Edinburgh, promovierte 1974 in Wirtschaftswissenschaften an der Cambridge University. Seit 1983 ist er Professor an der Princeton University. Deaton hat sowohl die britische als auch die amerikanische Staatsbürgerschaft. In seinen zweimal im Jahr erscheinenden »Letters from America« (<http://scholar.princeton.edu/deaton/letters-america>) beteiligt er sich wortgewaltig an der wirtschaftspolitischen Diskussion.

Angus Deaton ist nicht, wie sonst bei Wirtschaftsnobelpreisen üblich, für die Konstruktion mathematischer Modelle berühmt geworden, die wirtschaftliche Aktivitäten beschreiben, sondern eher für deren Dekonstruktion. Es ist bezeichnend, dass das Paradox, das seinen Namen trägt, sich durch die Korrektur eines Modellierungsfehlers auflöst.

Mathematische Modelle sind das unentbehrliche, wenn auch problematische Mittel, mit dem man aus einer unübersehbaren Masse an Beobachtungen Aussagen destilliert. Die wiederum dienen als Grundlage für Prognosen der Art »Subvention X wird die Leute zu dem erwünschten Verhalten Y veranlassen«. Man kann nur beobachten, was die Leute tun, nicht aber, warum sie es tun, weil sie das in der Regel selbst nicht genau genug wissen. Also muss man über ihre Motive geeignete Annahmen treffen – typischerweise in Form mathematischer Modelle. Dabei kann es für ein gegebenes ökonomisches Phänomen mehrere konkurrierende Modelle geben.

Um sich für eines von ihnen zu entscheiden, muss man nicht nur berücksichtigen, wie plausibel seine Annahmen sind und wie gut es sich an die Daten anpassen lässt; Letzteres ist bei der notorisch schlechten Qualität ökonomischer

Daten kein sonderlich scharfes Kriterium. In der Konsumforschung, einem von Deatons zahlreichen Arbeitsgebieten, kommt eine weitere Forderung hinzu: Das Modell muss auch dann vernünftige Ergebnisse liefern, wenn nur Daten über große Kollektive (»aggregate data«) zur Verfügung stehen.

Wie alle Bewohner eines Landes zusammen das Geld, das sie ausgeben, auf Essen, Trinken, Wohnen, Unterhaltung und die Befriedigung anderer Bedürfnisse verteilen, ist nicht schwer zu ermitteln: Die meisten Länder führen detaillierte Statistiken über den Gesamtverbrauch an Lebensmitteln, das Mietniveau und ähnliche Zahlen. Wie aber die einzelnen Haushalte sich entscheiden, erfährt man nur, wenn man sie fragt – ein mühsames und fehlerträchtiges Verfahren, das große Sorgfalt erfordert. Deatons frühe Ergebnisse betreffen das Wechselspiel zwischen dieser mikroökonomischen Datenerhebung und der Entwicklung geeigneter Modelle.

Von zentraler Bedeutung ist hier das klassische Konzept vom rationalen Nutzenmaximierer. Im Fall des Konsums läuft das auf die Unterstellung hinaus, dass die Leute beim Geldausgeben ihren wohlüberlegten Wünschen

folgen und nicht gegen die eigenen Interessen handeln. Das impliziert insbesondere, dass sie

- sich nicht von den Preisen selbst beeinflussen lassen, sondern nur von deren Verhältnis zu ihrem Ausgabebudget, also ihr Ausgabeverhalten nicht ändern, wenn zum Beispiel plötzlich alles in Euro statt in DM abgerechnet wird;
- auf eine Preisänderung bei Ware A in ihrem Einkaufsverhalten bezüglich Ware B nicht anders reagieren, als wenn A und B vertauscht werden;
- wenn eine Ware teurer wird und sich sonst nichts ändert, von dieser Ware nicht mehr kaufen als zuvor.

Sind Verbraucher rational?

Ein frühes Modell, das 1954 veröffentlichte »Linear Expenditure System« von Sir Richard Stone (Wirtschaftsnobelpreis 1984), unterstellt dem Konsumenten eine nachvollziehbare Denkweise: Von jeder Warengruppe kauft er zunächst eine gewisse, zum Überleben erforderliche Mindestmenge. Was dann vom Geld noch übrig bleibt, weist er proportional zu seinen – durch Zahlen ausgedrückten – persönlichen Vorlieben den verschiedenen Warengruppen zu und kauft von jeder so viel, wie er bei den aktuellen Preisen kriegen kann.

Stones Modell besticht durch seine Einfachheit; aber die drei genannten Kriterien für Rationalität sind bereits in die Formeln eingebaut. Also kann kein Abgleich mit beobachteten Daten die Frage beantworten, ob die Leute sich wirklich rational verhalten. Obendrein unterstellt das Modell, dass die Leute der doppelten Menge eines Guts den doppelten Nutzen zuschreiben (»Linearität«) – was bei Gütern, von denen man satt wird, offensichtlich Unsinn ist.

Gemeinsam mit seinem Fachkollegen John Muellbauer vom Birkbeck College in London fand Deaton 1980 eine Verallgemeinerung, das »almost ideal demand system« (AIDS). Die Funktion, die das System definiert, enthält nicht-lineare Anteile; die Parameter sind mit mäßigem Rechenaufwand bestimmbar – bei der damals knappen Rechenkapazität ein bedeutender Vorteil –; und es unterstellt nicht von vornherein die Rationalität der Konsumenten. Vielmehr kann man aus den Ergebnissen ablesen, ob die genannten Rationalitätsbedingungen erfüllt sind.

Bei den Vorgängermodellen konnte es passieren, dass sich jeder einzelne Verbraucher in diesem Sinn rational verhält, nicht aber ein fiktiver Normalverbraucher, dessen Einkaufsgewohnheiten dem Durchschnitt aller – armen wie reichen – Einzelpersonen entspricht. Unter diesem Nachteil, der den Übergang von den Mikro- zu den Makrodaten erschwert, leidet das AIDS nicht.

In den folgenden Jahrzehnten wurde es zum bevorzugten Modell der Konsumforschung. Noch heute dient es als Grundstein der Nachfrageschätzung überall in der Welt, und Deatons und Muellbauers wissenschaftliche Arbeit von 1980 wird unter die 20 einflussreichsten Artikel gezählt, welche die Zeitschrift »American Economic Review« in den ersten 100 Jahren ihres Bestehens veröffentlichte.

Bemerkenswerterweise kommt bei der Auswertung des Modells in der Regel heraus, dass die Rationalitätsbedingungen nicht erfüllt sind. Aber statt daraufhin ihr Modell zu verwerfen, nahmen Deaton und seine Kollegen diesen Befund zum Anlass, es zu verbessern.

So erlaubt das AIDS, dass die Leute in manchen Monaten mehr Geld ausgeben, als sie haben. Es wäre also rational für sie, einen Kredit aufzunehmen; aber den bekommen sie in der Realität wahrscheinlich nicht.

Heute ein Bier und morgen eins

In engem Zusammenhang mit der Frage, wie die Menschen ihre Ausgaben auf die verschiedenen Warengruppen verteilen, steht Deatons zweites großes Arbeitsgebiet: Wie verteilen die Leute ihre Ausgaben über die Zeit? Welchen Anteil des Einkommens sparen sie, um später mehr zur Verfügung zu haben?

Wieder unterstellt man, dass die Menschen sich – im Durchschnitt und über lange Zeiträume – rational verhalten. Diesmal ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Nutzenfunktionen konkav sind. Der subjektiv empfundene Nutzen wächst nicht proportional zur Menge des konsumierten Guts, sondern langsamer. Das zweite Bier schmeckt längst nicht mehr so gut wie das erste. Wer genau zwei Bier finanzieren kann, hat mehr davon, wenn er heute eins und morgen eins trinkt, als heute zwei und morgen gar keins.

Verallgemeinert bedeutet das: Am besten teile ich mein Lebenseinkommen so ein, dass ich jeden Monat ungefähr gleich viel konsumiere, also – bei konstanten Preisen – ungefähr gleich viel ausbe. Dabei muss ich berücksichtigen, dass die Preise steigen, dass Erspartes Zinsen bringt und dass ich mit gutem Grund ungeduldig bin: Das Bier heute ist mir schon deswegen mehr wert als das Bier morgen, weil ich es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit – zum Beispiel wegen Ablebens – morgen nicht mehr genießen kann.

Alle diese Dinge lassen sich zu einem einzigen Diskontfaktor zusammenfassen. Wenn der größer als 1 ist – die Zinsen sind höher als die Inflationsrate, und ich bin nicht sehr ungeduldig –, dann ist es rational, einen gewissen Teil des Einkommens zu sparen. Ich habe ja später mehr davon.

Diese Konzepte liegen der »Permanent Income Hypothesis« des prominenten Ökonomen Milton Friedman

(Wirtschaftsnobelpreis 1976) zu Grunde. Natürlich kann in der Realität niemand das beschriebene Verfahren praktizieren, weil man sein Lebenseinkommen nicht im Voraus kennt. An die Stelle einer wohlbestimmten Zahl muss daher ein Erwartungswert treten, was die Frage aufwirft, wie die Leute ihre Prognosen über ihr zukünftiges Wohlergehen bilden. Gleichwohl erlaubt das Modell einige Aussagen.

So sollten, wenn die Realzinsen (Nominalzinsen minus Inflationsrate) steigen, die Leute mehr sparen – was in der Realität aber nicht vorkommt. Deaton erledigte dieses »Deaton-Paradox« mit einem eleganten Gedankenexperiment. Gegeben seien zwei Gesellschaften, die sich in nichts unterscheiden als dem Realzinssatz. Aus den genannten Gründen sparen die Angehörigen beider Gesellschaften in der Jugend und verprassen das Ersparte im Alter. Je höher der Zinssatz, desto intensiver wird gespart und gepasst; aber nach Voraussetzung geben sie alle über ihr Leben gerechnet dasselbe Geld aus, also ist auch die Gesamtmenge des Gesparten unabhängig vom Zinssatz.

Deatons verfeinerte Modelle erlauben auch Aussagen darüber, wie die Leute ihre Erwartungen bilden. So konnte er die Vorstellung widerlegen, sie nutzen zu jedem Zeitpunkt nur die in diesem Moment verfügbaren Informationen. Dann bliebe ihnen nämlich nichts anderes übrig, als das gegenwärtige Einkommen – vielleicht mitsamt einer unerwarteten Bonuszahlung – als Schätzwert für das zukünftige Einkommen zu verwenden, was noch größere Schwankungen der Konsumausgaben zur Folge hätte. Die aber werden in der Realität nicht beobachtet. Also muss ein brauchbares Modell zwischen – in der Wahrnehmung des Konsumenten – vorübergehenden und permanenten Änderungen der wirtschaftlichen Situation unterscheiden.

Die letzten Jahrzehnte hat Deaton vornehmlich mit dem Studium der Armut verbracht. Insbesondere führte er in Zusammenarbeit mit der Weltbank Feldstudien durch, in denen er zahlreiche indische Haushalte über ihr Kon-

Muss Verhütung Frauensache bleiben?

Konkrete Hoffnung auf die Pille für den Mann

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts etablierte sich die Antibabypille in den Industrienationen als das häufigste Mittel zur Empfängnisverhütung. Die dadurch enorm erleichterte Trennung von Liebesakt und Schwangerschaft wurde weithin – das heißt außerhalb des kirchlichen Einflussbereichs – als sexuelle Befreiung begrüßt. Die medikamentöse Verhütungspraxis besitzt allerdings bis heute eine folgenreiche Schlagseite: Sie ist reine Frauensache. Nur der weibliche Körper wird dauerhaft mit Hormonpräparaten traktiert, die nicht ganz ohne physische und emotionale Nebenwirkungen sind.

Bisher sind andere Verhütungsmethoden, die eine Beteiligung des männlichen Partners erfordern, aufwändiger oder weniger sicher – oder schlicht unter Männern unbeliebt. Die Sterilisierung durch operatives Durchtrennen der Samenleiter lässt sich nicht ohne Weiteres rückgängig machen. Der Gebrauch eines Kondoms wiederum erfordert ein wenig Übung und Geduld; die Furcht, dabei die Erektion zu verlieren, wird gern mit dem Stammtischwitz kaschiert, man habe eine Latexallergie.

Dabei macht die Einseitigkeit der gängigen Verhütungspraxis nicht nur jede einzelne Familienplanung zu einem mehr oder weniger unfairen Akt, sondern beeinflusst sogar die Entwicklung der gesamten Menschheit. Wie Julio Castaneda und Martin M. Matzuk vom Baylor College of Medicine in Houston (Texas) betonen, hat sich die Weltbevölkerung trotz Pille von 1960 bis heute mehr als verdoppelt – mit entsprechenden Folgen wie Ressourcenknappheit und Umweltbelastung –, und daran haben ungewollte Schwangerschaften einen erheblichen Anteil. Ein männliches Verhütungsmedikament würde diesen Trend bremsen und somit eine nachhaltige Entwicklung künftiger Generationen fördern (*Science* 350, S. 385–386, 2015).

Ein interdisziplinäres Team japanischer Genetiker und Immunologen um Masahito Ikawa von der Universität Osaka in Suita hat nun in einer Serie komplizierter Versuche eine Möglichkeit herausgefunden, die männliche Fruchtbarkeit – genauer die Geißeln der Spermien – vorübergehend durch einen Wirkstoff zu lähmen. Dabei handelt es sich um einen so genannten Calcineurin-Inhibitor (*Science* 350, S. 442–445, 2015).

Calcineurin ist ein Enzym, das eine entscheidende Rolle beim Auslösen und Steuern von Immunreaktionen spielt. Entsprechend setzen Mediziner Hemmstoffe gegen es ein, um nach Transplantationen eine Abstoßung des Fremdorgans zu unterdrücken. Diese Substanzen beeinflussen aber nicht nur Immunreaktionen, sondern unter anderem auch die Beweglichkeit von Spermien.

Durch Versuche mit genetisch manipulierten Mäusen identifizierten die japanischen Forscher einen in den Nebenhoden sitzenden Calcineurin-Komplex, ohne dessen Mitwirkung die Geißeln der Spermien nicht stark genug schwänzeln können, um in die Eizelle einzudringen. Wurde er gentechnisch ausgeschaltet, waren die Mäuse unfruchtbar. In anderen Tierversuchen zeigte das Team, dass sich derselbe Effekt erreichen ließ, wenn man normalen Mäusen vier Tage lang bestimmte Calcineurin-Inhibitoren verabreichte. Innerhalb einer Woche nach der Behandlung verschwand die Trägheit der Spermien wieder – die Mäuseriche gewannen ihre Fruchtbarkeit zurück.

Mit dieser Entdeckung könnte eine Pille für den Mann in greifbare Nähe rücken. Er nähme sie – wie das jetzt Frauen tun müssen – so lange ein, wie er verhüten möchte, und käme durch einfaches Absetzen der Pille fast sofort wieder in den Besitz seiner Zeugungsfähigkeit. Allerdings: Wie es mit möglichen Nebenwirkungen aussieht, muss sich erst noch erweisen.



Michael Springer

sumverhalten befragen ließ. Wieder ist charakteristisch für ihn die enge Verzahnung zwischen der Theorie und der Praxis der Datenerhebung. So konnte er zeigen, dass eine Längsschnitterhebung – man fragt ein und denselben Haushalt über Jahre hinweg immer wieder nach seinem Konsumverhalten – entgegen dem ersten Anschein nicht besser, sondern sogar schlechter ist als die Pseudo-Längsschnitterhebung, bei der man sich jedes Mal aufs Neue einen repräsentativen Querschnitt der Bevölkerung zum Befragen zusammensucht. Was nämlich aus dem ursprünglichen Kollektiv – durch Abwanderung, Tod oder andere Gründe – herausfällt, ist keine zufällig bestimmte Menge, sondern eine Auslese, wodurch die Ergebnisse verfälscht werden.

Verkappter Sozialist?

In seinen wissenschaftlichen Arbeiten beschränkt sich Deaton strikt auf die Darstellung der Ergebnisse, darunter so paradoxe wie jenes, dass der Durchschnittsindex mit steigendem Wohlstand zwar mehr Geld fürs Essen ausgibt, dabei aber weniger Kalorien aufnimmt. Nur in seinen Meinungsstücken lässt er die Folgerungen aus seinen Forschungen deutlich aufscheinen.

Ein Paradebeispiel für die Konkavität der Nutzenfunktion ist das Gesundheitswesen. Ein umverteilter Dollar hebt die Gesundheit des Armen weit mehr, als er die des Reichen beeinträchtigt. Aus den Daten geht hervor, dass Ungleichheit an sich nicht gesundheitsschädlich ist, wohl aber die Armut. Die aber wächst in einem Land mit reichem Durchschnitt wie den USA mit der rapide zunehmenden Ungleichheit an. Die logische Konsequenz aus diesem Befund ist eine allgemeine Krankenversicherung mitsamt dem eingebauten Umverteilungseffekt. Aber bei den Republikanern, die genau das in den letzten Jahren heftig bekämpft haben und für deren Bemühungen Deaton starke Worte findet, gilt er damit schon fast als Sozialist.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Sie macht uns **groß**. Und manchmal **klein**.

GEO WISSEN

Den Menschen verstehen

NR. 56 Deutschland € 9,50 Schweiz 16,90 A\$ Österreich € 10,80 Benetton € 11,00 Portugal € 12,80 Italien/Espanien € 12,80 Griechenland € 12,50

Die Macht der Familie



Jetzt
im Handel.



Auch mit
DVD erhältlich

Test
Wie stellen Sie
sich Konflikten?

Geschwister
Von der Liebe
unter Rivalen

Eltern
Wie sie uns fürs
Leben prägen

Therapie
Wege zum
Familienfrieden

Wie Zellen sich unterhalten

Fast alle Zellen in unserem Körper tauschen mit ihren Nachbarn Informationen durch Kanäle aus, über die sie direkt miteinander verbunden sind. Eine Unter-



brechung dieses Kommunikationssystems kann Störungen verursachen, die von Hörverlust bis hin zu Herzkrankheiten reichen.

Von Dale W. Laird, Paul D. Lampe und Ross G. Johnson



Zellen lassen sich als komplexe biologische Maschinen betrachten – die in ständigem Austausch miteinander stehen.

Damit unser Körper richtig funktioniert, müssen sich seine Billionen von Zellen untereinander verständigen können. Dabei nutzen sie ganz unterschiedliche Formen des Informationsaustauschs. Einige produzieren Hormone, die über das Blut zu ihrem Ziel gelangen, andere schütten Neurotransmitter aus, um Signale von einem Neuron zum nächsten zu leiten. Daneben haben aber praktisch alle Zellen einen weiteren Kommunikationsweg gemeinsam: Sie sind mit ihren Nachbarn über Kanäle verknüpft, die das Innere beider Partner in direkten Kontakt miteinander bringen.

Eine eindrucksvolle Demonstration dieser Form der Zell-Zell-Kommunikation gelang Mitte der 1960er Jahre, als Forscher fluoreszierende Farbstoffmoleküle in eine einzelne Zelle inmitten eines dicht gepackten Zellhaufens injizierten. Durchs Mikroskop sahen sie, wie sich die Fluoreszenz rasch von einer Zelle auf die nächste ausbreitete, bis mitunter Hunderte davon leuchteten. Zellen mussten also über Kanäle verfügen, durch die Moleküle von Zelle zu Zelle wandern können.

Inzwischen wissen Biologen, dass diese Kanäle in den Geweben aller Tiere einschließlich des Menschen vorkommen und an außerordentlich vielfältigen Funktionen beteiligt sind. Die Kanäle gruppieren sich dabei zu so genannten Gap Junctions, die bei der Synchronisation des rhythmischen Zusammenziehens der Herzmuskelzellen ebenso mitwirken wie bei den Uteruskontraktionen während der Geburt. Gap Junctions ermöglichen es dem Auge, sich an unterschiedliche Lichtverhältnisse anzupassen, und spielen sogar bei der Organbildung während der embryonalen Entwicklung eine Rolle.

In den letzten beiden Jahrzehnten haben Wissenschaftler herausgefunden, dass Fehler beim Zusammenbau oder bei der Aktivität von Gap Junctions zu einer Reihe von Erkrankungen beitragen: Taubheit, Katarakten, Hautproblemen, neurologischen Erkrankungen, Herzkrankheiten und sogar Krebs. So ist eine einzelne Mutation in einem Proteinbestandteil einer Gap Junction im Innenohr bei bis zu 40 Prozent aller Personen mit erblicher Taubheit für den Hörver-

lust verantwortlich. Und es werden laufend weitere Krankheiten entdeckt, die auf fehlerhaften Gap Junctions beruhen, wie etwa erst kürzlich ein bestimmter Epilepsietyp, der bei Kindern auftritt. Aktuelle Studien liefern nun spannende neue Einblicke in den Aufbau von Gap Junctions und beginnen aufzudecken, wie ihre Störung zu Krankheiten führen kann.

Bei den ersten Experimenten mit Farbstoffinjektionen dachten die Wissenschaftler noch nicht so sehr an die mögliche medizinische Bedeutung. In den 1960er und 1970er Jahren lag der Fokus darauf, weitere Nachweise für diese rätselhafte nachbarschaftliche Kommunikation zwischen Zellen zu finden und mehr über deren Eigenschaften zu lernen. Bevor man Gap Junctions als solche entdeckte, hatten Physiologen bereits bei einer Vielzahl von Organen und Organismen einen direkten zellulären Austausch von Molekülen nachgewiesen – von Tintenfischembryonen und elektrischen Fischen bis hin zu Säugetieren.

Ende der 1960er Jahre wollten die Forscher dann genauer herausfinden, wie die Kanäle aussehen und wie sie entstehen. Frühere mikroskopische Untersuchungen hatten große flache Bereiche gezeigt, an denen die Membranen zweier benachbarter Zellen dicht beieinanderliegen. An diesen Kontaktstellen (englisch: junctions) schienen die Zellen nur durch einen sehr schmalen, wenige Nanometer breiten Spalt (englisch: gap) voneinander getrennt zu sein, was zu der Bezeichnung »Gap Junction« führte.

Wie Gap Junctions entstehen

Welche Rolle spielen diese flachen Membranstellen bei der zellulären Verbindung, die man in den Farbstoff- und elektrischen Experimenten beobachten konnte? Um das zu klären, begann einer von uns (Johnson) zu untersuchen, was passiert, wenn solche Kontaktstellen entstehen. Gemeinsam mit seinen Kollegen an der University of Minnesota trennte er aus einem Lebertumor stammende kultivierte Zellen vorsichtig voneinander und vermischte sie dann wieder. Innerhalb von Minuten entstanden auf den Zellmembranen abgeflachte Stellen – aber nur dort, wo sich zwei Zellen berührten. Diese Beobachtung bestätigte eine Vermutung, der zufolge der Aufbau einer Gap Junction ein Gemeinschaftsprojekt ist, das die Zusammenarbeit benachbarter Zellen erfordert. Mit der Größe dieser Kontaktstellen nahm auch der elektrische Strom zwischen diesen Zellen zu; sie schienen also den Ionen austausch zu erleichtern.

Um sich das näher anzusehen, entfernten Johnson und sein Team die Membranen der miteinander verbundenen Zellen und entdeckten dadurch Partikel, die sich innerhalb der abgeflachten Stellen angesammelt hatten. Wie sich später herausstellte, handelte es sich dabei um genau die Kanäle, aus denen sich die Gap Junctions zusammensetzen (siehe Kasten »Auf- und Abbau von Gap Junctions«). Jeder Kanal besteht seinerseits aus so genannten Connexinen: Molekülen, die zu einer Ende der 1980er Jahre entdeckten Proteinfamilie gehören.

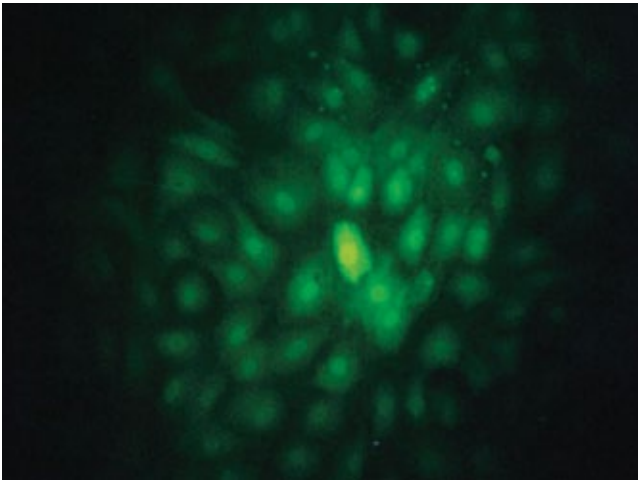
AUF EINEN BLICK

ZELLGEFLÜSTER

1 Über **Gap Junctions** tauschen benachbarte Zellen Informationen aus. Solche »Unterhaltungen« sind wichtige Voraussetzungen für viele Funktionen; sie sind am synchronisierten Schlagen der Herzzellen ebenso beteiligt wie an unserer Fähigkeit zu hören.

2 Gap Junctions bestehen oft aus **mehr als 100 000 einzelnen Proteinen**. Trotz dieser Komplexität werden sie kontinuierlich ab- und aufgebaut. Die sorgfältig gesteuerte **Umstrukturierung** ermöglicht es Zellen, rasch auf Verletzungen oder Stress zu reagieren.

3 **Mutationen** in den Genen, die für Gap-Junction-Proteine kodieren, führen beim Menschen unter anderem zu Haut- und Herzkrankheiten, Epilepsie und Schwerhörigkeit.



Der in eine einzelne Zelle (Mitte) injizierte Farbstoff wandert rasch über Gap-Junction-Kanäle in deren Nachbarn hinein.

Sechs Connexine bilden gemeinsam eine donutförmige Struktur in der Außenmembran einer Zelle, die als Connexon oder Hemikanal (Halbkanal) bezeichnet wird. Diese kann mit dem entsprechenden Gegenstück einer benachbarten Zelle einen gemeinsamen Kanal herstellen – eine Pore, über die das Zytoplasma der einen Zelle direkt mit dem ihrer Nachbarin kommuniziert. Eine große Gap Junction kann durchaus 10000 solcher Kanäle enthalten. Da jede Pore aus zwei Halbkäna len besteht, macht das insgesamt 120000 Connexine pro Verbindung. Allein das Herz umfasst Milliarden von Zellen, von denen jede einzelne mit mehreren Nachbarzellen über Gap Junctions kommuniziert. Diese vielen Konglomerate zu produzieren, stellt den Körper also vor eine Mammutaufgabe.

Umso bemerkenswerter ist es, dass die Kontaktstellen keineswegs dauerhaft oder auch nur langlebig sind, sondern kontinuierlich auseinander- und wieder zusammengebaut werden. So ersetzt unser Körper durchschnittlich alle zwei Stunden die Hälfte der Connexine einer Gap Junction im Herz. Im Lauf eines Tages wird also höchstwahrscheinlich jede einzelne derartige Verbindung in einem menschlichen Herz abgebaut, und neu zusammengebaute Kanäle treten an ihre Stelle.

Angesichts der Komplexität dieser außergewöhnlichen Strukturen muss es wohl Systeme geben, die sicherstellen, dass ihr Aufbau reibungslos verläuft, damit die Zell-Zell-Kommunikation nicht unterbrochen wird. Wir drei haben uns zusammengetan, um diese regulatorischen Mechanismen zu erforschen. Insbesondere interessiert uns, wie Auf- und Abbau der Kommunikationskanäle gesteuert werden.

Bei einem Kaffee auf einer Tagung zu Gap Junctions heckten wir 1991 den genauen Plan unserer zukünftigen Kollaboration aus. Paul Lampe war damals als Postdoc in Ross Johnsons Labor an der University of Minnesota, wo man gerade begann, sich schwerpunktmäßig mit der Regulation des Aufbaus von Gap Junctions zu beschäftigen. Dale Laird als letztes

Mitglied unseres Trios hatte als Postdoc in Jean-Paul Revels Labor am California Institute of Technology eine Reihe von Antikörpermolekülen konstruiert, die spezifisch an Connexin-Proteine binden. Diese molekularen Werkzeuge würden uns ermöglichen herauszufinden, welche Bereiche der Connexine für die Bildung und Aktivität der Gap Junctions von Bedeutung sind.

Lairds Antikörper erkannten ein bestimmtes Connexin-Molekül, das Cx43. Beim Menschen finden sich 21 verschiedene dieser Proteine, und jeder Zelltyp stellt sein eigenes charakteristisches Sortiment davon her. Hautzellen beispielsweise bilden bis zu neun verschiedene Connexine. Beim Cx43 handelt es sich um das am weitesten verbreitete Mitglied der Proteinfamilie. Es findet sich in vielen Organen, neben der Haut etwa auch im Herz, im Gehirn, in den Lungen und in Knochen.

Wie alle Connexine besteht Cx43 aus vier die Zellmembran durchziehenden Abschnitten, die das Protein in dieser verankern. Der Schwanz des Proteins im Zellinnern enthält viele Elemente, die seine Aktivität und den Zusammenbau zu Kanälen und Gap Junctions regulieren, wie wir später feststellten. Durch die mehrfache Membrandurchdringung entstehen zwei Schleifen, die in den Raum zwischen den Zellen ragen. Einige der von Laird erzeugten Antikörper richten sich gegen diese extrazellulären Bereiche.

Da die Schleifen aus der Zelloberfläche herausragen, könnten sie sich wie bei einem Klettverschluss wechselseitig einhaken und so die Connexine miteinander verknüpfen. Um diese Vermutung zu untersuchen, trennten wir erneut kultivierte Zellen voneinander und vermischten sie dann wieder – diesmal aber im Beisein von Lairds Antikörpern. Und jetzt bildeten sich keine Gap Junctions! Wir beobachteten weder einen Transfer von injiziertem Farbstoff zwischen Zellen noch die charakteristischen abgeflachten Stellen. Durch Anheften an die Schleifen hatten die Antikörper verhindert, dass die Connexine verschiedener Zellen aneinander andocken.

Folgen Sie dem Protein!

Als Nächstes wollten wir die Tunnelproteine auf ihrem Weg von der Produktion bis zur Gap Junction in einer lebenden Zelle in Echtzeit beobachten. Aber dazu brauchten wir eine andere Technik. 1994 trafen wir drei uns erneut bei einer Konferenz – diesmal der Tagung der Amerikanischen Gesellschaft für Zellbiologie in San Francisco. In nächstelangen Gesprächen über die Vorträge, die wir gehört hatten, begeisterten wir uns immer mehr für das grün fluoreszierende Protein (GFP). Eine der bei dieser Tagung Vortragenden beschrieb, wie sie diesen fluoreszierenden Marker an das von ihr untersuchte Protein geklebt hatte, um seinen Weg in lebenden Zellen verfolgen zu können. Entsprechend fragten wir uns, ob unsere Forschungsgruppen GFP zum Erfassen der Bewegungen von Connexinen nutzen könnten.

Zunächst hefteten wir GFP an das Schwanzende. Zu unserer großen Freude funktionierte der Ansatz: Die markierten

Connexine wurden korrekt in die Zellmembran eingebaut, wo sie sich zu funktionsfähigen Gap Junctions verbanden, die sich praktisch normal verhielten. Damit hatten wir nun eine leistungsfähige Methode, mit der wir das Verhalten von Connexinen innerhalb von Zellen beobachten konnten – eine Arbeit, die Laird an seiner neuen Stelle an der University of Western Ontario fortsetzte.

Unsere allerersten Beobachtungen überraschten uns. Zunächst fotografierten wir die Zellen alle zehn Minuten in der Annahme, wir könnten die Einzelbilder zu einem Zeitrafferfilm zusammensetzen, der die Bewegungen der Connexine wiedergibt. Aber diese waren so schnell, dass wir die einzelnen Proteine nicht verfolgen konnten. Wir versuchten es erneut mit einem Abstand von zwei Minuten, aber auch das war immer noch zu lang. Um einzelne markierte Moleküle bei ihrer Wanderung innerhalb der Zelle beobachten zu können, mussten wir im Endeffekt alle paar Sekunden eine Aufnahme machen.

Die entstandenen Filme ermöglichten es uns nicht nur, die Bewegung der Connexine zu verfolgen, sondern auch, wie die Halbkanäle in den Zellen entlang von molekularen Schienen aus so genannten Mikrotubuli transportiert wurden. Wir und andere Forscher beobachteten, wie sich kleinere Gap Junctions zu größeren zusammenlagern. Hinweise darauf hatten wir bereits in unseren elektronenmikroskopischen Untersuchungen gefunden. Umgekehrt können auch größere Kontaktflächen auseinanderbrechen und dann kleinere bilden. Das geschieht, wenn die Zellen wachsen, sich bewegen, verformen und teilen.

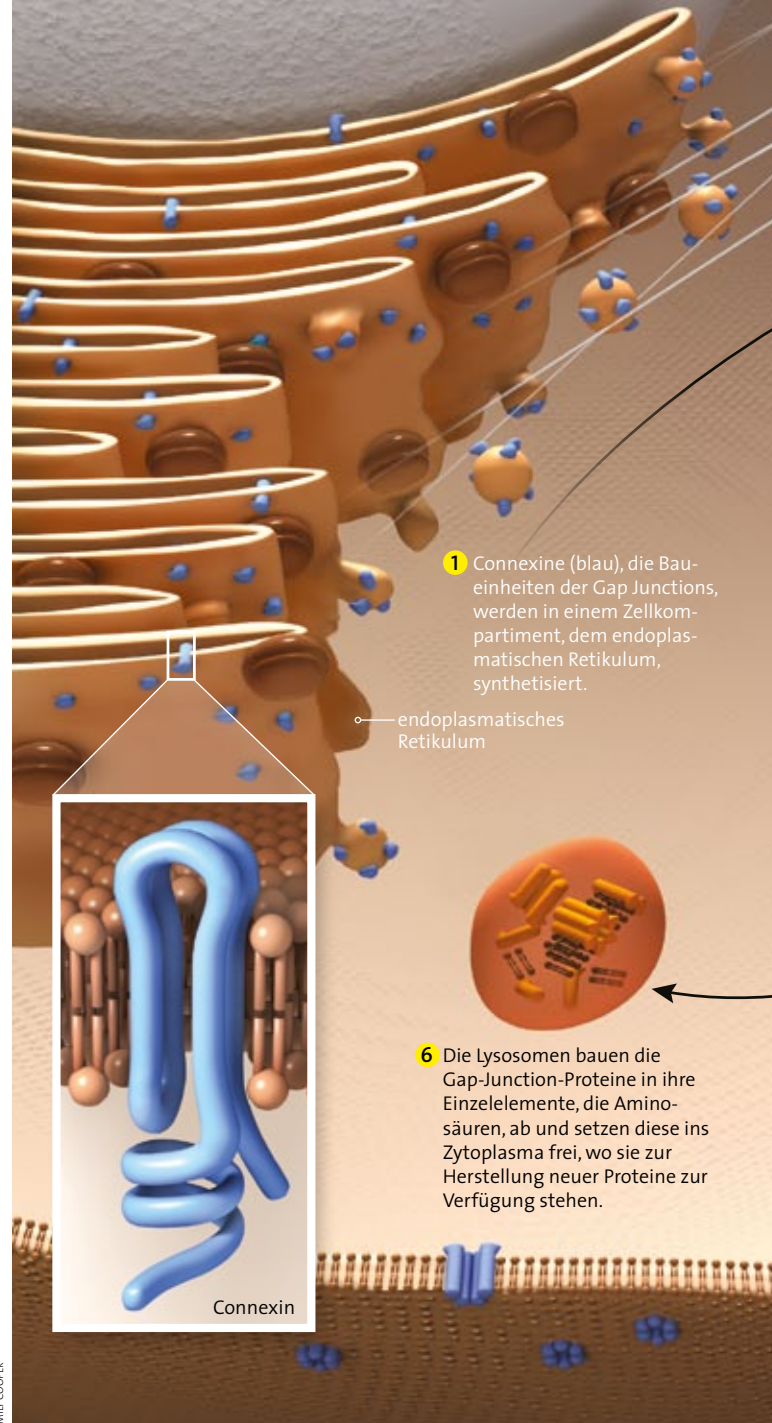
Unsere Kollegen entwickelten weitere Methoden, um Connexine zu markieren und fanden heraus, dass Gap Junctions durch Anlagern weiterer Halbkanäle an ihre äußere Begrenzung wachsen. Damit stellt das Zentrum einer Gap Junction den »ältesten« Teil der Zell-Zell-Kontaktfläche dar. Diese Komponenten scheinen im Lauf der Zeit entfernt und durch neuere Kanäle aus den äußeren Regionen ersetzt zu werden. Das könnte erklären, wie Gap Junctions erhalten bleiben, obwohl in ihnen Connexine verloren gehen.

Zelluläre Kannibalen

Das vielleicht bemerkenswerteste Ergebnis unserer Untersuchungen an lebenden Zellen war, dass manchmal große Teile von Gap Junctions plötzlich verschwinden. Dabei beißt eine der beteiligten Zellen quasi ein Stück aus ihrem Nachbarn heraus und »schluckt« die von beiden Zellen gelieferten verbindenden Komponenten auf einen Schlag. Diesen Mechanismus haben schon andere Forschergruppen anhand früherer elektronenmikroskopischer Aufnahmen vorgeschlagen. Das radikale Manöver könnte eine zuverlässige Methode darstellen, um die Kommunikation zwischen zwei Zellen rasch abzubrechen, wenn diese nicht länger erwünscht ist. Eine solche Beseitigung von Gap Junctions im großen Stil erfolgt beispielsweise nach einer Geburt in der Gebärmutter, um das Kommunikationsnetzwerk abzuschalten, das sich zur Koordinierung der Kontraktionen gebildet hatte.

Auf- und Abbau von Gap Junctions

Zellen bauen ihre Gap Junctions (rechts unten) fortlaufend rasch auf und um. Zunächst produzieren sie Proteine namens Connexine (1), fügen sie dann zu so genannten Halbkanälen zusammen (2) und bauen diese schließlich in die Zellmembran ein (3). Treffen die Halbkanäle dort auf bereits bestehende Gap Junctions, können sie an ihre Gegenstücke in der Nachbarzelle andocken und so neue Verbindungsgänge zwischen diesen Zellen ausbilden (4). Gleichzeitig werden alte Gap-Junction-Kanäle entfernt und abgebaut (5 und 6).



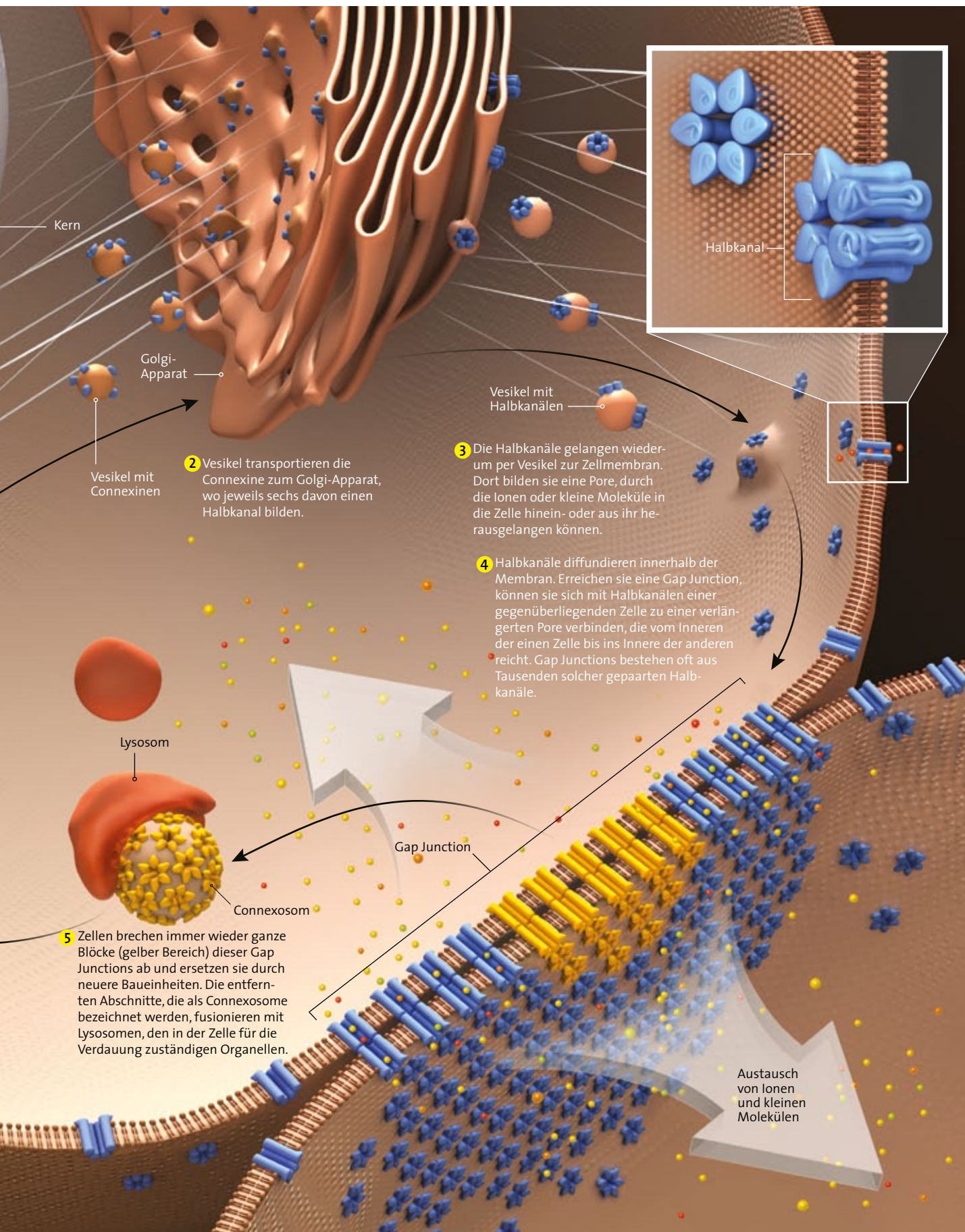
1 Connexine (blau), die Baueinheiten der Gap Junctions, werden in einem Zellkompartiment, dem endoplasmatischen Retikulum, synthetisiert.

endoplasmatisches Retikulum

6 Die Lysosomen bauen die Gap-Junction-Proteine in ihre Einzelelemente, die Aminosäuren, ab und setzen diese ins Zytoplasma frei, wo sie zur Herstellung neuer Proteine zur Verfügung stehen.

Connexin

EMILY COOPER



Kern

Golgi-Apparat

Vesikel mit Connexinen

2 Vesikel transportieren die Connexine zum Golgi-Apparat, wo jeweils sechs davon einen Halbkanal bilden.

Vesikel mit Halbkanälen

3 Die Halbkanäle gelangen wiederum per Vesikel zur Zellmembran. Dort bilden sie eine Pore, durch die Ionen oder kleine Moleküle in die Zelle hinein- oder aus ihr herausgelangen können.

4 Halbkanäle diffundieren innerhalb der Membran. Erreichen sie eine Gap Junction, können sie sich mit Halbkanälen einer gegenüberliegenden Zelle zu einer verlängerten Pore verbinden, die vom Inneren der einen Zelle bis ins Innere der anderen reicht. Gap Junctions bestehen oft aus Tausenden solcher gepaarten Halbkanäle.

Lysosom

Gap Junction

Connexosom

5 Zellen brechen immer wieder ganze Blöcke (gelber Bereich) dieser Gap Junctions ab und ersetzen sie durch neuere Baueinheiten. Die entfernten Abschnitte, die als Connexosome bezeichnet werden, fusionieren mit Lysosomen, den in der Zelle für die Verdauung zuständigen Organellen.

Austausch von Ionen und kleinen Molekülen

Als Nächstes machten wir uns daran zu erforschen, wie Zellen diese massiven molekularen Umbauten überwachen könnten. Erste Untersuchungen wiesen auf bestimmte Proteine als Regulatoren hin, so genannte Kinasen. Indem diese an ein Zielprotein Phosphatgruppen anheften, können sie dessen Aktivität oder seinen Ort innerhalb der Zelle verändern.

Es galt nun herauszufinden, ob Proteinkinasen auch das Verhalten von Connexinen regulieren, und falls ja, was genau die Phosphorylierung bewirkt. Lampe übernahm die Leitung dieser Experimente, als er 1994 sein Labor am Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle einrichtete. Er und seine Mitarbeiter nahmen Cx43 auseinander und untersuchten einzelne Teile des Proteins. Dadurch stellten sie fest, dass dieses Connexin im Lauf seines Lebens an bis zu 15 unterschiedlichen Stellen entlang seiner Schwanzregion phosphoryliert wird. Mit dieser Information konnten wir einige der Regeln aufdecken, nach denen sich Gap Junctions bilden, die Cx43 enthalten. Wenn bestimmte Kinasen an spezifischen Stellen des Proteinschwanzes ihren Job erledigen, fördert die Modifikation den Aufbau solcher Verbindungen. Kinasen, die auf andere Teile des Schwanzes einwirken, hemmen hingegen die Bildung von Gap Junctions, ihre Aktivität oder Größe.

Hilfestellung nach Herzinfarkt

Dank solchen Einblicken können wir nun in menschlichen Gewebeproben den Einfluss der Phosphorylierung darauf studieren, wie Gap Junctions nach einer Verletzung oder bei einer Krankheit zusammengebaut werden und funktionieren. Wir und andere haben beispielsweise begonnen zu untersuchen, wie sich die Kommunikation durch Gap Junctions verändert, wenn Herzzellen sich nach einem Infarkt von der Sauerstoffunterversorgung erholen oder wenn sich Hautzellen daran machen, einen Schnitt oder Kratzer zu heilen. In beiden Fällen, so fand Lampes Team heraus, nimmt die Phosphorylierung an einer bestimmten Stelle am Schwanz von Cx43 zu, was kurzzeitig die Gap Junctions in diesen Geweben vergrößert. Denn die Modifikation hindert Cx43 daran, mit einem Protein in Wechselwirkung zu treten, das den Einbau neuer Connexine in bestehende Verbindungen bremst. Die resultierende Vergrößerung der Gap Junction erhöht die Kommunikationsfähigkeit der Zellen – die in den ersten Minuten nach einer Verletzung kritisch ist – und hält die Herzgewebefunktion aufrecht beziehungsweise erleichtert die Wanderung von Hautzellen zur offenen Wunde hin.

Dieses neue Wissen hat eine Tür zur Entwicklung von Therapeutika geöffnet, mit denen sich die Aktivität der relevanten Proteinkinasen gezielt fördern oder hemmen lässt. Man sollte bei derartigen Behandlungsstrategien jedoch vorsichtig vorgehen, denn eine Zunahme von Gap Junctions in einem bestimmten Krankheitsstadium könnte sich in einem späteren als schädlich erweisen. Zum Beispiel: Obwohl sich Gap Junctions unmittelbar nach einer Verletzung kurzzeitig

vergrößern, werden sie später rasch wieder abgebaut, was die Heilung unterstützt. Daher weisen Diabetiker einen langsameren Wundverschluss auf – wegen ihrer kontinuierlichen Überproduktion von Cx43. Und bei Kratzern in der Hornhaut des Auges können Connexine Entzündungen und Narben anstatt Heilung fördern. In diesen Fällen unterstützt eine Begrenzung der Produktion oder Aktivität von Cx43 in den die Verletzung umgebenden Zellen einen raschen und narbenfreien Wundverschluss. Inzwischen verfolgen auch verschiedene Biotechnologiefirmen diesen Ansatz.

Allerdings müssen die Forscher noch besser verstehen, wie sich Connexine in verschiedenen Geweben und unter unterschiedlichen Bedingungen zusammenlagern – und warum das bei manchen Krankheiten schiefgeht. Die Untersuchung krankheitsverursachender Mutationen in Genen für Connexin-Proteine beginnt hierzu nützliche Einblicke zu liefern.

Mitte der 1990er Jahre entdeckten Forscher den ersten stichhaltigen genetischen Beweis dafür, dass Connexine an Krankheiten beteiligt sein können: Mutationen in dem Cx32-codierenden Gen verursachen eine Form des so genannten Charcot-Marie-Tooth-Syndroms. Bei dieser Erkrankung verschwinden die Gap Junctions aus der die Nerven isolierenden Myelinschicht, wodurch diese sich auflöst und die Nerven degenerieren. Das wiederum verursacht insbesondere in den Gliedmaßen Muskelschwund und -schwäche. Die Entdeckung, dass Mutationen in den Connexin-Genen schwerwiegende Konsequenzen haben, ließ das Interesse von Forschern und Klinikern an Gap Junctions geradezu explodieren. Folgestudien förderten weitere Connexin-Mutationen zu Tage. Derzeit sind 14 verschiedene Erkrankungen bekannt, die von Defekten in Gap-Junction-Connexinen herrühren.

Das Auffälligste an dieser Sammlung von Störungen ist, wie stark sie sich voneinander unterscheiden. Neben der neurodegenerativen Charcot-Marie-Tooth-Erkrankung können Mutationen in Connexinen verantwortlich sein für Hörverlust, Epilepsie, Herzkrankheiten, Hautkrankheiten, grauen Star sowie viele Krankheiten, die während der Embryoentwicklung entstehen. Wenig überraschend verursachen Mutationen in verschiedenen Connexinen auch unterschiedliche Krankheitsbilder. Eher erstaunt, dass solche mutierten Kanalproteine nicht zwangsläufig alle Gewebe oder Organe gleichermaßen beeinträchtigen: Wird eine bestimmte Mutante in zwei Organen hergestellt, stört sie manchmal nur die Funktion des einen, nicht jedoch die des anderen.

Viele Arbeitsgruppen arbeiten daran, das Phänomen zu verstehen. Eine mögliche Erklärung lautet, dass andere, gesunde Connexine die defekte Variante kompensieren können, indem sie die Kommunikation der Gap Junctions aufrechterhalten. Das mag nur in manchen Geweben stattfinden, nicht in anderen. Vielleicht spielt aber auch ein bestimmtes Connexin je nach Zellart abweichende Rollen, abhängig davon, wel-

Derzeit sind 14 verschiedene Erkrankungen bekannt, die von Defekten in Connexinen herrühren

che anderen Connexin-Typen auch noch vorkommen. Verschiedene Mitglieder der Connexin-Familie können sich außerdem zusammenschließen und einen Hybridkanal ausbilden, der die Passage unterschiedlicher molekularer Signale erleichtert.

Bei einigen Connexinen sorgen Defekte allerdings für Beeinträchtigungen in vielen Geweben. So untersuchen wir beispielsweise eine Krankheit namens okulodentodigitale Dysplasie (ODDD), die durch Mutationen im Cx43-Gen verursacht wird. Betroffene weisen eine Reihe unterschiedlicher Symptome auf, etwa kleine Augen, unterentwickelte Zähne, Skelettanomalien im Gesicht und am Schädel sowie Gewebe zwischen den Fingern oder Zehen. Zudem entwickeln manche Patienten eine Hautstörung, die zu verdickten, schwierigen Handinnenflächen und Fußsohlen führt. Aktuelle Studien zum Lebenszyklus von Connexinen haben Hinweise darauf geliefert, warum einige Menschen unter einer schwereren Form der Krankheit leiden als andere.

Bei Patienten mit ODDD wurden mehr als 70 Mutationen in dem Gen gefunden, das für Cx43 kodiert. Wir begannen zu erforschen, was diese Erbgutveränderungen bei dem Protein bewirken und welche Folgen das für den Aufbau der Gap Junctions hat. Laird und seine Kollegen fanden heraus, dass viele der Mutationen zu einem Connexin führen, das zwar bis zur Zellmembran gelangt, dort aber keine funktionsfähigen Gap Junctions bildet: Da durch solche Kontaktstellen in Zellkulturtests kein Farbstoff fließt, werden entweder diese Gap Junction-Kanäle nicht korrekt zusammengebaut oder sie lassen die Moleküle nicht hindurch. So oder so leidet die Kommunikation der Zellen unter den genetischen Veränderungen.

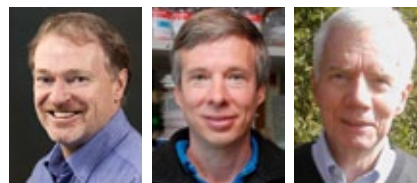
Andere ODDD-Mutationen hingegen verhindern, dass die Connexine die Zellmembran überhaupt erreichen. Davon betroffene Patienten leiden im Allgemeinen unter der schwereren Form der Krankheit, die auch die Haut verändert. Offenbar haben Connexin-Halbkanäle noch eine andere Aufgabe, als Gap Junctions auszubilden. Erfüllen sie diese nicht – was der Fall ist, wenn die Connexine erst gar nicht zur Zellmembran gelangen –, erwachsen daraus schwerwiegendere Probleme. Statt sich zur Kanalbildung zusammenzulagern, könnten beispielsweise manche Halbkanäle Signale freisetzen oder Moleküle aus der Umgebung der Zelle aufnehmen. Solche Aktivitäten von Halbkanälen ließen sich experimentell bereits nachweisen und haben der Rolle der Connexine in der Zellkommunikation eine weitere Dimension hinzugefügt. Künftige Untersuchungen mutierter Halbkanäle könnten neue Ziele für die Behandlung der ODDD oder anderer, mit Connexinen zusammenhängender Erkrankungen aufzeigen. Diese schließen möglicherweise auch bislang nicht identifizierte Moleküle ein, die durch ungekoppelte Halbkanäle in die Zellen gelangen.

Neue Erkenntnisse dazu, wie sich Mutationen auf den Zusammenbau und das Verhalten von Gap Junctions auswirken, könnten zu besonders zielgerichteten Therapien führen, die ohne schwer wiegende Nebenwirkungen helfen. Verändert etwa eine Mutation den Aufbau einer Gap Junction, nicht aber den Transport der Connexine zur Zellmembran, würden

spezifische Arzneimittel die Fähigkeit der Connexine wiederherstellen, einen funktionsfähigen Kanal auszubilden. Solche Therapien könnten die Zell-Zell-Kommunikation reparieren, ohne das mutierte Connexin komplett zu ersetzen. Für Letzteres wäre eine Gentherapie erforderlich, ein immer noch riskanterer Ansatz mit unsicherem Ausgang.

Die Entdeckung krankheitsverursachender Mutationen in Connexinen bietet aber noch mehr als nur viel versprechende therapeutische Ziele. Sie gibt Wissenschaftlern eine neue Sammlung an Werkzeugen zum Erforschen der biologischen Funktionen von Gap Junctions an die Hand. So kennen wir immer noch nicht die spezifischen Moleküle, die über diese Kontaktstellen wandern. Von Herzzellen wissen wir zwar, dass die durch die Gap Junctions fließenden Ionen ein elektrisches Signal vermitteln. Aber es ist noch kaum bekannt, welche Signalstoffe etwa die Funktion des Hörapparats im Ohr oder den Wundheilungsprozess in der Haut unterstützen. Erst wenn wir verstehen, wie sich die Connexin-Kanäle in unterschiedlichen Zellen verhalten und wie Veränderungen im Aufbau und in ihrer Aktivität Krankheiten hervorrufen, werden wir die wirklich grundlegenden Fragen zu dieser intimen Zellkommunikation stellen können: Was genau »erzählen« sich Zellen, und wie regeln diese molekularen Botschaften den Aufbau und Betrieb komplexer Lebewesen – einschließlich des Menschen? ~

DIE AUTOREN



Dale W. Laird (links) ist Professor für Zellbiologie an der University of Western Ontario, **Paul D. Lampe** (Mitte) forscht am Fred Hutchinson Krebsforschungszentrum in Seattle. **Ross G. Johnson** ist emeritierter Professor für Genetik, Zellbiologie und Entwicklung an der University of Minnesota. Er begann bereits in den 1960er Jahren mit der Erforschung von Gap Junctions und beschäftigte sich gemeinsam mit Laird und Lampe über 20 Jahre lang mit ihrem Aufbau und ihrer Regulation.

QUELLEN

Johnson, R.G. et al.: Gap Junction Assembly: Roles for the Formation Plaque and Regulation by the C-Terminus of Connexin43. In: *Molecular Biology of the Cell* 23, S. 71–86, 2012
Solan, J.L., Lampe, P.D.: Specific Cx43 Phosphorylation Events Regulate Gap Junction Turnover in Vivo. In: *FEBS Letters* 588, S. 1423–1429, 2014

WEBLINKS

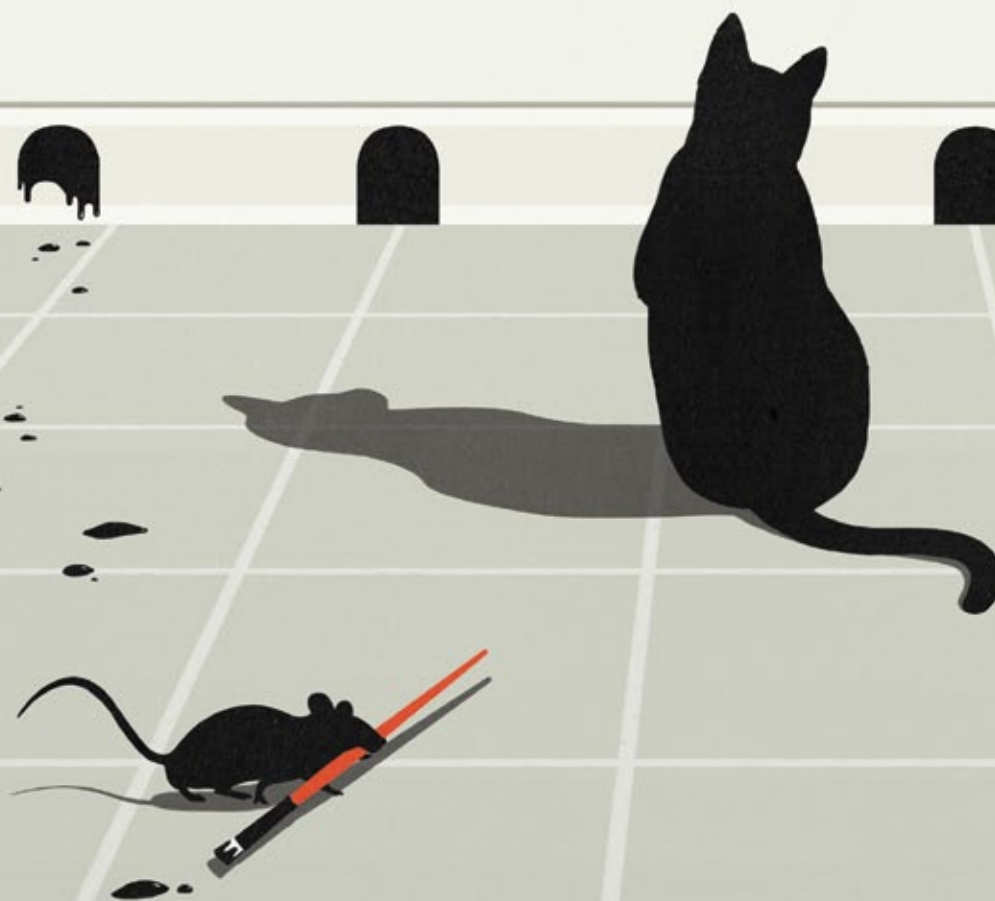
www.ScientificAmerican.com/may2015/gap-junctions
Hier können Sie sich zwei kurze Videos zur Funktion und zum Aufbau von Gap Junctions ansehen.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372763

Der blinde Fleck der Immunabwehr

Wer eine Grippeinfektion überstanden hat, ist gegen die auslösenden Viren weitgehend resistent. Kommt er dann jedoch mit leicht veränderten Erregern in Kontakt, erweist sich die Körperabwehr oft als überraschend ineffektiv. Ein mathematisches Modell zeigt, warum.

Von Adam J. Kucharski



Wie eine Katze, die nur aufgemalte Mauselöcher überwacht, ist auch unser Immunsystem gegen frühere Grippeerreger gewappnet, die womöglich gar nicht mehr existieren.

Krkrankheitserreger fordern gerade Kindern viel ab. Die Kleinen werden in Kitas und Schulen mit diversen Viren und Bakterien konfrontiert, die für ihr Immunsystem neu sind. Deshalb häufen sich bei vielen Kindern kurz nach Beginn des Kitabesuchs die Infekte. Erwachsenen ergeht es besser: Sie haben zahlreiche Kontakte mit unterschiedlichsten Erregern hinter sich und dadurch Immunität gegen viele davon erworben.

Merkwürdigerweise besteht im Fall der Virusgrippe (Influenza) kein solcher Altersvorteil. Untersuchungen zur Grippepandemie von 2009 haben sogar ergeben, dass kleine Kinder tendenziell am widerstandsfähigsten gegen die gerade kursierenden Erreger sind, während die Immunität bei Menschen im mittleren Erwachsenenalter zurückgeht und erst bei Senioren wieder ansteigt. Obwohl Erwachsene also öfter Kontakt zu Influenzaviren hatten als Kinder, reagiert ihr Immunsystem auf eine Ansteckung schwächer.

Zwar kennen Biologen und Mediziner dieses Phänomen schon länger, aber was dahintersteckt, verstehen sie nur unzureichend. Anhaltspunkte liefern nun mathematische Modelle, mit denen sich verschiedene Aspekte der Körperabwehr simulieren lassen. An ihnen untersuchen wir, wie frühere Kontakte zu Grippeviren die Immunantwort auf neue Infektionen beeinflussen und welche Rolle das Alter dabei spielt. Indem wir mathematische Methoden mit epidemiologischen und medizinischen Daten verknüpfen, beginnen wir allmählich die genauen Abläufe der Immunitätsbildung zu durchschauen.

Die entscheidenden ersten Kontakte

Unsere Forschungsarbeiten untermauern die mehr als 50 Jahre alte, recht sonderbar anmutende Hypothese von der »Antigenerbsünde« (englisch: original antigenic sin), wie Mediziner sie nennen. Diese Hypothese hilft zu verstehen, warum Grippeviren, denen man als Kind begegnete, für die Immunabwehr ungleich mehr zählen als spätere Erregerkontakte. Auch erklärt sie, warum einige Bevölkerungsgruppen so unerwartet heftig von früheren Grippewellen betroffen waren. Vielleicht erlaubt sie sogar Prognosen darüber, wie stark bestimmte Altersgruppen von neuen Epidemien betroffen sein werden und wie sich Grippeimpfungen verbessern lassen.

Epidemiologen haben sich in ihren mathematischen Modellen bislang kaum mit Immunreaktionen auf Influenzaviren befasst, denn weil die Erreger sehr variabel sind, lassen sich solche Infektionen schwer simulieren. Meist modellierte man den Krankheitsverlauf bei Infektionen wie den Masern, die von wenig veränderlichen Viren ausgelöst werden, weshalb der Organismus einen lebenslangen Schutz dagegen aufbauen kann. Wer Masern einmal überwunden hat oder dagegen geimpft ist, dessen Immunsystem erkennt das Virus bei neuen Kontakten sofort an den Oberflächenprotei-

nen (den so genannten Antigenen) wieder. Die Körperabwehr produziert daraufhin Waffen wie Antikörper, die zu diesen Antigenen passen, und macht die Eindringlinge unschädlich.

Bei immer wiederkehrendem Kontakt mit Masernerregern sollte die Widerstandsfähigkeit eines Menschen dagegen theoretisch zunehmen – die Aktivität entsprechender Antikörper im Blut müsste sich im Lauf des Lebens verstärken. Untersuchungen an verschiedenen Altersgruppen haben das tatsächlich bestätigt. Ein solches Verhalten kann man mathematisch simulieren. Die Modelle, die wir dabei erhalten, erlauben es nicht nur, beobachtete Phänomene zu reproduzieren, sondern wir können mit ihrer Hilfe auch biologische Vorgänge studieren, die sich auf Grund ihrer Komplexität oder aus ethischen Gründen kaum experimentell darstellen lassen. Beispielsweise können wir untersuchen, wie eine Infektionswelle die Immunität einer Population beeinflusst, ohne Menschen dem Erreger wirklich auszusetzen.

Im einfachsten epidemischen Modell teilt man eine Population in drei Gruppen ein. Die erste ist für die betrachtete Infektion empfänglich und könnte noch erkranken, die zweite ist bereits krank, die dritte hat die Infektion überwunden und ist nun immun dagegen. Mit solchen Modellen untersuchten der Epidemiologe Roy M. Anderson und der Biologe und Physi-

ker Robert McCredie May in den 1980er Jahren, wie empfindlich verschiedene Altersgruppen gegenüber Krankheiten wie den Masern sind. Dabei erkannten sie, dass die Immunität bei jüngeren Altersgruppen in der Realität schneller zunimmt als nach den Drei-Gruppen-Modellen zu erwarten wäre. Die Wissenschaftler vermuteten daher, dass Kinder dem Erreger öfter begegnen als Menschen anderer Altersgruppen, weil sie mehr soziale Kontakte haben als diese. Und tatsächlich: Veränderten die Teams ihre Modelle in Richtung eines höheren Infektionsrisikos während des Kindesalters, passten die Simulationsergebnisse besser zu den Beobachtungen.

Weil Grippeviren sehr variabel sind, lassen sich Infektionen mit ihnen schwer simulieren

AUF EINEN BLICK

ZU FRÜH FESTGELEGT

1 Virale Infektionen können lebenslange Immunität gegenüber dem jeweiligen Erreger verleihen, etwa im Fall der Masern. Bei **Grippeviren** ist das anders: Sie **mutieren** häufig und treten daher von Jahr zu Jahr in **neuen Varianten** auf.

2 Die Körperabwehr tut sich mit den veränderlichen Grippeerregern schwer. Das Konzept der **Antigenerbsünde** erklärt, warum: Virenstämme, denen ein Mensch früh ausgesetzt ist, **prägen** dauerhaft seine Immunreaktion. Das beeinträchtigt die Fähigkeit des Organismus, andere Stämme zu bekämpfen.

3 Für die These der Antigenerbsünde gibt es empirische Belege; sie wird aber auch von **mathematischen Modellen** untermauert.

Leider lässt sich die Immunität gegenüber Influenzaviren nicht so leicht beschreiben. Denn diese mutieren sehr schnell und können von Jahr zu Jahr mit anderer Antigenausstattung auftreten. Das macht es für den Organismus schwerer, sie wiederzuerkennen. Die hohe Mutationsrate der Grippeviren ist der Grund, warum der Grippeimpfstoff jährlich aktualisiert werden muss.

Anfällige Erwachsene

Als ich erstmals die Daten zur Grippeepidemie von 2009 sah, begann ich darüber nachzudenken, wie die Altersverteilung der Immunität zu Stande kommt: hoch bei Kindern, niedrig bei Erwachsenen mittleren Alters, erneut hoch bei Betagten. Wenn Kinder viel Kontakt zueinander haben, so meine Überlegung, und deshalb mit zahlreichen Erregern konfrontiert werden, sollten sie nach und nach eine immer bessere Immunität aufbauen. Sie sollten ein Immungedächtnis entwickeln mit der Fähigkeit, auf die meisten zirkulierenden Viren zu reagieren.

Nach Schulzeit und Studium haben jedoch die meisten Menschen weniger Kontakte zu anderen als zuvor. Daher fangen sie sich nun seltener ein Grippevirus ein. Folglich greift ihr Immunsystem, wenn es auf Ansteckungen reagiert, verstärkt auf Antikörper aus der Kindheit zurück. Die wirken aber wegen der häufigen Veränderungen des Virus jetzt nicht mehr so effektiv wie früher. Zu erwarten wäre also, dass die Influenzaimmunität im mittleren Alter statistisch sinkt – auch weil viele Erwachsene nicht regelmäßig an Grippeimpfungen teilnehmen. Der erneute Anstieg im höheren Alter wiederum könnte daran liegen, dass Senioren sich relativ oft impfen lassen, was ihre Ausstattung mit Antikörpern laufend aktualisiert.

Soweit die Hypothese. Doch wie lässt sie sich im mathematischen Modell prüfen? Weil Influenzaviren sehr variabel sind, kann eine Person gegen einen bestimmten Virusstamm völlig immun sein, gegen einen anderen nur eingeschränkt und gegen einen dritten überhaupt nicht. Daher muss man bei einschlägigen Untersuchungen genau wissen, welchen Virusstämmen jemand ausgesetzt war und in welcher Reihenfolge. Und hier wird es wegen der vielen Kombinationsmöglichkeiten knifflig. Angenommen, es zirkulierten in der betrachteten Zeitspanne 20 verschiedene Stämme: Dann sind für einen individuellen Menschen theoretisch 2^{20} –

mehr als eine Million – unterschiedliche »Infektionsgeschichten« denkbar. Bei 30 Stämmen sind es mehr als eine Milliarde.

Mit diesem Problem habe ich mich in meiner Doktorarbeit an der University of Cambridge befasst, gemeinsam mit meiner Betreuerin Julia Gog. Wir überlegten: Kommt ein Mensch Jahr für Jahr mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit mit Grippeerregern in Kontakt, dann sollten seine Ansteckungsrisiken den verschiedenen Stämmen gegenüber voneinander unabhängig sein. Wenn wir also die Wahrscheinlichkeit dafür ermitteln wollen, dass ein Mensch eine bestimmte Kombination von Infekten erleidet, müssen wir nur die Ansteckungsrisiken gegenüber allen diesen Stämmen miteinander multiplizieren.

Doch als wir jene Annahme in das Modell einfließen ließen und rechneten, erhielten wir keineswegs die erwarteten Ergebnisse, sondern etwas ziemlich Verrücktes: War jemand mit einem Virusstamm in Kontakt gekommen, dann war er mit größerer Wahrscheinlichkeit auch mit einem zweiten konfrontiert gewesen. Genauso gut könnte man behaupten: Vom Blitz getroffen worden zu sein, macht eine Influenzainfektion wahrscheinlicher. Ein anscheinend absurdes Resultat.

Der Grund dafür erwies sich als simpel – wir hatten das Lebensalter nicht berücksichtigt. Angenommen, Infektionen ereignen sich mit halbwegs gleich bleibender Häufigkeit, dann steigt mit dem Alter die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Person wenigstens einmal mit Influenza infiziert gewesen ist. Greift man also einen beliebigen Menschen heraus und erfährt, er habe bereits eine Grippeerkrankung hinter sich (oder einen Blitzschlag), weiß man sofort, dass dieser Mensch eher älter als jünger ist. Und das macht es wahrscheinlicher, dass er noch andere Missgeschicke erlebt hat, etwa die Infektion mit einem zweiten Virusstamm.

Die Rolle der sozialen Kontakte

Wenn wir die Altersklassen separat behandelten, waren die Infektionen wieder voneinander unabhängig, übereinstimmend mit unseren Ausgangsüberlegungen. Das Modell schien somit brauchbar zu sein. Wir begannen damit zu simulieren, wie sich die Grippeimmunität eines Menschen im Lauf seines Lebens verändert. Hierbei berücksichtigten wir nicht nur die hohe Mutationsrate des Grippevirus, sondern auch den Umstand, dass das Infektionsrisiko in jeder Altersgruppe von der (durchschnittlichen) Zahl sozialer Kontakte abhängt, über die epidemiologische Untersuchungen Auskunft geben.

Leider reproduzierte unser Modell den Rückgang der Immunität im mittleren Alter nicht korrekt. Immerhin lieferte es für Kinder eine stärkere Immunität als für Erwachsene, entsprechend den Beobachtungen. Doch während der Antikörperspiegel im Blut laut empirischen Daten schon zwischen dem 5. und 10. Lebensjahr abzufallen beginnt, setzte er in unseren Modellrechnungen erst zwischen dem 15. und 20. Lebensjahr ein, also erst nach der Schulzeit mit ihren vielen sozialen Begegnungen.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

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

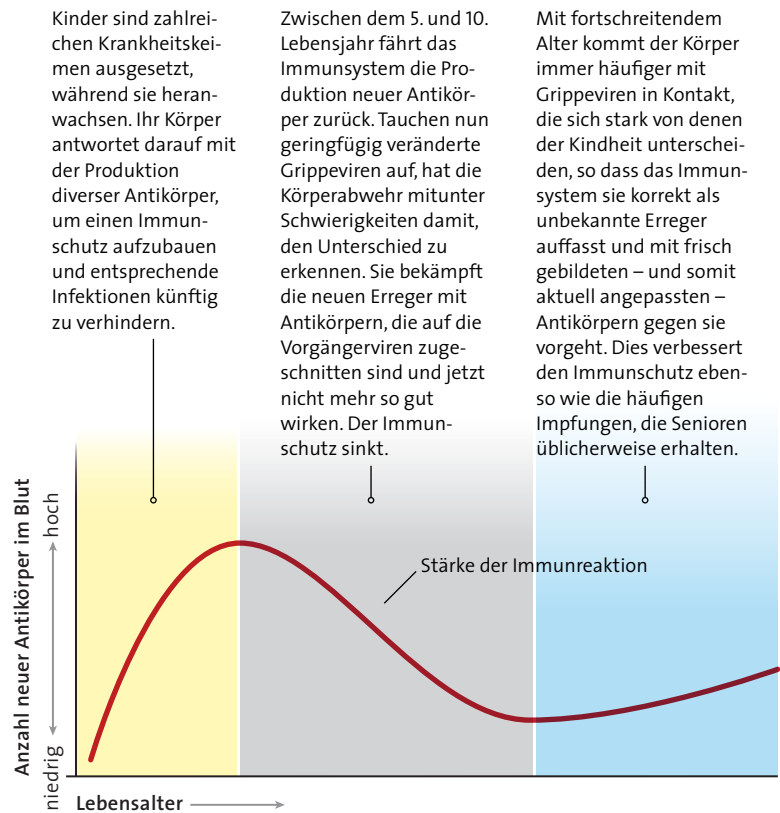
www.spektrum.de/t/grippe



CGC/FREDERICK MURPHY

Der erste Eindruck zählt

Wenn Viren eines bestimmten Typs einen Organismus infizieren und es diesem gelingt, sie zu besiegen, baut sein Immunsystem oft einen lebenslangen Schutz vor ihnen auf. Erwachsene besitzen deshalb meist eine stärkere Körperabwehr als Kinder und werden seltener krank. Das gilt allerdings nicht im Fall der Grippe (Grippe). Zwar nimmt die Grippeimmunität während der Kindheit erwartungsgemäß zu, sinkt aber im mittleren Lebensalter wieder ab. Eine mögliche Erklärung hierfür lautet, das Immunsystem eines Erwachsenen sei von den Erregern seiner Kindheitstage geprägt – und übersehe, dass die aktuellen Viren sich von diesen leicht unterscheiden. Es reagiere auf neue Influenzainfektionen deshalb mit veralteten Verteidigungswaffen.



SCIENTIFIC AMERICAN, NACH KUCHARSKAJ, GÖC, JR., THE ROLE OF SOCIAL CONTACTS AND ORIGINAL ANTIGENIC SIN IN SHAPING THE AGE PATTERN OF IMMUNITY TO SEASONAL INFLUENZA IN PLOS COMPUTATIONAL BIOLOGY 8, E1002741, 2012, FIG. 2

Ich habe mich mit zahlreichen Kollegen darüber ausgetauscht, wie sich Immunitätsbildung modellieren lässt. Eine von ihnen war die Evolutionsbiologin Andrea Graham von der Princeton University in New Jersey, die mich mit dem Konzept der Antigenerbsünde bekannt machte. Obgleich umstritten, erschien es mir interessant genug, um es versuchsshalber in unser Modell einzubauen. Ich war gespannt, ob die Berechnungen dann realitätsnähere Ergebnisse liefern würden.

Der Begriff Antigenerbsünde spielt auf den Sündenfall von Adam und Eva an, der all ihre Nachfahren belastet, und bezieht sich auf das erste Zusammentreffen eines unberührten Immunsystems mit einem gefährlichen Pathogen. Das Konzept besagt: Falls die Körperabwehr aus dieser Begegnung siegreich hervorgeht, ist sie davon so stark geprägt, dass sie auf jede weitere Infektion mit den gleichen Antikörpern reagiert. Selbst wenn, wie bei den Grippeviren, ein veränderter Erreger erscheint, greift der Organismus zu den ursprünglich bewährten Waffen, obwohl diese eigentlich nicht mehr so recht passen. Nicht nur das, zudem scheint er die Aktivität noch ungeprägter Immunzellen zu unterdrücken, die lernen könnten, spezifisch auf die neuen Erreger zu reagieren – uns das macht die eigentliche »Erbsünde« aus.

Als Erster stieß 1947 der amerikanische Virologe Thomas Francis junior auf dieses Problem. Trotz eines groß angelegten Grippeimpfprogramms im Jahr zuvor erkrankten Stu-

denten der University of Michigan an Infektionen mit einem neuen, jedoch verwandten Influenzastamm. Als Francis die Immunität gegenüber den Viren des Impfstoffs mit jener gegenüber den neuen Viren verglich, stellte er fest, dass die Studenten wirksame Antikörper besaßen, um die ersten zu attackieren, nicht aber die letzten.

Mit alten Waffen gegen neue Feinde

Diese merkwürdige Beobachtung versuchte Francis so zu erklären: Das Immunsystem entwickle nicht für jedes neue Virus, mit dem es konfrontiert werden, eigene Antikörper. Sondern es bekämpfe Erreger, die bereits besiegten Eindringlingen ähneln, mit dem gleichen Waffenarsenal wie diese. Virenstämme, die in der Vergangenheit zirkulierten, und die Reihenfolge, in der man sich mit diesen infizierte, könnten also einen großen Einfluss darauf haben, wie gut ein Mensch spätere Varianten des Erregers zu bekämpfen vermag.

In den 1960er und 1970er Jahren stießen Wissenschaftler auf weitere Belege für dieses Phänomen. Seither haben andere Studien es wieder in Frage gestellt. 2008 untersuchten Forscher der Emory University (Georgia, USA) die Antikörperspiegel von gesunden, erwachsenen Freiwilligen, die gegen Grippe geimpft worden waren, und stellten fest, dass deren Immunsystem durchweg effektiv auf Virusinfektionen reagiert. Ein Jahr später jedoch berichtete ein anderes Team derselben Universität, geleitet von dem Immunologen Joshy

Jacob: Infiziert man Mäuse mit lebenden Grippeviren statt mit inaktivierten Erregern, wie sie in Impfstoffen typischerweise zum Einsatz kommen, dämpft das die Immunreaktion auf andere Virusstämme – so, wie es nach dem Prinzip der Antigenerbsünde zu erwarten ist.

Jacob und seine Kollegen vermuteten, dieser Mechanismus liege in den so genannten B-Gedächtniszellen begründet. Jene Zellen bringen einen Teil der Immunantwort hervor. Während einer Infektion werden sie darauf programmiert, die Erreger zu erkennen und Antikörper dagegen zu produzieren. Nachdem der Körper die Erreger besiegt hat, verbleiben einige diese spezifischen B-Zellen im Körper – jederzeit bereit, neue Antikörper freizusetzen, falls dieselbe Gefahr wieder auftaucht. Jacob zufolge könnte eine Infektion mit lebenden Influenzaviren bereits vorhandene Gedächtniszellen aktivieren, wohingegen die Programmierung neuer B-Zellen weitgehend unterbleibt.

Angenommen, man ist im zurückliegenden Jahr mit Influenza infiziert gewesen und hat sich im aktuellen Jahr ein leicht verändertes Grippevirus eingefangen. Da die B-Gedächtniszellen über »startbereite« Antikörper gegen das ähnliche Vorjahresvirus verfügen, setzen sie diese sofort gegen den aktuellen Erreger ein – noch bevor der Körper neue B-Zel-

len gebildet hat, deren Antikörper auf den diesjährigen Keim zugeschnitten sind. Das entspricht dem bekannten Bonmot über die Generäle, die stets den vorherigen Krieg führen, insbesondere wenn sie ihn gewonnen haben. Auch unser Immunsystem stützt sich bei der Gefahrenbekämpfung stärker auf bewährte Strategien als darauf, neue zu entwickeln – vor allem, falls die ersten noch einigermaßen erfolgreich sind.

Während der Endphase meiner Doktorarbeit nahmen wir den Mechanismus der Antigenerbsünde in unser Modell auf und simulierten erneut die zeitliche Entwicklung der Immunität. Jetzt gab das Modell deren Rückgang in der Lebensmitte korrekt wieder. Wie im wirklichen Leben setzte sie in der Simulation nun nach dem siebten Lebensjahr ein, wenn die meisten Menschen bereits mindestens eine Grippeinfektion hinter sich haben. Von da an, so lassen sich die Ergebnisse der Berechnungen interpretieren, beeinträchtigt die Immunität gegenüber früheren Erregern die Körperabwehr darin, auf neue Viren zu reagieren.

Uns ist noch nicht völlig klar, warum die Widerstandsfähigkeit bei älteren Menschen wieder zunimmt. Dies könnte das Ergebnis einer höheren Durchimpfung bei Senioren sein. Vielleicht leben diese Menschen aber auch schon so lang, dass alle neuen Virusstämme, mit denen sie in Kontakt kom-

Immun für immer

Jedes Jahr zur Grippeimpfung? Das wird wohl nicht ewig so bleiben: Ein Impfstoff könnte dauerhaften Schutz vor allen Grippestämmen bieten – sogar vor bisher unbekanntem Erregern.

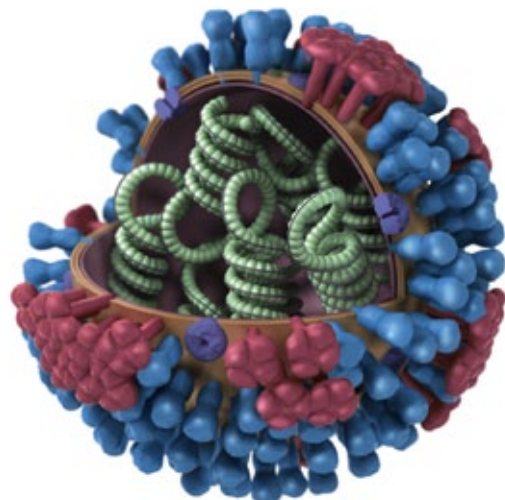
Von Lars Fischer

Alle Jahre wieder lesen die Seuchenexperten in der Kristallkugel: Welche Influenzasubtypen werden nächstes Jahr wahrscheinlich am häufigsten zirkulieren – und müssen deswegen im neuen Impfstoff erfasst werden? Das Immunsystem reagiert auf Strukturen am oberen Teil des Virusproteins Hämagglutinin (HA) – jenes Eiweißstoffs, für den das H in der Typbezeichnung der Viren steht. Diese Region aber unterscheidet sich nicht nur bei einzelnen Subtypen, sondern verändert sich auch im Lauf der Zeit, und so wird jedes Jahr eine neue Impfung gegen die Grippe fällig.

Theoretisch müsste das aber nicht sein. Bei allen Unterschieden zwischen den Influenzaviren gibt es immer noch so viele Gemeinsamkeiten ihrer Außenmoleküle, dass ein sorgfältig ge-

wählter Impfstoff wirklich alle Typen abdecken könnte. Tatsächlich gibt es so etwas bereits: Seit ein paar Jahren kennt man so genannte breitneutralisierende Antikörper, die an viele unterschiedliche Influenzaviren binden. Das können sie, weil sie an eine Region der Virushülle andocken, in der sich die verschiedenen Typen sehr stark ähneln. Dass man dieses Prinzip tatsächlich

3-D-Modell eines Influenzavirus: Die Virushülle enthält die Oberflächenmoleküle Hämagglutinin (blau), Neuraminidase (rot) und Matrixproteine (lila). Im Virusinneren befindet sich das einzelsträngige RNA-Genom (grün). Die zufällige Veränderung der Oberflächenmoleküle ist für die jährlich veränderten Virustypen verantwortlich. Diese Veränderungen kommen durch die natürliche Vervielfältigung des Virus zu Stande und erschweren so seine medizinische Bekämpfung.



CDC/DAN HIGGINS

men, sich deutlich von denen ihrer Kindheit unterscheiden – weshalb die ursprüngliche Prägung ihres Immunsystems nicht mehr greift. In jedem Fall legen unsere Ergebnisse nahe: Die Antigenerbsünde kommt als Grund für den seltsamen Lebensverlauf der Immunität eher in Frage als die Anzahl der sozialen Kontakte.

Löchriger Schutz

Ausgehend von diesen Erkenntnissen fragten wir uns, ob fehlgeleitete Immunreaktionen auch beeinflussen können, wie heftig eine Epidemie ausfällt. Laut unserem Modell lautet die Antwort Ja: Hin und wieder kam es in den Simulationen zu großen Infektionswellen durch Erreger, die sich nur wenig von Viren des Vorjahres unterschieden. Anscheinend hinterlässt die Antigenerbsünde mitunter Lücken im Immunschutz bestimmter Altersgruppen – die Körperabwehr reagiert auf neue Keime dann mit unpassenden Antikörpern.

Die besten historischen Belege für diese These stammen aus dem Jahr 1951, als eine tödliche Grippewelle die englische Stadt Liverpool erfasste. Hinsichtlich ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit und Mortalität stellte sie sowohl die spanische Grippe von 1918 in den Schatten als auch die asiatische (1957) und die Hongkong-Grippe (1968). Nach wie vor

ist nicht geklärt, warum dieser Ausbruch so heftig war. Bislang galt als logischste Erklärung, der Virenstamm von 1951 müsse sehr verschieden von dem des Vorjahres gewesen sein, so dass die Menschen über keinen wirksamen Immunschutz verfügten. Es gibt aber kaum Belege hierfür. Zudem variierte das Ausmaß der Epidemie abhängig von der Region – nicht nur im Vereinigten Königreich sondern ebenso anderswo. England und dort vor allem Liverpool sowie Wales waren schwer betroffen, während beispielsweise die USA gegenüber dem Vorjahr nur eine leicht erhöhte Grippemortalität verzeichneten. Auch in jüngerer Zeit erlebte das Vereinigte Königreich dramatische Grippeausbrüche in den Jahren 1990 und 2000, wieder ohne nennenswerten Hinweis darauf, dass in diesen Jahren besonders ungewöhnliche Virenstämme zirkuliert seien.

Unser mathematisches Modell kann zeitliche Verläufe erzeugen, die denen der Grippewellen von 1951, 1990 und 2000 ähneln. Unter Berücksichtigung der Antigenerbsünde beeinflusst die Reihenfolge, in der verschiedene Grippevirenstämme eine bestimmte Altersgruppe infizieren, wie resistent deren Mitglieder gegenüber künftigen Infektionen sind. Anders ausgedrückt, wenn eine Grippewelle ausbricht, hat jede geografische Region ihr eigenes Immunprofil, das sich von

für einen Universalimpfstoff nutzen kann, haben kürzlich die Ergebnisse zweier internationaler Arbeitsgruppen gezeigt.

Die breitneutralisierenden Antikörper lassen den variablen Kopf des Hämagglutinins links liegen und halten sich an den so genannten Stiel. Dieser Abstandhalter zwischen Kopf und Virus-hülle ist nicht nur bei allen Influenzaviren erstaunlich ähnlich, er verändert sich zudem über evolutionäre Zeiträume kaum – das perfekte Ziel für einen Impfstoff gegen alle Grippeviren.

Wissenschaftler müssen allerdings erst das Problem lösen, dass der Stiel für die normale Immunreaktion nur eine untergeordnete Rolle spielt, denn er ist im Gegensatz zum Kopf vergleichsweise schlecht zu erreichen. Ein universeller Impfstoff muss daher den Stiel besonders prominent präsentieren. Dafür gibt es eine einfache Lösung: ab mit dem Kopf! Doch kürzt man das Gen so, dass die kodierenden Abschnitte für den Kopf fehlen, ändert sich die Struktur des Stiels sehr stark.

Um das zu vermeiden, bauten Forscher um Barney Graham von den National Institutes of Health in den USA das Protein nach und nach um. Mit einer einfachen Verbindung ersetzten sie den Kopf, zusätzlich stabilisierten sie die Struktur mit einem neu eingebrachten Molekülteil. Mit Antikörpern, die auf den Stiel zugeschnitten waren, prüfte Grahams Team nach jedem Schritt, ob die Struktur intakt geblieben war. Nach mehreren Runden hatte die Gruppe ein HA-Stiel-Konstrukt erhalten, das an Ferritinnanopartikel gebunden sowohl Mäuse als auch Frettchen erfolgreich vor dem Virussubtyp H5N1 schützte – obwohl das Ausgangsmolekül von einem nur entfernt verwandten H1N1-Erreger stammte.

Ein zweites Team um Antonietta Impagliazzo vom niederländischen Pharmaunternehmen Janssen verfolgte einen anderen, eher evolutionären Ansatz. Die Forscher veränderten das Hämagglutinin eines H1N1-Erregers einerseits gezielt in die gewünschte Richtung, andererseits erzeugten sie aber mit zufälligen Mutationen ganze Molekülfamilien, aus denen sie wiederum mit stiel-spezifischen Antikörpern die aussichtsreichsten Kandidaten herausfilterten. Das Ergebnis hier war ebenfalls ermutigend: Mäuse, die mit dem Konstrukt behandelt wurden, erwiesen sich als geschützt vor H1-Subtypen (zu diesen zählte unter anderem der Erreger der spanischen Grippe) ebenso wie vor der Vogelgrippe H5N1. Auch Makaken, die damit immunisiert worden waren, kamen mit dem potenziell tödlichen Vogelgrippevirus besser zurecht. Zwar liegt ein künftiger Universalimpfstoff gegen die Grippe immer noch in recht ferner Zukunft. Doch der Weg dorthin ist nun deutlich erkennbar.

Lars Fischer ist Chemiker und Mitarbeiter bei »Spektrum.de«.

QUELLEN

Impagliazzo, A. et al.: A Stable Trimeric Influenza Hemagglutinin in Stem as a Broadly Protective Immunogen. In: Science 349, S. 1301–1306, 2015

Yassine, H.M. et al.: Hemagglutinin-Stem Nanoparticles Generate Heterosubtypic Influenza Protection. In: Nature Medicine 21, S. 1065–1070, 2015



Gefährliche Influenza: In den 1930er Jahren mussten Mediziner ganze Zeltlager errichten, um die Opfer von Grippewellen zu behandeln.

dem der Nachbarregionen unterscheidet – mit spezifischen »blinden Flecken« der Körperabwehr. Schwere Infektionswellen wie die in Liverpool könnten von solchen regionaltypischen blinden Flecken verursacht worden sein.

Forschungsarbeiten über Grippeimmunität haben häufig ziemlich spezielle Aspekte im Blick, etwa die Effektivität eines bestimmten Impfstoffs oder das Ausmaß der jährlichen Epidemie. Doch diese Probleme sind in Wirklichkeit nur Teilaspekte viel größerer Fragen: Wie entwickeln und bewahren wir Immunität gegenüber Grippeviren und anderen Erregern, die ihre Antigenausstattung laufend verändern? Können wir besser verstehen, welche evolutionären Veränderungen Grippeerreger durchlaufen und wie sie sich ausbreiten?

Projekte wie die Studie »FluScape« in Südchina widmen sich diesen Fragen. Vorläufigen Ergebnissen zufolge, publiziert von Justin Lessler von der Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health (USA), muss das Konzept der Antigenersünde verfeinert werden. Laut den Forschern verhält es sich nicht so, dass einfach der erste Virenstamm, mit dem ein Individuum in Kontakt kommt, die Immunantwort bestimmt. Vielmehr scheint der Erwerb einer Grippeimmunität einer Hierarchie zu folgen. Die Wissenschaftler vermuten, dem ersten Stamm, mit dem ein Mensch konfrontiert werde, komme die wichtigste Position beim Prägen der Immunreaktion zu. Der zweite Stamm bringe dann eine etwas schwächere Antwort hervor, gefolgt von einer noch schwächeren Reaktion auf den dritten und so weiter. Das Ganze gelte aber nur für stark wandlungsfähige Erreger wie eben Grippeviren.

Da die Wissenschaftler der FluScape-Studie lediglich aktuell entnommene Blutproben analysierten, erlauben die Studienergebnisse keinen Aufschluss darüber, wie sich die Antikörperspiegel im Lauf der Zeit verändern. Im August 2013 jedoch untersuchten Forscher der Icahn School of Medicine at Mount Sinai (New York City) eine Reihe von Blutproben, die über 20 Jahre hinweg insgesamt 40 Personen entnommen

worden waren. Ihre Daten unterstützen die Vorstellung einer hierarchischen Grippeimmunität. Jede neue Influenzainfektion lässt demnach die Spiegel verschiedener Antikörper gegen Stämme des Vorjahrs in die Höhe schießen. Das Immunsystem initiiert den Auswertungen zufolge stärkere Reaktionen gegenüber Viren, mit denen es früher konfrontiert wurde, und schwächere gegenüber später aufgetretenen Erregern.

Seit einigen Jahren arbeite ich mit dem FluScape-Team zusammen, um nach Mustern in dem Datenmaterial aus China zu suchen. Daraus könnten aufschlussreiche Hinweise erwachsen, wer gegenüber welchen Virenstämmen anfällig ist und wie das auf die Evolution der Erreger zurückwirkt. Mit neuen Modellen und besseren Daten werden wir dann nach und nach offenlegen, wie Individuen und Populationen ihre spezifischen Grippeimmunitäten entwickeln. ~

DER AUTOR



Adam J. Kucharski forscht über die Epidemiologie von Infektionskrankheiten an der London School of Hygiene and Tropical Medicine.

QUELLEN

Kucharski, A.J. et al.: Estimating the Life Course of Influenza A(H3N2) Antibody Responses from Cross-Sectional Data. In: *PLoS Biology* 13, e1002082, 2015

Kucharski, A.J. et al.: The Contribution of Social Behaviour to the Transmission of Influenza A in a Human Population. In: *PLoS Pathogens* 10, e1004206, 2014

Kucharski, A.J., Gog, J.R.: The Role of Social Contacts and Original Antigenic Sin in Shaping the Age Pattern of Immunity to Seasonal Influenza. In: *PLoS Computational Biology* 8, e1002741, 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372760

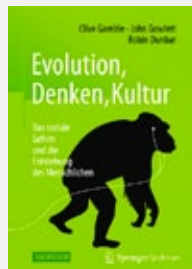


Geschenktipps zum Weihnachtsfest



2015, XXI, 395 S. 8 Abb. Geb.
 € (D) 24,99 | € (A) 25,69 | *sFr 26.50
 ISBN 978-3-662-47115-9
 € 19,99 | *sFr 21.00
 ISBN 978-3-662-47116-6 (eBook)

B. Little
Mein Ich, die anderen und wir
 Die Psychologie der Persönlichkeit und die Kunst des Wohlbefindens



2016, XIV, 376 S. 57 Abb. Geb.
 € (D) 24,99 | € (A) 25,69 | *sFr 26.50
 ISBN 978-3-662-46767-1
 € 19,99 | *sFr 21.00
 ISBN 978-3-662-46768-8 (eBook)

C. Gamble, J. Gowlett, R. Dunbar
Evolution, Denken, Kultur
 Das soziale Gehirn und die Entstehung des Menschlichen



2016, XXIX, 326 S. 27 Abb. Geb.
 € (D) 24,99 | € (A) 25,69 | *sFr 26.50
 ISBN 978-3-662-47053-4
 € 19,99 | *sFr 21.00
 ISBN 978-3-662-47054-1 (eBook)

G.A. Haugen, V. Boutros
Gewalt – die Fessel der Armen
 Worunter die Ärmsten dieser Erde am meisten leiden – und was wir dagegen tun können



2015, XIV, 442 S. 40 Abb. Geb.
 € (D) 24,99 | € (A) 25,69 | *sFr 31.50
 ISBN 978-3-662-45054-3
 € 19,99 | *sFr 25.00
 ISBN 978-3-662-45055-0 (eBook)

T. Cox
Das Buch der Klänge
 Eine Reise zu den akustischen Wundern der Welt



2014, XVIII, 317 S. 85 Abb. Geb.
 € (D) 24,99 | € (A) 25,69 | *sFr 31.50
 ISBN 978-3-662-43420-8
 € 19,99 | *sFr 25.00
 ISBN 978-3-662-43421-5 (eBook)

E. Frenkel
Liebe und Mathematik
 Im Herzen einer verborgenen Wirklichkeit



2015, XXI, 210 S. 7 Abb. Geb.
 € (D) 24,99 | € (A) 25,69 | *sFr 31.50
 ISBN 978-3-662-45117-5
 € 19,99 | *sFr 25.00
 ISBN 978-3-662-45118-2 (eBook) (eBook)

T. Birkhead
Die Sinne der Vögel
 oder Wie es ist, ein Vogel zu sein

€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7 % MwSt. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10 % MwSt. Die mit * gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

Jetzt bestellen: springer.com/shop

Tomaten, die schön aussehen und haltbar sind, müssen nicht fad schmecken. Gezielte genetische Analysen von Pflanzen und Samen zusammen mit herkömmlicher Kreuzung machen es möglich, ihnen die früheren Aromen wiederzugeben, ohne auf die »praktischen« Eigenschaften verzichten zu müssen.



PFLANZENZUCHT

Köstliche Früchte ohne Gentechnik

Oft sehen Obst und Gemüse zwar verlockend aus, doch der Geschmack lässt zu wünschen übrig. Jetzt können Züchter ihn wieder in die Früchte zaubern: mit genetischen Tricks – aber ganz ohne Gentechnik!

Von Ferris Jabr

Das Obst und Gemüse in Supermärkten soll vor allem das Auge ansprechen und allein durch das Aussehen zum Kauf verleiten. Später sind wir oft enttäuscht: Die Tomaten oder Erdbeeren schmecken fad und langweilig. Denn die Züchter haben Sorten entwickelt, die lange Transportwege überstehen und sich einige Zeit lagern lassen, ohne gleich zu verderben. Dadurch ging viel vom ursprünglichen Aroma und Geschmack verloren und leider auch vom Nährstoffgehalt.

Ein treffliches Beispiel hierfür sind Warzen- oder Cantaloupemelonen, eine Kulturvarietät der Zuckermelonen. Vollreif geerntet und frisch gegessen schmecken sie köstlich, werden jedoch sehr schnell weich und matschig. Das liegt am Pflanzenhormon Ethylen, das die Reife herbeiführt – ein Prozess, der nicht beim uns genehmen Stadium stoppt. Selbst eisgekühlt halten sich diese Melonen nicht. Deswegen wurden Sorten gezüchtet, die nur wenig Ethylen bilden und somit haltbar sind. Allerdings bekommen sie auch nie das volle Aroma.

In den 1990er Jahren gelang den Züchtern jedoch ein Kompromiss: Dominique Chambeyron vom niederländischen Saatgutproduzenten De Ruiters erzeugte eine kleine gestreifte Cantaloupemelone namens Melorange, die nach der Ernte wochenlang fest bleibt und trotzdem schmeckt. Für die USA

wird diese Kulturvarietät in Mittelamerika angebaut und in den Wintermonaten verkauft, wenn Melonen im Norden nicht wachsen.

Auf herkömmliche Weise waren solche Zuchten bisher sehr langwierig und aufwändig. Bis man schließlich eine Pflanze mit allen wesentlichen gewünschten Attributen erhält, können leicht zehn Jahre und mehr verstreichen. Auch spielt dabei Zufall eine Rolle: In der Regel kreuzt man Kultursorten miteinander, die einzelne der angestrebten Merkmale aufweisen. Danach gilt es abzuwarten, ob zumindest einige der Nachkommen bereits Früchte von insgesamt etwas günstigerer Qualität hervorbringen. Deren Samen werden dann weiterverwendet, die neuen Pflanzen wiederum mit anderen geeigneten Sorten gekreuzt und so fort.

Doch mittlerweile beschleunigen molekulargenetische Analyseverfahren den Zuchtprozess deutlich. Bei Monsanto, zu dem De Ruiters seit 2008 gehört, können Jeff Mills und seine Kollegen bereits anhand der Samenkörner Eigenschaften der späteren Melonen vorhersagen. Zunächst hatten die Forscher mit Hilfe von genetischen Markern – charakteristischen DNA-Abschnitten – die Gene für den Geschmack und die Konsistenz von Melorange eingekreist. Nun können sie sie damit in den Samen aufspüren. Diese Durchmusterung geschieht weitgehend automatisiert. Ein Roboter säbelt ein winziges Scheibchen von einem Melonenkern ab – so wenig, dass dieser später trotzdem noch keimt. Weitere Geräte extrahieren aus der Probe DNA, markieren die relevanten genetischen Sequenzen mit fluoreszierenden Molekülen und vervielfältigen sie, so dass Messgeräte sie erkennen und somit die entscheidenden Gene indirekt anzeigen.

Eigentlich ist die markergestützte Zucht gar nicht so neu – also eine Präzisionszucht mit Hilfe von markergestützter Selektion, englisch auch »SMART Breeding« genannt. (Die Abkürzung steht für »Selection with Markers and Advanced Reproductive Technologies«.) Nur kann sie heute von der im Lauf des letzten Jahrzehnts zunehmend schneller und billiger gewordenen genetischen Sequenzierung profitieren. Bei Monsanto arbeiten die dazu eingesetzten Roboter rund um

AUF EINEN BLICK

NEUE IDEEN ZUM SAMENVERTRIEB

1 Neue Zuchtmethoden können Obst und Gemüse des Großhandels wieder schmackhafter machen, ohne das Erbgut gentechnisch zu manipulieren. Dies gelingt durch **traditionelle Verfahren** in Kombination mit **DNA-Analysen**.

2 Könnten Pflanzenzüchter an Universitäten ihre Erzeugnisse früher den Landwirten zur Verfügung stellen, so sind sie heute oft gezwungen, sie **Großkonzernen** zu verkaufen, die dann ein Monopol darüber vertreten. Mit einem neuen Ansatz nach dem **Open-Source-Prinzip** könnten zumindest einige der neuen Pflanzensorten frei zugänglich werden.

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



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



FOTO: MARCO TESSIERI

die Uhr, und bei Bedarf erhalten die Züchter die Ergebnisse binnen zwei Wochen. Auf markergestützte Selektion greifen denn auch mittlerweile viele Firmen und Forschungsinstitute zurück, um Obst oder Gemüse gewünschte Eigenschaften zu verpassen. Einige neue Produkte sind bereits auf dem Markt, etwa ein besonders gesunder Brokkoli.

»Die Genomik spielt in die moderne Pflanzenzucht so stark hinein, dass ich kaum noch richtig mitkomme«, meint Shelley Jansky. Der Kartoffelzüchter arbeitet mit dem US-Agrarministerium und mit der University of Wisconsin in Madison zusammen. »Vor fünf Jahren kam ein Student zu mir, der sollte DNA-Sequenzen für Krankheitsresistenzen suchen. Nach drei Jahren hatte er schließlich 18 Marker aufgespürt. Heute schafft jemand in wenigen Wochen 8000 Marker bei 200 Pflanzen – bei jeder einzigen wohlgeerntet!«

Und das Besondere daran: Mit der so genannten Grünen Gentechnik, den kontrovers diskutierten gentechnologischen Eingriffen ins Erbgut, hat diese Methode der Präzisionszucht nichts zu tun. Schon deswegen ist sie für Wissenschaftler und Saatgutproduzenten so attraktiv.

Langer Weg bis zu einer sanften Revolution

Seit mindestens 9000 Jahren verändern Menschen Pflanzen zu ihrem Nutzen. Das meiste Obst oder Gemüse, das bei uns auf den Tisch kommt, stammt von einer irgendwann domestizierten Art ab. In alter Zeit hat man die Samen jener Individuen weiterverwendet, deren Eigenschaften besonders zusagten. Für neue Merkmalskombinationen wurden später auch verschiedene Pflanzen gezielt gekreuzt. So entstand etwa aus Wildgräsern Getreide, aus der Teosinte Mais, und Wildkohl ist die Urform einer bunten Palette von Gemüsekohlsorten, von Grün- und Rotkohl bis zu Brokkoli, Rosen- und Blumenkohl.

In der Pflanzenzucht brach ein neues Zeitalter an, als es in den 1980er Jahren mit gentechnologischen Methoden möglich wurde, gezielt ins Erbgut einzugreifen, also Gene zu verändern, stillzulegen, zu entfernen oder einzuschleusen. In den USA kamen die ersten gentechnisch veränderten Pflanzenprodukte in den 1990er Jahren auf den Markt. Inzwischen enthalten dort – anders als bei uns – gut zwei Drittel der industriell verarbeiteten Nahrungsmittel Bestandteile von so genanntem Genmais, -soja oder -raps. Früchte oder Gemüse betrifft das hingegen viel weniger – schon weil sich bei ihnen

der hohe Aufwand für Zucht und Zulassung wirtschaftlich nicht sonderlich lohnt. Zu den Ausnahmen zählen etwa virusresistente Papayas, Pflaumen und Kürbisse oder schädlingsresistenter Zuckermais.

Nicht nur bei uns, auch in den USA wehren sich manche Verbraucher gegen »Genfood«. Die Hersteller befürchten daher, dass weitere derartige Produkte auf Widerstand stoßen könnten. Gerade bei Obst und Gemüse bestehen Bedenken.

Auch wegen solcher Vorbehalte und Aversionen wird die Präzisionszucht ohne Genmanipulation immer wichtiger – zumal bereits mehrere Genome von Nutzpflanzen sequenziert sind und ständig weitere dazukommen, was diese Analysen wesentlich erleichtert. Denn Landwirte können nun wieder mehr auf Merkmale hinarbeiten, die vornehmlich die Konsumenten schätzen. Auf die Verbraucher Rücksicht zu nehmen, war und ist in der Pflanzenproduktion keineswegs selbstverständlich, weiß der Tomatenzüchter Harry Klee von der University of Florida in Gainesville aus eigener Erfahrung: Da haben eher die Interessen der Farmer und Händler Vorrang.

Bestes Beispiel dafür sind herkömmliche für Supermärkte gezüchtete Tomaten. Deren Geschmacksqualität hängt vom Verhältnis der Säuren und Zucker ab, und viele Menschen bevorzugen Tomaten mit viel Süße. Trotzdem entwickelten Züchter Pflanzen, deren feste, glatte Früchte zwar gut aussehen und längere Transporte und Lagerzeiten aushalten, die aber nur mäßig süß sind. Denn diese Sorten sind auf hohe Erträge gezüchtet, und je mehr Früchte eine Pflanze versorgen muss, desto weniger Zucker erhält die einzelne Tomate.

Klee möchte den Industrietomaten wieder zu einem besseren Ruf verhelfen. Fast 200 alte Landsorten, die manche Bauern und Gärtner noch anbauen, hat er umfangreichen Geschmackstests unterzogen. Viele davon munden fantastisch und haben kräftige, teils überraschende Farben, sehen aber nicht gerade prachtvoll aus. Ihre Haut platzt und vernarbt leicht, und sie werden schnell weich. Außerdem tragen die betreffenden Pflanzen nicht sehr reich. Wie Klee herausfand, bestimmt bei Tomaten keineswegs in erster Linie der Zuckergehalt das Geschmackserlebnis, sondern das von Gaumen und Nase wahrgenommene Aroma: Die alten Sorten strömen ein Bouquet flüchtiger chemischer Substanzen aus. Zum Beispiel entdeckten der Forscher und seine Kollegen 2012, dass auch Tomaten mit relativ wenig Zucker lecker sind, sofern sie genug vom Duftstoff Geranial enthalten. Dieses, glaubt Klee, verstärkt auch den Eindruck von Süße. Um seine These zu prüfen, züchtete er Tomaten, die keine solchen flüchtigen Aromastoffe bilden. Und tatsächlich schmecken sie den Leuten nicht. Selbst ziemlich zuckerhaltige Früchte empfanden die Verkoster dann nicht als süß.

Seit einigen Jahren versucht Klees Team nun, durch Kreuzung der leckersten alten Sorten mit widerstandsfähigen Industrietomaten Hybridpflanzen zu züchten, welche die Vorlieben sowohl von Produzenten und Händlern wie von den Verbrauchern erfüllen. In groben Zügen geschieht diese Arbeit wie folgt: Mitarbeiter rütteln den Pollen mit einfachen elektri-

schen Zahnbürsten aus den Blüten und fangen ihn auf, um ihn gegebenenfalls später zur Befruchtung zu verwenden. Aus den Blättern der betreffenden Pflanzen werden derweil kleine Stückchen ausgestanzt, an denen man ihr Erbgut auf genetische Hinweise darauf untersucht, ob eine Pflanze beispiels-

weise verspricht, Früchte mit glatter Haut oder mit größeren Mengen flüchtiger Aromastoffe zu produzieren. Laut Klee bestimmen solche Analysen mittlerweile entscheidend, welche individuellen Pflanzen man anschließend für die Kreuzungen auswählt. Dieses Verfahren habe die Zucht neuer Sorten

Gene bestimmen für die Zucht neuer Sorten

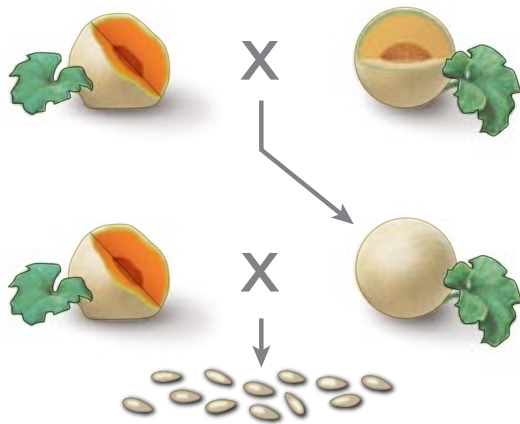
In eine Kulturpflanze gewünschte neue Merkmale einzukreuzen, ohne gleichzeitig bewährte Eigenschaften zu verlieren, kann mit herkömmlichen Methoden viele Jahre dauern, und hierbei ist auch einiges Glück im Spiel. Wenn man bei jeder

Generation allerdings die für solche Merkmale verantwortlichen Gene identifiziert – mit so genannter markergestützter Selektion –, gelingt die neue Kombination wesentlich rascher und zuverlässiger.

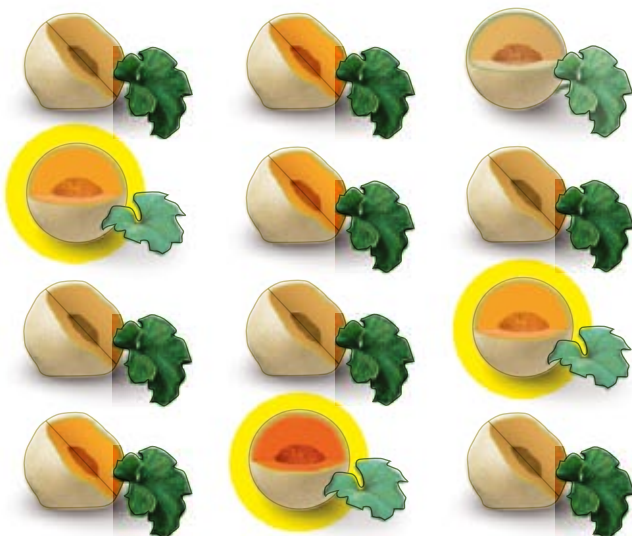
konventionelles Vorgehen

geschmackvoll und aromatisch, wird schnell weich

bissfest, aber fade, gut zu transportieren



miteinander kreuzen und auf die Früchte warten

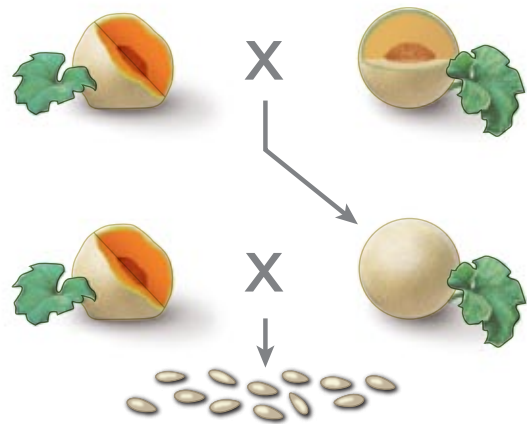


Die Qualität der Hybriden lässt sich erst bei der nächsten Ernte ermesen – oft erst im nächsten Jahr. Nur ein Teil der Pflanzen produziert die gewünschte Merkmalskombination (gelb). Mit den besten Exemplaren davon wird weitergezüchtet.

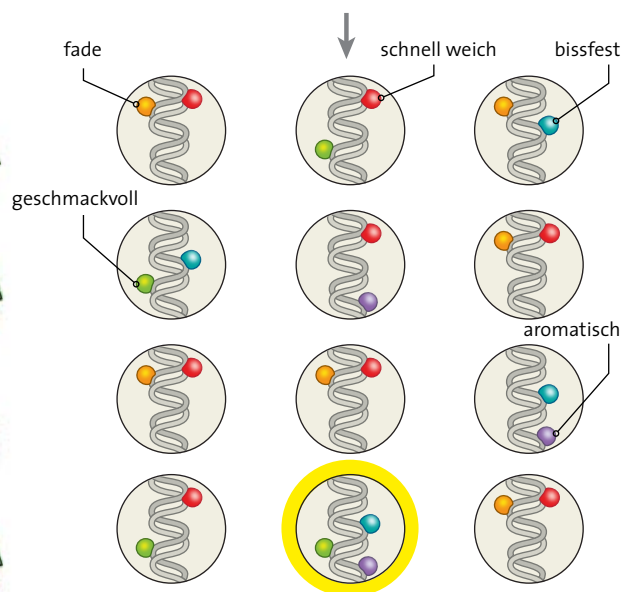
markergestützte Präzisionszucht

geschmackvoll und aromatisch, wird schnell weich

bissfest, aber fade, gut zu transportieren



kreuzen, aber schon die Samen werden genetisch analysiert



Wenn sich die entscheidenden Gene mit Markern (bunte Kugeln) erkennen lassen, kann man sie schon in Zellproben der Samen oder der Blätter junger Pflanzen aufspüren.

enorm beschleunigt, nicht zuletzt auch dank der Sequenzierung des Tomatengenoms im Jahr 2012.

Zwei neu gezüchtete Hybride hat die University of Florida schon vorgestellt: Garden Gem und Garden Treasure. Beide sind zwar nicht ganz so ertragreich wie die üblichen Pflanzen für Supermarkttomaten, bringen aber doch über dreimal so viele Früchte wie die in diese neuen Zuchtvarietäten eingegangenen alten Sorten. Außerdem schmecken beide Tomaten hervorragend – und sie überstehen längere Transporte recht gut.

Erdbeeren ging es bisher kaum besser als Tomaten: Die Züchter setzten jahrelang auf große, haltbare Früchte und vernachlässigten darüber das Aroma. Doch bald dürfte Klees Kollege Vance Whitaker von der University of Florida, der ähnlich vorgeht wie oben geschildert, Erdbeeren vorweisen können, die wenig Wünsche offen lassen.

Brokkoli bereitet Züchtern und Händlern aus anderen Gründen Schwierigkeiten. In den Vereinigten Staaten werden drei Viertel dieses Kohls in Kalifornien angebaut. Besonders gut gedeiht er in der »Salatschüssel« der USA: im Tal des Flusses Salinas, das sich südlich von San Francisco parallel zur Küste hinzieht. Offenbar bekommen den Pflanzen die hier öfter auftretenden Nebel und dadurch verhältnismäßig kühlen Temperaturen. Wie Thomas Björkman von der Cornell University in Ithaca (New York) und seine Kollegen entdeckten, bildet Brokkoli nur dann ebene Köpfe dicht gepackter Blütenknospen im gleichen Stadium, wenn eine Mindestdauer an kühleren Phasen zusammenkommt. In den schwülheißen Sommern im Osten der USA ist das nicht gegeben. Dort entwickelt Brokkoli deswegen unansehnliche, unregelmäßige Köpfe mit ganz unterschiedlich weit gereiften Blüten.

Vor einigen Jahren beschloss jedoch eine große Forschergruppe um Björkman sowie Mark Farnham vom US-Landwirtschaftsministerium, einen Brokkoli zu züchten, der im Osten der Vereinigten Staaten in gewünschter Weise gedeiht. Sie simulieren in Wachstumskammern das heiße, feuchte

Klima der amerikanischen Ostküste und verwenden zur Weiterzucht nur Samen von denjenigen Pflanzen, die unter diesen Bedingungen die vergleichsweise schönsten Köpfe ausbilden. Auf die Weise erhielten sie einen Brokkoli, der ein paar mehr heiße Sommerwochen als sonst verträgt und schon recht passabel aussieht. Jetzt suchen die Forscher nach den hierfür verantwortlichen Genen, um noch gezielter weiterzuzüchten.

Frei zugängliche Samen: Die Open Source Seeds Initiative

Ein Hauptgrund, Brokkoli auch an der amerikanischen Ostküste anzubauen, sind der Geschmack und die Inhaltsstoffe, denn beide verändern sich nach der Ernte rasch. Frischer Brokkoli schmeckt völlig anders als die typische amerikanische Supermarktware, erklärt Björkman. Er ist zart, mild und vollmundig mit einem sanften Eindruck von Honig und Blütenduft. Den strengen, scharfen Nachgeschmack hat er noch nicht. Der entsteht erst, wenn dieser Kohl über größere Strecken hinweg verfrachtet wird und dazu eisgekühlt im Dunkeln liegt. Denn dann hört die Fotosynthese auf, und die Zellen bilden keinen Zucker mehr. Zudem platzen die Zellwände, was die Köpfe weicher macht. Vor allem aber setzen nun Enzyme und andere Moleküle eine Reihe unerwünschter chemischer Reaktionen in Gang, die den Geschmack verändern sowie gesunde Nährstoffe abbauen.

Richard Mithen und seine Kollegen vom Institut of Food Research in Norwich (England) verfolgten ein anderes Ziel, um die Qualität von Brokkoli zu verbessern. Ebenfalls mit markergestützter Zucht haben sie den Gehalt von Glucoraphanin erhöht. Der Inhaltsstoff schützt mutmaßlich gegen Bakterien und Krebs, da er bei uns antioxidative Abwehrmechanismen in Gang setzt. Bioketten in England und Amerika bieten das Gemüse bereits an. Die Lizenz für diesen Superbrokkoli namens Beneforté erwarb Monsanto. Gegen das dem Unternehmen vom Europäischen Patentamt zugesprochene Patent gibt es allerdings Einspruch.

Als Björkman und Farnham ihr Ostküstenprojekt für Brokkoli in Angriff nehmen wollten und dafür beim US-Agrarministerium Gelder beantragten, sagte dieses eine Unterstützung nur unter der Maßgabe zu, dass Saatgutunternehmen ein ernstliches Interesse an dem potenziellen neuen Produkt für einen regionalen Markt haben würden und sich an der Finanzierung der Forschungen beteiligten. Monsanto, Syngenta und Bejo Seeds, eigentlich Konkurrenten, stellen dazu Mittel zur Verfügung. Wie schon mit den schmackhaften neuen Tomatensorten geschehen, hofft Björkman, dass eine Firma die angestrebte neue Zuchtsorte übernehmen und das Saatgut vertreiben wird. Die Forschungsinstitute selbst hätten nicht das Kapital und die Möglichkeiten für Produktion und Vertrieb der erforderlichen Samenmengen.

Einige Pflanzenzüchter haben Bedenken gegenüber solchen Bestrebungen. Sie fürchten, dass es auf ihrem For-





FOTO: DAN SAEILINGER, FOODSTYLING: BIRTE VON KAMPFEN

Auf leckere Melonen müssen US-Bürger auch im Winter nicht länger verzichten: Eine neue haltbare und trotzdem aromatische Sorte übersteht den Transport aus Mittelamerika.

schungsgebiet kaum noch wirkliche Fortschritte geben wird, wenn die großen Konzerne alles an sich reißen. Irwin Goldman von der University of Wisconsin in Madison beobachtet: »Indem die Technologie in den privaten Sektor abgewandert ist, sind staatliche Zuchtprogramme ziemlich stark zurückgegangen. Manche mögen das begrüßen, aber öffentliche Forschung leistet einiges, wofür der Einsatz für Firmen zu langwierig und risikobehaftet ist.« Goldman hat gerade eine innen golden geringelte Rote Beete gezüchtet. Die gleiche Erfahrung wie er machte Jack Juvik, Leiter des Zentrums für Pflanzenzüchtung der University of Illinois in Urbana-Champaign: »In den 1970er Jahren gab es viele kleinere Unternehmen, die stellten eine Menge Saatgut bereit. Sie wurden seitdem entweder von den Konzernen aufgekauft oder verdrängt. Die gesamte Branche hat sich völlig verändert. Damals haben staatliche Institute fertige neue Zuchtsorten geliefert. Heute bekommen die großen Firmen von uns meistens lediglich spezielles Saatgut, mit dem sie dann weiterarbeiten. Sie haben eben die Mittel für die entsprechenden Testreihen und können richtig gute Kultursorten erzeugen. Allerdings kontrollieren sie auch das meiste Saatgut und die entscheidenden Technologien.«

In den USA haben sich einige Züchter, Landwirte und andere Experten zu einer Interessengemeinschaft – der Open Source Seeds Initiative – zusammengeschlossen, darunter auch

Goldman und Jack Kloppenburg, der ebenfalls an der University of Wisconsin in Madison arbeitet. Sie möchten, dass das Saatgut von ausgewählten neuen Kulturvarietäten unter bestimmten Vereinbarungen frei zugänglich ist, wie bei so genannten Open Source Lizenzen für Computersoftware. Diese Zuchtsorten und ihre Produkte sollen dann nicht patentierbar sein. Jeder, der sie verwendet, darf damit weiterzüchten und muss bereit sein, sie sowie eigene neue Produkte auch anderen unter den gleichen Voraussetzungen zur Verfügung zu stellen. In der modernen Pflanzenzucht ist das ein ganz neuer Ansatz. Zwar könnten Züchter Ähnliches auch über ein herkömmliches Patent oder Urheberrecht auf Saatgut erreichen, nur wäre das sehr viel teurer und aufwändiger. Goldman schwebt allerdings ein Kompromiss vor: Die Züchter würden demnach nur einige ihrer neuen Pflanzensorten freigeben und an anderen verdienen, indem sie diese lizenzieren.

Der Tomatenzüchter Klee fragt sich, ob nicht eine gewisse Konzilianz angebracht ist. Er meint: »In der Pflanzenzucht können die Forschungsinstitute nun einmal nicht mit den Großkonzernen konkurrieren. Die meiste Forschung an den wirtschaftlich wichtigsten Pflanzen findet nicht länger an Universitäten statt. Dort kümmert man sich mehr um Nischenprodukte. An meinem Institut gibt es einen Experten für Pfirsiche, einen für Blaubeeren und einen für Erdbeeren. Bei Monsanto kenne ich etliche Leute, die sich mit solchen weniger lukrativen Arten nicht mehr abgeben, weil sich das für das Unternehmen einfach nicht lohnt.« Diese Nische bietet sich für die öffentliche Forschung an, deren Produkte die von der Industrie ergänzen, denn letztlich seien beide aufeinander angewiesen.

Doch Klees dringlichstes Anliegen ist es, die Interessen der Landwirte, die auf ihre Kosten kommen müssen, und die der Verbraucher zu vereinbaren. Er fasst zusammen: »Im Grunde ist es ganz einfach: Gebt den Menschen, was sie gern essen!« ~

DER AUTOR



Ferris Jabr ist Journalist und freier Mitarbeiter von »Scientific American«. Er schreibt auch für andere Publikationen wie die »New York Times« und den »New Scientist«.

QUELLE

Klee, H.J.: Improving the Flavor of Fresh Fruits: Genomics, Biochemistry, and Biotechnology. In: New Phytologist 187, S. 44–56, 2010

LITERATURTIPP

Ernährung. Spektrum der Wissenschaft Spezial: Biologie, Medizin, Hirnforschung 2/2014
 Artikel unter anderem zu *Fettleibigkeit und Nahrungsproduktion*

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372761

Warten auf die Welle

In einem internationalen Forschungsverbund sind Physiker den von Albert Einstein vorhergesagten Schwingungen der Raumzeit auf der Spur. Mit verbesserten Instrumenten hoffen sie jetzt darauf, Gravitationswellen endlich direkt nachzuweisen.

Von Felicitas Mokler

Kurz vor dem Dorf Ruthe rund 20 Kilometer südlich von Hannover biegt Emil Schreiber in einen Feldweg ein, der auf das Forschungsgelände mit dem Gravitationswellendetektor GEO600 führt. »Rechts in dem Straßengraben verläuft eine der beiden Messstrecken unseres Detektors«, erklärt der Doktorand. Angekommen im Bürocontainer holt Schreiber eine Messkurve auf den Computerbildschirm. »Hier sieht man die Erschütterung, die wir gerade eben verursacht haben, als wir mit dem Auto den kleinen Weg entlangefahren sind.« Eigentlich sind die Forscher mit diesem Experiment aber auf der Suche nach Gravitationswellen aus den Tiefen des Weltalls.

Als der geniale Physiker Albert Einstein vor 100 Jahren die allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichte, krepelte er unsere Vorstellung vom Kosmos gewaltig um. Bis dahin hat-

ten Raum und Zeit als starr und geometrisch unveränderlich gegolten. Von nun an dachte man sich diese beiden Größen aber zu einem dynamischen und geometrisch verformbaren Raum-Zeit-Gefüge verwoben. Mehr noch: Zwei Massen treten jetzt nicht mehr unmittelbar über die Schwerkraft miteinander in Wechselwirkung, wie es einst Sir Isaac Newton (1643–1727) beschrieb. Vielmehr verformt Materie in ihrer Umgebung die Raumzeit. Gerät ein anderer Körper in die Nähe dieser Raumzeit-»Delle«, wird er durch sie abgelenkt und auf eine krumme Bahn gezwungen. Selbst Licht folgt der neuen Geometrie. Und wann immer Materie in der Raumzeit ihren Bewegungszustand, also etwa die Richtung oder Geschwindigkeit ändert, vermag sie diese gar in Schwingungen zu versetzen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Je massereicher und kompakter die Objekte, umso stärker fällt der Effekt aus. Dass solche Gravitationswellen existieren, folgerte Einstein ein Jahr nachdem er die Grundlagen seiner neuen Theorie veröffentlicht hatte. Der Physiker glaubte selbst jedoch nicht daran, dass sich diese Schwingungen der Raumzeit jemals würden aufspüren lassen.

»Die Wechselwirkung zwischen Gravitationswellen und Materie ist extrem schwach. Das macht es so schwierig, sie zu messen«, erläutert Karsten Danzmann. Nur selten ist der Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover und Leiter des Instituts für Gravitationsphysik der dortigen Leibniz Universität in seinem Büro anzutreffen. Die meiste Zeit reist er um in die Welt, um die Zukunft der Gravitationswellenforschung zu planen.

Bisher haben sich Gravitationswellen hartnäckig ihrer Beobachtung entzogen: Doch auch Danzmann ist hartnäckig – und ausdauernd. Der Wissenschaftler hat es sich zur Lebensaufgabe gemacht, gemeinsam mit vielen anderen engagierten Kollegen die messtechnischen Voraussetzungen zu schaffen, mit denen sich die Schwingungen der Raumzeit detektieren lassen. Wenn dies endlich gelänge, ließe sich eine wichtige Lücke bei der Bestätigung der allgemeinen Relativitätstheorie schließen. Einschlägige Nachweise verschiedener Voraussagen der Theorie sind bereits erbracht, und die Mehrheit der Wissenschaftsgemeinde erkennt Einsteins Konzept zur Beschreibung der Gravitation heute als gültig an.

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

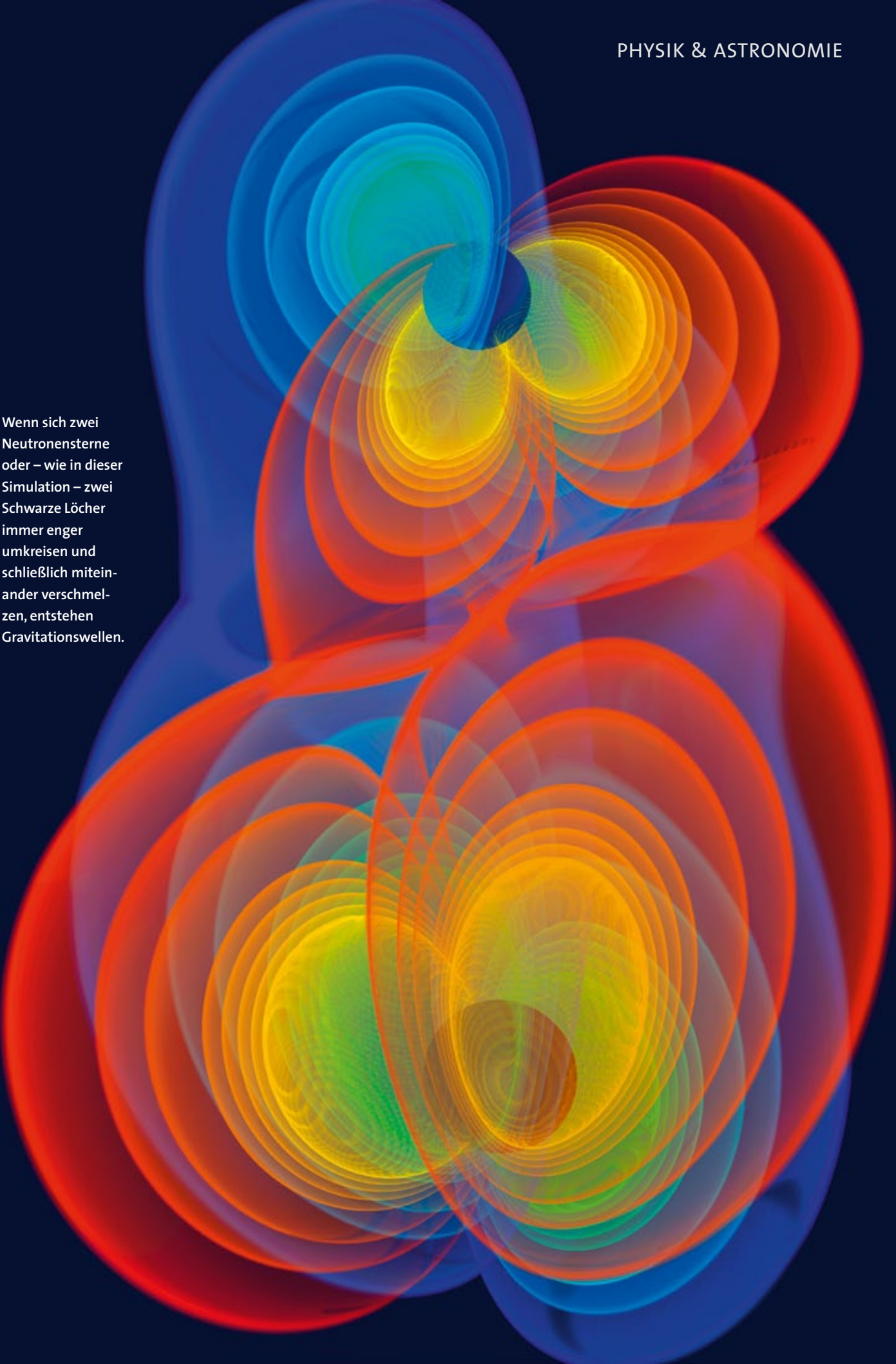
100 JAHRE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

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



FERDINANDSCHMUTZER, 1937 / PUBLICDOMAIN [M]

Wenn sich zwei Neutronensterne oder – wie in dieser Simulation – zwei Schwarze Löcher immer enger umkreisen und schließlich miteinander verschmelzen, entstehen Gravitationswellen.



»Vor allem wird sich uns mit den Möglichkeiten der Gravitationswellenastronomie ein völlig neues Fenster ins Universum auftun«, merkt Danzmann an. Im Moment lässt sich die Situation der Forscher vergleichen mit jemandem, der durch einen Dschungel geht und nur sehen, aber zunächst nicht hören kann. Denn bisher beziehen sie sämtliche Information über die Vorgänge im Weltall ausschließlich aus elektromagnetischer Strahlung unterschiedlichster Wellenlänge. Analog dazu nimmt der Dschungelreisende seine Umgebung vor allem als grünes Dickicht wahr. Tun sich ihm schließlich die Ohren auf, wird er einen völlig neuen Eindruck gewinnen. Nun wird er die Vögel hören können, die sich in den Baumkronen tummeln, oder das Knacken im Unterholz, wenn sich ein Tiger anschleicht. Auch wenn die Schwingungen der

Raumzeit sich physikalisch von dem Phänomen Schall unterscheiden: »Wir werden sozusagen mit unseren Gravitationswellendetektoren in das Weltall hinaushorchen können und dabei zuhören, wie zwei Neutronensterne oder Schwarze Löcher miteinander verschmelzen oder wie Sterne explodieren. Das Universum wird sich uns in einer völlig neuen Dimension erschließen«, so Danzmann. Bisher müssen die Forscher sich allerdings noch mit Computersimulationen von derlei Szenarien abfinden.

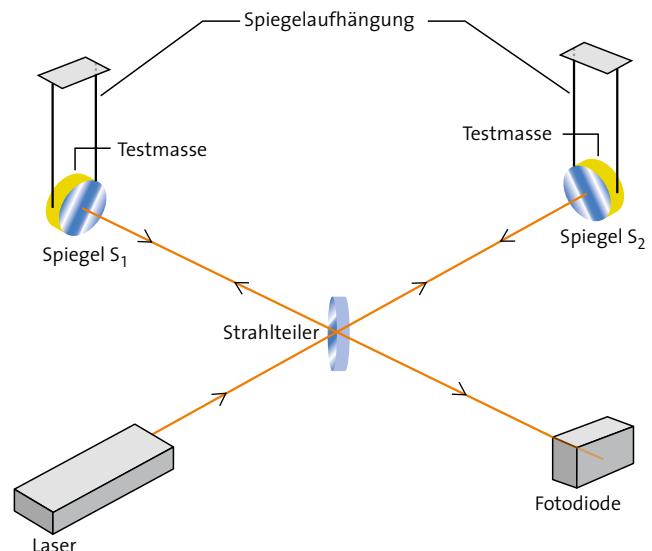
Für den indirekten Nachweis von Gravitationswellen gab es bereits 1993 den Nobelpreis für Physik. Die beiden Astrophysiker Russell A. Hulse und Joseph H. Taylor hatten über mehrere Jahre hinweg ein besonderes Doppelsternsystem beobachtet. In dem System PSR 1913+16 umkreisen sich zwei



Der Gravitationswellendetektor GEO600 in Ruthe bei Hannover ist unscheinbar in die ländliche Umgebung eingebettet. Hier haben Physiker neue Technologien entwickelt, die nun auch bei anderen Detektoren der internationalen Kollaboration zum Einsatz kommen.

Prinzip eines Laserinterferometers

Ein Laserstrahl wird an einem Strahlteiler in zwei senkrecht zueinander stehende Lichtwege aufgeteilt. Die Teilstrahlen laufen die Interferometerarme zu den Spiegeln S_1 und S_2 entlang. Von dort werden sie zurück zum Strahlteiler reflektiert, wo sie sich überlagern und dann als Signalstrahl auf die Fotodiode treffen. Dessen Helligkeit hängt davon ab, in welcher relativen Phase die Teilstrahlen interferieren. Die Anlage wird so eingestellt, dass die beiden Strahlen in Ruhe genau um eine halbe Wellenlänge versetzt aufeinandertreffen und sich auslöschen. Ändern sich die relativen Lichtlaufstrecken, etwa wenn eine Gravitationswelle vorüberzieht, interferieren die Teilstrahlen konstruktiv, der Signalstrahl wird sichtbar. Mit Hilfe weiterer Spiegel lassen sich Haupt- und Signalstrahl für mehrere Umläufe im Interferometer halten. Damit erhöht sich die verfügbare Lichtleistung (Power-Recycling), und das Rauschen im Signalstrahl wird reduziert (Signal-Recycling).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT: MACH, BETHUNA, ET AL. / COMPUTATIONAL IMAGINATION BY INTERFEROMETRY (GROUND AND SPACE). IN: LIVING REVIEWS IN RELATIVITY 14, 2011, FIG. 3

EIN NEUES FENSTER INS ALL

1 In seiner **allgemeinen Relativitätstheorie** sagte Albert Einstein die Existenz von **Gravitationswellen** vorher. Jedoch glaubte er nicht daran, dass sie sich jemals würden messen lassen.

2 Heute lauschen Physiker von verschiedenen über den Erdball verteilten Standorten mit Gravitationswellendetektoren ins All. Das Experiment **GEO600** bei Hannover ist an der Entwicklung neuer Technologien dafür maßgeblich beteiligt.

3 Kürzlich sind die US-amerikanischen **LIGO-Detektoren mit gesteigerter Messgenauigkeit** wieder in Betrieb gegangen. Damit erhöhen sich die Chancen, in den nächsten Jahren Gravitationswellen direkt zu messen.

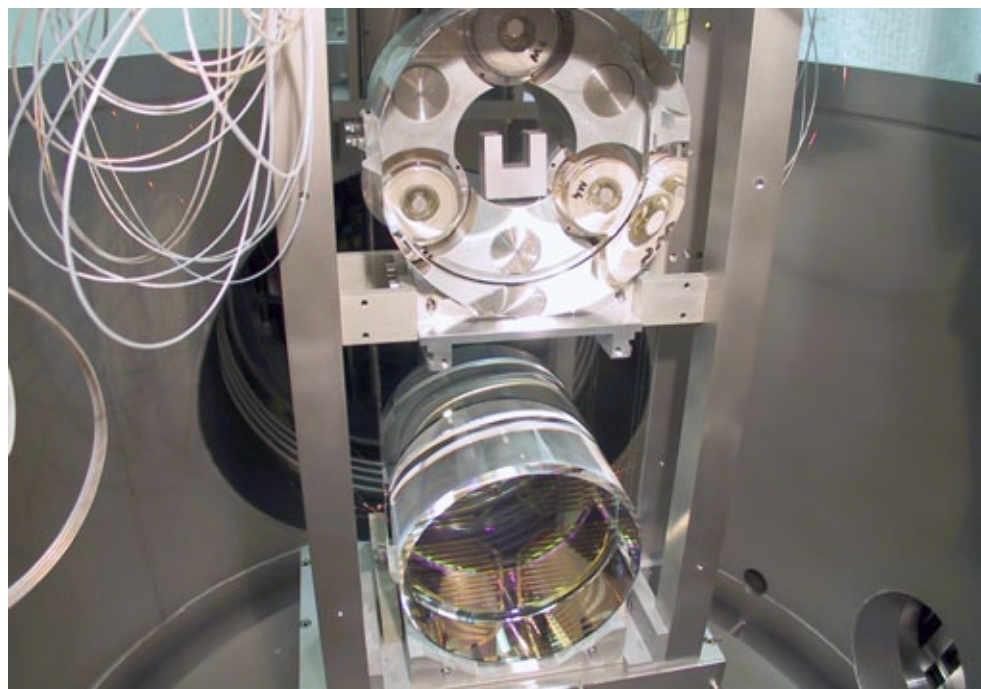
Neutronensterne in einem Abstand, der nur wenige Male der Distanz Erde-Mond entspricht. Die Sterne selbst sind äußerst kompakt. Sie vereinigen in sich jeweils etwa eine Sonnenmasse bei einem Durchmesser von nur wenigen Kilometern. Deshalb ist die Gravitation an ihrer Oberfläche und in ihrer Umgebung besonders stark. Ein perfektes Labor also, um die allgemeine Relativitätstheorie zu testen. Bei genauerem Hinsehen stellte sich heraus, dass die beiden Sterne sich immer schneller umrunden. Sie laufen also auf spiralförmigen Bahnen aufeinander zu und verlieren dabei Energie. Der aus den Beobachtungen errechnete Energieverlust entspricht genau jenem Wert, den die allgemeine Relativitätstheorie für dieses System auf Grund der Abstrahlung von Gravitationswellen vorhersagt. Mittlerweile haben Astronomen rund ein Dutzend ähnlicher Systeme untersucht und an ihnen denselben Effekt bestätigt. Direkt beobachten lassen würden sich Gravitationswellen aber wohl erst im künftigen Jahrhundert, prophetezeit damals das Nobelpreiskomitee.

Heute scheint der Traum von Karsten Danzmann und seinen Mitstreitern beinahe zum Greifen nah. Würde zum Beispiel morgen ein Stern in der Milchstraße sein Leben in einer Supernova-Explosion aushauchen, wäre GEO600 dafür gewappnet. »Leider sind solche Ereignisse aber extrem selten. Man rechnet etwa mit einer Supernova alle 30 bis 100 Jahre pro Galaxie. Allerdings ist die Milchstraße längst überfällig«, meint Danzmann. »Doch vorhersagen lassen sie sich einfach nicht.«

Der Gravitationswellendetektor reagiert auf relative Längenänderungen der Messstrecken von bis zu 10^{-18} Metern. Das entspricht einem Tausendstel des Durchmessers eines Protons. Genau in diesen Messbereich sollte auch das Signal einer Supernova fallen, die sich in unserer Hälfte der Milchstraße ereignet, so die Theorie. Bis eine solche Messempfindlichkeit möglich war, haben die Wissenschaftler fast drei Jahrzehnte lang getüftelt – und arbeiten auch weiterhin daran, sie noch zu verbessern.

Der erste Testdetektor

Ende der 1980er Jahre begann eine kleine Gruppe von Physikern damit, die Möglichkeiten eines Michelson-Interferometers als Gravitationswellendetektor zu erforschen. Das damalige Testgelände befand sich am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München. Das Messprinzip nutzt eine zentrale Eigenschaft des Lichts: seine Wellennatur. Zunächst teilen die Forscher einen Laserstrahl in zwei auf und schicken diese auf senkrecht zueinander verlaufende Messstrecken. Jeweils von einem Spiegel an deren Enden reflektiert, treffen sie am Ausgangspunkt wieder aufeinander und überlagern sich. Die Physiker sagen, sie interferieren. Wie stark das resultierende Summensignal ist, hängt davon ab, in welcher Wellenphase sich die beiden Lichtstrahlen relativ zueinander



Die Spiegel im Interferometer des Gravitationswellendetektors sind aus Quarzglas gefertigt und wiegen bis zu zehn Kilogramm. Sie sind als Pendel aufgehängt, um externe mechanische Einflüsse weitestgehend zu dämpfen.

HARALD LÜCK/AFI/UFH

★ Wissen verschenken und Freude bereiten – mit einem Geschenkabonnement! ★



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

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



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

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



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

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



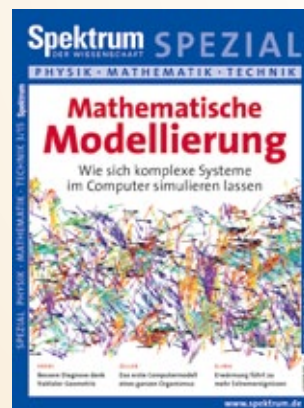
Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences

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



Spannende Themen aus der Welt der Kulturwissenschaften

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



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung

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



So einfach erreichen Sie uns:

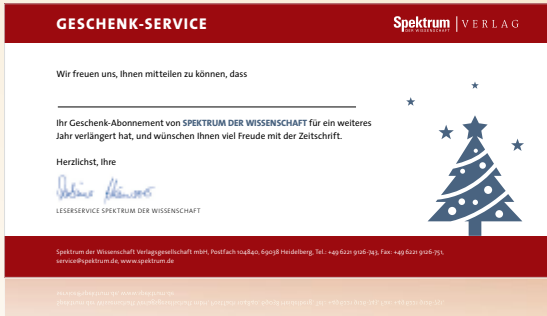
Telefon: 06221 9126-743

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

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



+ GRUSSKARTE



Ein ganzes Jahr Freude:

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

Mit Grußkarte:

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

Plus Geschenk zur Wahl:

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

+ EIN GESCHENK FÜR SIE



LISA Pathfinder – auf dem Weg zur Gravitationswellenastronomie im All

Gravitationswellen entstehen bei einer ganzen Reihe kosmischer Ereignisse. Die Wellenlänge beziehungsweise Frequenz und die Intensität eines auf der Erde messbaren Signals hängen unter anderem davon ab, wie massereich und kompakt die beteiligten Objekte sind. Des Weiteren wird die Signalstärke durch die Entfernung bestimmt, in der die Schwingungen der Raumzeit ausgesandt werden. Gravitationswellen bei Frequenzen oberhalb von zehn Hertz sollten sich mit den Detektoren der LIGO-Virgo-Kollaboration messen lassen, wenn sie stark genug sind. Das könnte zum Beispiel der Fall für Supernovae sein, die sich in der Milchstraße ereignen, oder für zwei Neutronensterne oder Schwarze Löcher von etwa Sternennasse, die miteinander verschmelzen und nicht weiter als rund 50 Millionen Lichtjahre entfernt sind. Für größere Entfernungen reicht die Empfindlichkeit der bodengebundenen Instrumente nicht aus. Außerdem sind die Messstrecken für deutlich niedrigere Frequenzen unterhalb von einem Hertz und damit für höhere Wellenlängen schlicht zu kurz. Hierzu bedarf es Detektoren, die irdische Dimensionen weit übersteigen.

Einen Dauerhintergrund an Gravitationswellen bei so niedrigen Frequenzen sollten etwa Doppelsternsysteme mit Weißen Zwergen erzeugen, von denen es vermutlich zahlreiche in unserer Milchstraße gibt. Bis weit zurück in die Vergangenheit dürfte sich außerdem das Echo von extrem massereichen Schwarzen Löchern aufspüren lassen, wenn die Kerne von zwei Galaxien im jungen Kosmos miteinander verschmelzen. Und nicht zuletzt erhoffen sich die Wissenschaftler, die Geschichte des Universums mit Gravitationswellen weiter zurückzuverfolgen, als es anhand des elektromagnetischen Spektrums möglich ist.

Um Gravitationswellen bei möglichst allen Frequenzen und aus dem gesamten Universum erfassen zu können, arbeiten die Physiker deshalb an einer Technologie, mit der sich die Schwin-

gungen der Raumzeit vom All aus beobachten lassen. Bereits seit rund 20 Jahren führen ESA und NASA gemeinsam Modellstudien zu LISA durch: der Laser Interferometer Space Antenna. Allerdings ist die NASA 2011 aus finanziellen Gründen aus der Kollaboration ausgestiegen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass sie sich mittelfristig wieder daran beteiligen wird.

Für das weltraumbasierte Gravitationswellenobservatorium sollen drei Satelliten in einer Dreiecksanordnung um einen so genannten Lagrangepunkt der Erde kreisen und sich dabei auf einer stabilen Umlaufbahn um die Sonne bewegen. Die Seitenlänge des Dreiecks, also eines Messarms des Interferometers, beträgt eine Million Kilometer. In den baugleichen Satelliten wird jeweils ein Gehäuse integriert sein, in dem eine Testmasse frei schwebt. Zwei Laserstrahlen, die zwischen den Satelliten hin- und herlaufen, sollen nach dem Prinzip eines Interferometers die relative Abstandsänderung zwischen den Testmassen messen.

Dazu müssen die Testmassen in den Satelliten frei von jeglichen äußeren Störungen, vor allem auch von noch so kleinen elektrostatischen Kräften des umgebenden Gehäuses schweben können. Um dies zu bewerkstelligen, mussten die Physiker eine völlig neue Technologie entwickeln, die bisher bei noch keiner Weltraummission zum Einsatz kam. Mit dem ESA-Satelliten LISA Pathfinder, der Ende 2015 starten soll, wollen sie diesen Mechanismus sowie ein Modellsystem des gesamten Weltrauminterferometers, komprimiert auf eine Größe von 40 Zentimetern, auf seine Funktionsfähigkeit hin überprüfen.

Der Erfolg der Testmission wird, neben einem direkten Nachweis von Gravitationswellen mit den bodengebundenen Detektoren in den nächsten Jahren, richtungsweisend für die Realisierung eines Gravitationswellenobservatoriums im All sein. Der Start von LISA ist derzeit für 2034 geplant.

finden. Schwingen sie im Gleichtakt und addieren sich gleichzeitig zwei Wellenberge beziehungsweise zwei Wellentäler, verstärkt sich die Lichtintensität: Es kommt zu konstruktiver Interferenz. Treffen sie dagegen phasenversetzt aufeinander, löschen sich die Laserstrahlen ganz oder teilweise aus und der Signalstrahl wird dunkler (destruktive Interferenz).

Wenn eine Gravitationswelle vorübergehend die Raumzeit entlang der Detektorarme verzerrt, verändern sich die beiden Messstrecken relativ zueinander geringfügig. Dann treffen die beiden Lichtstrahlen in jeweils einer anderen Phase aufeinander als zuvor, und die Stärke des Signalstrahls beziehungsweise das Interferenzmuster ändert sich. Das Prinzip klingt einfach. Doch jede Menge Einflüsse aus der Umwelt wie auch innerhalb des Detektors selbst rufen einen ganz ähnlichen Effekt hervor. Das Problem dabei: Die irdischen Störungen sind in der Regel um Größenordnungen höher als jene, welche Gravitationswellen verursachen sollten.

1990 übernahm Karsten Danzmann die Leitung der Arbeitsgruppe, drei Jahre später ging er nach Hannover. Dort baute er in Kooperation zwischen der Max-Planck-Gesellschaft und der Leibniz Universität Hannover gemeinsam mit Forschungseinrichtungen aus Großbritannien das Experiment GEO600 auf. Mittlerweile ist es in eine internationale Kollaboration eingebunden. Ihr gehören noch zwei Detekto-

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

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



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



Mit der Raummission LISA Pathfinder wollen Forscher die neue Technologie für ein Gravitationswellenobservatorium im All – LISA – testen. Ende 2015 soll LISA Pathfinder starten.

ASTRUM.UK

ren in den USA namens LIGO an, jeweils einer an der West- und einer an der Ostküste, sowie das französisch-italienische Experiment Virgo in Cascina bei Pisa. Alle diese Instrumente funktionieren nach demselben Prinzip; die mit den verschiedenen Detektoren aufgenommenen Daten werten die Wissenschaftler der Kollaboration gemeinsam aus. Demnächst soll außerdem ein Detektor in Japan den Testbetrieb aufnehmen, ein weiterer ist in Indien geplant.

Von dem Forschungsverbund profitieren alle Beteiligten: Anhand einer Mehrfachmessung können sie überprüfen, ob ein Signal tatsächlich aus dem All stammt oder irdischen Ursprungs ist. Vor allem aber lassen sich auch Himmelsposition und Entfernung einer Quelle nur im Zusammenschluss mehrerer Messgeräte bestimmen. »Das ist wieder ähnlich wie beim Hören«, erläutert Danzmann. »Wir benötigen beide Ohren, um feststellen zu können, aus welcher Richtung ein Geräusch kommt. Mit Gravitationswellen ist das noch ein wenig komplizierter. Hierzu benötigen wir mindestens drei,

besser aber noch vier oder mehr Gravitationswellendetektoren an verschiedenen Standorten. Und je weiter diese Standorte auf dem Erdball auseinanderliegen, umso schwächere Quellen werden sich orten lassen.«

Die Größe eines Gravitationswellenobservatoriums dieser Bauweise bestimmt maßgeblich seine Messempfindlichkeit. Außerdem legt sie den Frequenzbereich fest, innerhalb dessen sich Gravitationswellen messen lassen. Die Exemplare in Amerika und Italien sind größer und damit leistungsstärker als GEO600. Die beiden LIGO-Detektoren besitzen eine Messstrecke von vier Kilometern, Virgo bietet drei Kilometer. Dagegen kann GEO600 nur mit 600 Metern auskommen. Dennoch spielt der Hannoveraner Detektor eine wesentliche Rolle in dem Forschungsverbund. Ursprünglich gar nicht dafür konzipiert, selbst Gravitationswellen zu messen, fungiert er seit jeher als Testlabor und Ideenschmiede. Physiker und Ingenieure entwickeln dort gemeinsam neue Technologien, testen deren Funktionsfähigkeit und machen sie anwendungsreif.

An einem Modell erklärt Emil Schreiber, wie die Spiegel montiert sind, die den Laser in dem Interferometer ablenken. Bis zu zehn Kilogramm wiegen sie und sind aus Quarzglas gefertigt. Aufgehängt an einem speziellen Mehrfachpendelsystem lassen sie sich gegen mechanisch bedingte Störeinflüsse von außen weit gehend isolieren.

Rundum erneuert

Nun geht es in das Detektorgebäude, ebenfalls ein unscheinbarer Container. In einem extra abgetrennten Raumbereich stehen sechs größere Vakuumtanks aus Stahl. »Darin sind verschiedene Spiegel untergebracht, die den Weg der Photonen im Interferometer bestimmen«, erläutert Schreiber. Sie teilen den Laserstrahl mit einer Wellenlänge von 1064 Nanometern und einer Leistung von zehn Watt zunächst auf und schicken die Teilstrahlen auf die senkrecht zueinander verlaufenden, 600 Meter langen Messarme. Die Spiegel sind so angeordnet, dass die Photonen dort mehrmals hin- und herrasen, bevor sie sich zum Signalstrahl vereinigen. Damit erhöht sich die Laserleistung innerhalb des Detektors. Auf ähnliche Weise lassen sich auch winzige Änderungen im Signalstrahl etwa um das Zehnfache verstärken, bevor dieser auf den Fotodetektor trifft.

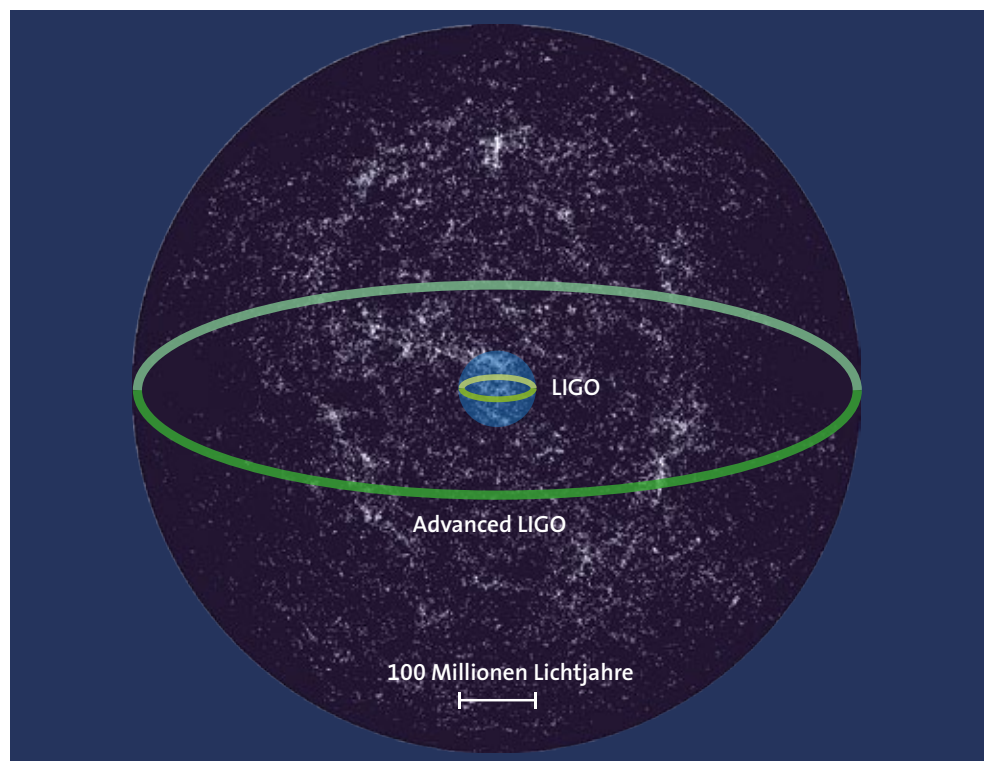
Dieses System des so genannten Signal-Recyclings haben die Forscher von GEO600 entwickelt. Mittlerweile ist es auch bei LIGO eingebaut und soll künftig ebenfalls bei Virgo eingesetzt werden. Beide Experimente hatten 2011 den Beobachtungsbetrieb vorübergehend eingestellt. Kürzlich wurden die beiden LIGO-Detektoren rundum erneuert. Die Forscher haben sämtliche Bestandteile der Messinstrumente durch neue, qualitativ hochwertigere ersetzt, jeden Spiegel

ausgetauscht. Außerdem erhielten die LIGO-Detektoren eine stärkere Lichtquelle. Die neuen Hochleistungslaser mit einer Leistung von 200 Watt stammen ebenfalls aus Hannover. Die Physiker von GEO600 haben sie gemeinsam mit dem Laser Zentrum Hannover konzipiert.

Mitte September 2015 hat das amerikanische Experiment den Messbetrieb als Advanced LIGO wieder aufgenommen. Letztlich sollen die Detektoren in der Lage sein, rund zehnmal empfindlicher zu messen als zuvor. Ab 2017 soll schließlich Virgo ebenfalls mit höherer Messgenauigkeit wieder einsatzbereit sein. Künftig wird das Detektornetzwerk feiner hören können und damit auch deutlich schwächere Signale einfangen oder solche von Quellen, die weiter entfernt sind. So vergrößert sich das beobachtbare Volumen des Welt-raums um das 1000-Fache, und die Anzahl an potenziellen astrophysikalischen Gravitationswellenereignissen steigt – und damit die Wahrscheinlichkeit, diese zu beobachten.

Doch Danzmann und seine Kollegen von der LIGO-Virgo-Kollaboration sind nicht die Einzigen, die darauf warten, dass ihnen endlich eine Gravitationswelle ins Netz geht. Es gibt durchaus alternative Methoden, mit denen sich die Schwingungen der Raumzeit aufspüren lassen sollten. Dazu nehmen verschiedene Arbeitsgruppen aus Europa, Nordamerika und Australien seit einiger Zeit eine bestimmte Klasse von Pulsaren, die im Millisekundentakt rotieren, noch einmal genauer ins Visier – und zwar diesmal nicht als System, das selbst Gravitationswellen aussendet, sondern als kosmische Gravitationswellendetektoren. Wenn in den Tiefen des Weltalls Galaxien kollidieren und die Schwarzen Löcher in ihrem Inneren miteinander verschmelzen, versetzt das ebenfalls die Raumzeit in Schwingung. Ziehen diese Wellen an den Pul-

Mit den bisherigen Detektoren der LIGO-Kollaboration haben die Forscher nach Verschmelzungen von Schwarzen Löchern stellarer Masse oder von Neutronensternen bis zu einer Entfernung von 50 Millionen Lichtjahren gesucht. Allerdings ist die Ereignisrate extrem niedrig. Die nun messempfindlicheren Advanced-LIGO-Detektoren werden in Zukunft zehnmal weiter ins All horchen und so ein 1000-mal größeres Volumen abdecken können. Damit steigt die Ereignisrate – und ebenso die Wahrscheinlichkeit, Gravitationswellen direkt zu messen. In Weiß angedeutet ist die Struktur der Galaxiencluster.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT 7/BARBEL WEHNER, NACH: WWW.ADVANCEDLIGO.MIT.EDU/SUMMARY.HTML

saren vorüber, sollten die Sterne allmählich ihren Takt ändern. Über einen Zeitraum von mehreren Jahren könnte sich das messen lassen.

Außerdem hat der Kosmos gleich unmittelbar nach seiner Entstehung heftig gebebt. Nach heutigem Verständnis dehnte sich das Universum kurz nach seiner Geburt für einen winzigen Bruchteil einer Sekunde extrem schnell aus. Kosmologen bezeichnen diese Phase der explosionsartig beschleunigten Expansion als Inflation. Sie hat die Raumzeit gewaltig durchgeschüttelt und in Schwingungen versetzt. Zwar hallen diese auch im heutigen Universum noch nach. Mittlerweile sind sie jedoch viel zu schwach und ihre Frequenz ist zu niedrig, als dass sie sich direkt aufspüren ließen. Die ertümlischen Gravitationswellen sollten aber dem kosmischen Mikrowellenhintergrund ein charakteristisches Muster aufgeprägt haben. Diese Mikrowellenstrahlung erreicht uns aus einer Epoche, als das Universum rund 380 000 Jahre alt war. Weiter zurück in die kosmische Vergangenheit können wir nicht blicken, denn davor war das Universum undurchsichtig für elektromagnetische Strahlung.

Lackmustest für Gravitationswellensignale

Anhand der Fingerabdrücke der Gravitationswellen im Mikrowellenhintergrund erhoffen sich die Forscher Einblicke in Vorgänge unmittelbar nach dem Urknall. Doch ein solches Signal ist nicht leicht aus den Daten des kosmischen Mikrowellenhintergrunds herauszufiltern. Im Frühjahr 2014 verlautbarten Forscher des BICEP2-Experiments, das von der Antarktis aus den Himmel im Mikrowellenbereich abscaant, sie hätten Indizien für den Fingerabdruck dieser ertümlischen Gravitationswellen gefunden. In der Presse schlug dieser vermeintliche Fund hohe Wellen. Doch mittlerweile ist klar: Ursache für das damals gefundene Signal ist ganz einfach kosmischer Staub, der sich in unserer eigenen Galaxis befindet.

Um ganz auszuschließen, dass solche Signaturen überhaupt existieren, ist es allerdings noch zu früh. Zunächst muss der Mikrowellenhintergrund noch gründlicher analysiert werden. Dazu haben sich nun die BICEP2-Wissenschaftler mit ihren Kollegen zusammengetan, die mit dem Planck-Satelliten den gesamten Himmel im Bereich der Mikrowellenstrahlung mehrere Jahre lang detailliert vermessen haben. Das Ergebnis hierzu steht noch aus. Würde man schließlich den Fingerabdruck doch noch finden, wäre dies wohlgermerkt ein indirekter, nicht aber ein direkter Nachweis von Gravitationswellen, wie ihn die Hannoveraner Physiker und ihre internationalen Kollegen anstreben.

Wie aber lässt es sich vermeiden, im kosmischen Jagdfieber dem eigenen Wunschenken zu erliegen? »Wir proben den Fall einer direkten Detektion in einem sehr realitätsgetreuen Szenario«, erläutert Danzmann. »Ein unabhängiges Komitee von einer Hand voll Kollegen speist gelegentlich simulierte Gravitationswellensignale in die Detektordaten ein. Niemand außer ihnen weiß davon.« Wenn die übrigen Wissenschaftler dann die Daten analysieren und darin auf

Hinweise auf ein Gravitationswellensignal stoßen, führen sie sehr sorgfältige Tests durch und prüfen, wie signifikant das Signal ist. Lässt sich ausschließen, dass es zum Beispiel irdischen Ursprungs ist, bereiten sie eine wissenschaftliche Veröffentlichung vor. »Bei einer gemeinsamen Konferenz gibt schließlich das unabhängige Komitee bekannt, ob zu dem betreffenden Zeitpunkt ein entsprechendes Signal eingespeist wurde oder nicht«, verrät Danzmann. Während des gesamten Prozesses herrscht nach außen hin absolute Schweigepflicht.

Auf diese Weise kontrollieren die Forscher die Qualität ihrer Datenanalyse. Außerdem wird sichergestellt, dass nicht irgendwo eine vorschnelle und möglicherweise falsche Information über die erste direkte Detektion von Gravitationswellen durchsickert. Bisher hätten aber alle Beteiligten dichtgehalten, so Danzmann. Bei einer Kollaboration von etwa 1500 Wissenschaftlern sei das durchaus bemerkenswert.

Dass den Detektoren der LIGO-Virgo-Kollaboration bisher keine Gravitationswellen ins Netz gegangen sind, ist für die Wissenschaftler noch kein Grund zur Sorge. Zum einen mögen die theoretischen Abschätzungen für die Stärke eines Gravitationswellensignals von bestimmten astrophysikalischen Ereignissen früher etwas optimistischer ausgefallen sein als heute. Zum anderen waren sich die Wissenschaftler um Danzmann stets bewusst, dass sie sich bisher am Limit des Messbaren bewegt haben.

Die Chancen stehen nicht schlecht, dass sich Gravitationswellen innerhalb der nächsten Dekade direkt werden messen lassen. Mit dem Upgrade der LIGO-Detektoren dürften die Forscher ihrem Ziel ein ganzes Stück näher gekommen sein. Sollte ihnen das tatsächlich glücken, wird dies zukünftigen Missionen in der Gravitationswellenastronomie Rückenwind geben. Den Blick stets nach vorne gerichtet, planen Danzmann und seine Kollegen nämlich längst ein weiteres Gravitationswellenobservatorium: eine Messstation im Weltraum, LISA (siehe »LISA Pathfinder«, S. 52/53). ☞

DIE AUTORIN



Felicitas Mokler ist promovierte Astrophysikerin und arbeitet als Redakteurin und Wissenschaftsjournalistin im Raum Heidelberg.

LITERATURTIPPS

Grothues, H.-G., Reiche, J.: LISA Pathfinder. In: Sterne und Weltraum 7/2014, S. 34–43

In diesem Artikel berichten Experten über die Entwicklung einer neuen Technologie für die Gravitationswellensuche im All.

Knispel, B.: Das Projekt Einstein@Home. Teil 1. In: Sterne und Weltraum 4/2014, S. 46–53

Hier erfahren Sie, wie Sie sich mit Ihrem Heimcomputer selbst an der Suche nach Gravitationswellen beteiligen können.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372764

Kunst unter der Eisdecke

Statt einfach nur spiegelglatt zu werden, bilden frierende Wasserflächen oft seltsame Strukturen – geformt durch die wechselhaften Bedingungen in dieser sehr speziellen Umgebung.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»Sie schafft ewig neue Gestalten;
was da ist, war noch nie,
was war, kommt nicht wieder –
alles ist neu, und doch immer das Alte.«

Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)



H. JOACHIM SCHLICHTING



H. JOACHIM SCHLICHTING

Kristallstrukturen unterhalb der Eisschicht einer zugefrorenen Pfütze. Bei einem derart komplexen Formengewirr ist es – ohne die Randbedingungen des Frostvorgangs zu kennen – nicht mehr möglich, die einzelnen physikalischen Ursachen zu rekonstruieren.

Im Winter bereiten frisch zugefrorene Wasserpfützen besonders Kindern ein Vergnügen. Unter ihrem Stampfen bricht das Eis mit einem krachenden Geräusch und legt eine matschige Brühe frei. Die meisten Eltern dürften sich dabei über die verschmutzten Schuhe ärgern, doch mich betrübt mehr die Zerstörung der oft verborgenen Skulpturen. Denn diese sind häufig ästhetisch ansprechend und fordern die physikalische Intuition heraus: Eine zufrierende Wasserpfütze zeigt eine beeindruckende Formenvielfalt wie kaum ein anderer Phasenübergang vom flüssigen in den festen Zustand. Das steht im krassen Widerspruch zur schlichten Schulweisheit, wonach Wasser bei Unterschreiten des Gefrierpunkts von null Grad Celsius erstarrt und in Eis übergeht. Es ist dann eine an Glas erinnernde feste Substanz – und sonst nichts.

Schon bei der eigenen Herstellung von Eiswürfeln im Gefrierschrank kann man einige Überraschungen erleben. Sei es, dass sie manchmal mit zapfenförmigen Auswüchsen versehen sind (siehe »Eiszapfen, die gen Himmel wachsen«, SdW 3/2011, S. 38), oder, dass heißes Wasser erstaunlicherweise oft schneller erstarrt als kaltes (»Das Rätsel von Mpemba«, SdW 9/2015, S. 40). Von all dem ist im Physikunterricht üblicherweise nicht die Rede. Dabei handelt es sich bei den Phänomenen nicht etwa um bloße Launen der Natur. Zwar spielt der Zufall bei der Kristallbildung eine wesentliche Rolle, aber er ist eingebunden in zwangsläufige Vorgänge, und diese lassen sich im Prinzip physikalisch erschließen. Dazu reicht nicht immer der bloße Anblick der Muster aus; oft braucht man Kenntnisse über die

Vorgeschichte. Und manchmal kommt man nicht umhin, die Pfütze zumindest teilweise zu dekonstruieren, indem man etwa eine Eisscholle herausschneidet, um die Unterseite genauer zu untersuchen.

Wasser – ein ganz besonderer Stoff

Die Tatsache, dass sich Pfützen sowie Seen unterhalb des Gefrierpunkts mit einer festen Schicht kristallisierten Wassers überziehen, ist aus lebensweltlicher Sicht nichts Besonderes. Physiker sehen die Sache anders. Sie betrachten die Gesamtheit der Stoffe und stellen fest: Wasser verhält sich abweichend. Für ein einfaches Experiment kann man ein kleines Gefäß, zum Beispiel den Verschluss einer Getränkeflasche, randvoll mit flüssigem Kerzenwachs füllen und warten, bis es erstarrt ist. Das Volumen hat dann abgenommen, und die Oberfläche des festen Waxes ist konkav nach unten gedellt.

Bei Wasser ist es umgekehrt, das Eis überwölbt das Gefäß (Bild unten). Das liegt daran, dass Wasser seine größte Dichte bei vier Grad Celsius besitzt. Sobald diese Temperatur unterschritten

Wachs (links) und die meisten anderen Stoffe ziehen sich beim Erstarren zusammen, Wasser (rechts) dehnt sich hingegen aus.



H. JOACHIM SCHLICHTING



BEIDE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Bei einigen einfacheren Strukturen lässt sich nachvollziehen, was zu ihrer Entstehung führte, so etwa bei leicht erhabenen Bögen (links) und den gefrorenen Tropfen (rechts) unterhalb der Oberfläche.

wird, dehnt es sich aus («Anomalie des Wassers»). Das hat außerdem zur Folge, dass das kühlere Wasser nach oben steigt und bei null Grad an der Oberfläche erstarrt. Andere Flüssigkeiten gefrieren von unten her, da ihre kältesten Bereiche dichter werden und absinken.

Obwohl sich eine ungestörte Pfütze normalerweise mit einer nach außen hin glatten Eisschicht überzieht, kann man an der Unterseite, also zum noch nicht gefrorenen Wasser hin, oft auffällige Muster erkennen – etwa helle, manchmal fast kreisförmig geschwungene Streifen, die meist ungefähr um das Zentrum der Pfütze herum angeordnet sind. Trennt man eine Scholle heraus, so entpuppen sich diese Streifen als mehr oder weniger deutlich ausgeprägte Erhebungen oder Wülste auf der Eisschicht. Der sich aufdrängende Vergleich mit Jahresringen ist insofern nicht abwegig, als sie eine zeitliche Entwicklung dokumentieren: Sie bilden sich, wenn die Eisschicht den Kontakt zum Wasser verliert, aus dem sie hervorgegangen ist.

Zwar versiegelt das Eis die Oberfläche, so dass kein Wasser mehr verdunstet, es kann aber nach wie vor weiterhin im Boden versickern. Da die feste Eisschicht die Flüssigkeit darunter isoliert, kühlt der feuchte Boden langsamer ab und erstarrt nicht so schnell, was das Versickern sogar noch unterstützt.

Wenn der Füllstand unter der Eisschicht abnimmt, sinkt sie durch ihr eigenes Gewicht in der Mitte ein wenig ein und von den Rändern der Pfütze

her entsteht so allmählich ein keilförmiger Hohlraum. An der Grenzlinie zwischen Wasser, Luft und Eis bildet sich wegen der guten Benetzbarkeit von Eis ein Meniskus, der bei sinkender Temperatur, also meistens nachts, zu einem Eiswulst gefriert. Er hält das Wasser noch einige Zeit lang fest, auch wenn sich der Schwund kontinuierlich fortsetzt. Hat sich dann der Pfützeninhalt so stark verringert, dass schließlich die Verbindung zwischen Wasser und Eis reißt, stellt sich abermals eine Gleichgewichtslage ein. An der neuen Grenzschicht bildet sich bei wieder fallender Temperatur der nächste ringförmige Eisvorsprung. Das kann sich je nach Wetterlage und sonstigen Umständen mehrmals wiederholen.

Unter dem Eisdach

Solange die Eisschicht das Pfützenwasser berührt, ist sie völlig transparent und erlaubt manchmal den Durchblick auf den Grund. Zieht sich aber die Flüssigkeit zurück und hinterlässt einen feuchtigkeitsgesättigten Hohlraum, entsteht so etwas wie ein meteorologischer Mikrokosmos. Je nach den Temperaturverhältnissen können sich darin Konvektionswirbel bilden und Wasserdampf in Kontakt mit dem kalten Eis bringen. Abhängig von der Komplexität der Vorgänge und der mikroskopischen Topologie der Eisfläche kann der Dampf an der Eisschicht kristallisieren und sie von unten mit Raureif überziehen. Dieser wird dann durch das

darangestreuete Licht als mehr oder weniger strukturiertes, oft ästhetisch ansprechendes Muster sichtbar (siehe Bilder ganz links).

Zuletzt kann ein weiterer, häufig anzutreffender Effekt dadurch entstehen, dass sich die Temperatur insbesondere bei starker Sonneneinstrahlung in dem Hohlraum wie in einem Treibhaus stark erhöht. Dabei wird die Eisschicht teilweise von unten angeschmolzen, und der so entstehende Wasserfilm zieht sich stellenweise zu Tropfen zusammen, die darunter hängen bleiben und gelegentlich den Durchmesser von einer Ein-Euro-Münze annehmen. Wenn die Sonne untergeht und die Temperatur wieder unter den Gefrierpunkt sinkt, werden sie fest. In den erstarrten Tropfen bleibt manchmal eine feine helle Musterung zurück. Sie kommt von der ursprünglich im Wasser gelösten Luft, die in feinen Hohlräumen gefangen bleibt und durch die Lichtstreuung sichtbar wird. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting

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

Dieser Artikel und Links im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372768

Der Klebstoff der Welt

Gluonen halten Atomkerne zusammen und erzeugen einige der fundamentalen Eigenschaften der Materie. Dabei ist vieles an diesen Teilchen rätselhaft, denn sie sind in Experimenten kaum fassbar.

Von Rolf Ent, Thomas Ullrich und Raju Venugopalan

Anfang des 20. Jahrhunderts zeigten Physiker, dass Atome ihren Namen zu Unrecht tragen. Die nach dem griechischen Wort für »unteilbar« bezeichneten Objekte ließen sich in noch kleinere Materiebausteine spalten: Elektronen sowie Protonen und Neutronen. Später stellte sich heraus, dass die beiden Letzteren ihrerseits aus weiteren Teilchen bestehen, den Quarks. So genannte Gluonen – angelehnt an den englischen Begriff für Klebstoff – binden diese Quarks aneinander. Beide Teilchenarten sind nach heutigem Wissen nicht weiter spaltbar.

Laut Experimenten, die einen Blick in das Innere von Protonen und Neutronen erlauben, bestehen die Kernteilchen (Nukleonen) aus je drei Quarks, zwischen denen sich eine schwankende Zahl von Gluonen befindet. Hinzu kommen noch Paare aus Quarks und ihren Antiteilchen, die ständig auftauchen und wieder verschwinden.

AUF EINEN BLICK

SUBATOMARE SPUKGESTALTEN

1 Die Atomkerne bestehen aus Quarks, die mittels **Gluonen** aneinanderhaften.

2 Die **Wechselwirkung** beider Teilchenarten unterliegt noch nicht vollständig verstandenen, komplizierten Regeln. Unklar ist insbesondere, wie Quarks und Gluonen die **Masse** und den **Spin** von Protonen und Neutronen erzeugen.

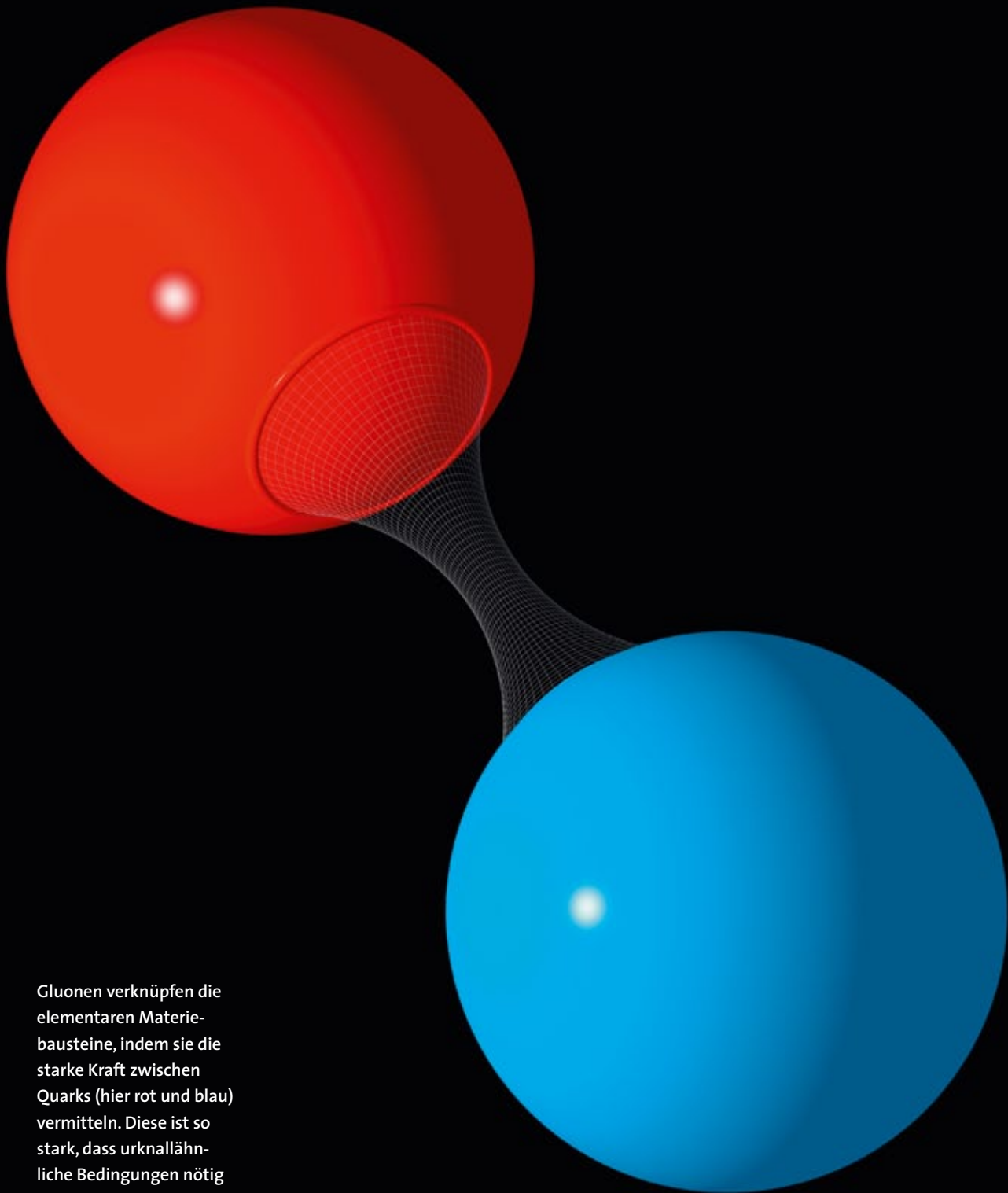
3 Um Gluonen gezielt untersuchen zu können, müssen Forscher **extreme Bedingungen wie kurz nach dem Urknall** herstellen. In neuen Experimenten gelingt ihnen das immer besser.

Und nicht nur in Protonen und Neutronen stecken sie. Große Beschleuniger produzierten im letzten halben Jahrhundert eine Vielzahl von Teilchen aus verschiedensten Kombinationen von Quarks und Anti-quarks. Physiker fassen sie alle unter dem Begriff »Hadronen« zusammen.

Wie Quarks mit Gluonen prinzipiell wechselwirken, können Theoretiker inzwischen beschreiben. Trotzdem fällt es ihnen schwer zu erklären, wie sich daraus die komplette Bandbreite der Eigenschaften von Hadronen ergibt. Addiert man beispielsweise die Massen von Quarks und Gluonen innerhalb eines Protons, so erhält man weniger als dessen Gesamtmasse. Wo also kommt der zusätzliche Betrag her? Außerdem ist immer noch unklar, wie Gluonen überhaupt Quarks aneinander binden. Und schließlich versteht noch niemand, wie die gemessene Eigendrehung eines Protons – eine als Spin bezeichnete Größe – sich aus den Spins der einzelnen Quarks und der Gluonen ergibt. Wie bei der Masse führt auch hier eine simple Addition nicht zum richtigen Ergebnis.

Erst, wenn die Physiker diese Probleme gelöst haben, können sie anfangen zu begreifen, wie Materie auf elementarer Ebene funktioniert. Laufende und künftige Forschungsarbeiten, darunter Untersuchungen exotischer Konfigurationen von Quarks und Gluonen, könnten mit etwas Glück dabei helfen, den Schleier zu lüften.

Die Frage nach dem Ursprung der Masse ist überhaupt eine der irritierendsten Fragen der Physik. Wir verstehen heute zwar ziemlich gut, wie Quarks und Leptonen – eine Familie von Teilchen, zu denen die Elektronen gehören – dazu kommen. Masse entsteht



Gluonen verknüpfen die elementaren Materiebausteine, indem sie die starke Kraft zwischen Quarks (hier rot und blau) vermitteln. Diese ist so stark, dass urknallähnliche Bedingungen nötig sind, um die Teilchen zu trennen und ihre Eigenschaften zu untersuchen.



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



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

durch das Higgsboson, einem 2012 am Large Hadron Collider aufgespürten Teilchen, und dem damit verbundenen Higgsfeld, das den gesamten Raum erfüllt. Wenn ein Teilchen sich hindurchbewegt, wechselwirkt es mit ihm und erhält so Masse. Häufig liest man, dieser Higgsmechanismus sei die Ursache der Masse des sichtbaren Universums. Doch das stimmt so nicht: Die Masse der Quarks trägt nur zwei Prozent zu derjenigen von Protonen und Neutronen bei. Die anderen 98 Prozent stammen, so vermuten Teilchenphysiker, von den Gluonen. Doch wie diese den gewaltigen Beitrag leisten, ist erst einmal nicht so klar – denn sie sind selbst masselos.

Nukleonenmasse durch Bewegung und Bindung

Einen Schlüssel zur Lösung des Rätsels liefert Einsteins berühmte Gleichung $E = mc^2$, die mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit c eine Beziehung zwischen der Ruhemasse m und der Energie E eines Teilchens herstellt. Wir müssen also die Gesamtenergie der Gluonen bestimmen, wenn wir die Masse des Protons ermitteln wollen. Sie zu berechnen ist jedoch ein schwieriges Unterfangen. Wären die Gluonen nicht an andere Partikel gebunden, wäre das einfach die Bewegungsenergie. Quarks und Gluonen lassen sich jedoch nicht isoliert vermessen. Sie haben als freie Teilchen eine unvorstellbar kurze Lebensdauer von Billionsteln einer billionstel Sekunde, dann sind sie bereits wieder Bestandteil eines neuen gebundenen Zustands und damit vor direkten Beobachtungen abgeschirmt. Zudem steckt die Energie der Gluonen nicht nur in ihrer Bewegung, sondern auch in der Bindung, die aus ihnen und den Quarks Teilchen mit längerer Lebensdauer macht. Um das Geheimnis der Masse zu lüften, müssen wir also zunächst einmal verstehen, wie Gluonen als subatomarer Klebstoff wirken. Doch auch das ist kompliziert.

Auf den ersten Blick ist die Antwort auf die Frage, wie Gluonen Quarks zusammenhalten, einfach: mit der so genannten starken Wechselwirkung. Doch diese Kraft ist selbst ein Rätsel. Sie ist neben der Gravitation, dem Elektromagnetismus und der schwachen Wechselwirkung eine der vier fundamentalen Naturkräfte. Von diesen ist sie bei Weitem die stärkste – daher ihr Name. Sie bindet nicht nur Quarks zu Hadronen, sondern auch Protonen und Neutronen zu Atomkernen. Dabei überwindet sie die gewaltige elektromagnetische

Abstoßung zwischen den positiv geladenen Protonen. Zu jeder der vier Wechselwirkungen gehört ein spezielles Teilchen, das jeweilige Träger- oder Austauschteilchen. So wie das Photon das Trägerpartikel des Elektromagnetismus ist, ist das Gluon dasjenige der starken Wechselwirkung (siehe Kasten »Der Teilchenbausatz«).

Doch die starke Kraft funktioniert mitunter überraschend. Gemäß quantenmechanischer Regeln ist die Reichweite einer Wechselwirkung mit der Ruhemasse ihres Trägerpartikels verknüpft: Je leichter es ist, desto größer ist sie. Die elektromagnetische Kraft hat wegen der masselosen Photonen beispielsweise eine unendliche Reichweite. Ein freies Elektron auf der Erde spürt – jedenfalls im Prinzip – eine leichte Abstoßung durch ein Elektron auf der erdabgewandten Seite des Mondes. Im Gegensatz dazu reicht die starke Wechselwirkung nicht über den Atomkern hinaus. Demnach sollten Gluonen sehr viel Masse besitzen – und doch müssen sie der Theorie zufolge masselos sein.

Seltsam ist außerdem, dass die Anziehungskraft zwischen zwei Quarks wächst, wenn der Abstand zwischen ihnen größer wird. Die elektromagnetische Kraft hingegen nimmt mit dem Abstand ab. Experimente am Stanford Linear Accelerator Center in den USA (heute das SLAC National Accelerator Laboratory), bei denen energiereiche Elektronen auf Protonen trafen, lieferten in den 1960er Jahren erstmals Beweise für die Existenz der Quarks. Manchmal gingen die Elektronen nicht durch die Protonen hindurch, sondern trafen auf einen festen Widerstand – ein Quark – und prallten zurück. Aus den Richtungen und den Geschwindigkeiten, mit der die Elektronen zurückgeworfen wurden, konnten die Forscher auf die Anwesenheit und die Anordnung der Teilchen im Inneren der Protonen schließen. Diese »tiefinelastisch« genannten Streuexperimente zeigten den Physikern, dass Quarks sich bei kurzen Abständen nur schwach anziehen. Bei großen Abständen waren jedoch keine freien Quarks zu finden, was wiederum auf eine sehr starke Anziehungskraft deutete.

Ein anschauliches Bild für dieses seltsame, »Confinement« genannte Verhalten ist eine Art Gummiband, das zwei Quarks zusammenhält. Sind die beiden nahe beieinander, so zieht es die Teilchen nur schwach aufeinander zu. Ist der Abstand zwischen ihnen groß, so ist das Band straff gespannt und übt eine große Kraft aus. Die starke Wechselwirkung zwischen zwei Quarks zieht bei einem Abstand von der Größe eines Protons mit der Gewichtskraft von 16 Tonnen. Bei diesen Größenordnungen reißt das Band. Neue Teilchenpaare entstehen und verbinden sich mit den vorhandenen. Wie das passiert, ist ein weiteres Mysterium und spielt eine wichtige Rolle bei der Frage, warum Gluonen das Innere von Atomkernen zusammenhalten, aber nicht darüber hinaus wirken.

In den 1970er Jahren entwickelten Physiker die Quantenchromodynamik, kurz QCD. Diese Theorie beschreibt mathematisch die starke Wechselwirkung. Ganz ähnlich wie die elektromagnetische Kraft von elektrischen Ladungen ausgeht, geht die starke Wechselwirkung gemäß der QCD von ei-

ner Eigenschaft namens »Farbladung« aus. Das Konzept löst dabei zwar das Problem, warum sich die starke und die elektromagnetische Wechselwirkung so sehr unterscheiden, wirft aber zugleich eine ganze Reihe neuer Fragen auf – darunter die, warum einige Teilchen eine solche Eigenschaft haben, andere dagegen nicht.

Gemäß der QCD tragen sowohl Quarks als auch Gluonen eine Farbladung. Derart geladene Teilchen wechselwirken miteinander, indem sie Gluonen austauschen. Demnach müssten also auch Gluonen ihresgleichen untereinander hin- und hersenden. Das unterscheidet die Quantenchromodynamik erheblich vom Elektromagnetismus. Photonen übertragen die elektrische Kraft, sind selbst aber ungeladen. Sie beeinflussen sich daher nicht gegenseitig, wie man an sich kreuzenden Lichtstrahlen in einem staubigen Raum beobachten kann. Die Theoretiker machen jedoch gerade diese Selbstwechselwirkung der Quarks dafür verantwortlich, dass die starke Kraft bei geringen Abständen abnimmt. Ein Gluon kann sich vorübergehend in ein Paar aus Quark und Antiquark oder in eines aus Gluonen verwandeln, um dann wieder zu einem einzelnen Gluon zu werden. Die erste dieser beiden Fluktuationen verstärkt die Wechselwirkung zwischen Farbladungen, die zu einem Gluonenpaar dagegen schwächt sie ab. Da Gluonenoszillationen in der Quantenchromodynamik häufiger auftreten als solche zu Quark und Antiquark, tragen sie den Sieg davon. Für diese Entdeckung erhielten David Gross, Frank Wilczek und David Politzer 2004 den Physiknobelpreis.

Eine unhandliche Theorie

Über Jahrzehnte hinweg haben Experimente in aller Welt die QCD als eine wichtige Säule des Standardmodells der Physik bestätigt. Trotzdem sind immer noch viele Details dieser Theorie mysteriös. So trägt jedes Quark in einem Proton eine individuelle Farbladung – und trotzdem ist das Proton insgesamt farbladungsneutral. Auch beispielsweise in einem Hadron namens Pi-Meson besitzen das Quark und das Antiquark eine Farbladung – aber das aus ihnen gebildete Teilchen nicht. Diese Farbneutralität von Hadronen ähnelt der elektrischen Ladungsneutralität von Atomen. Während Letztere jedoch einfach daraus folgt, dass sich die positiven Ladungen der Protonen und die negativen Ladungen der Elektronen ausgleichen, bleibt es ein Rätsel der QCD, wie genau sich farbige Quarks und Gluonen immer zu farblosen Hadronen zusammenfügen.

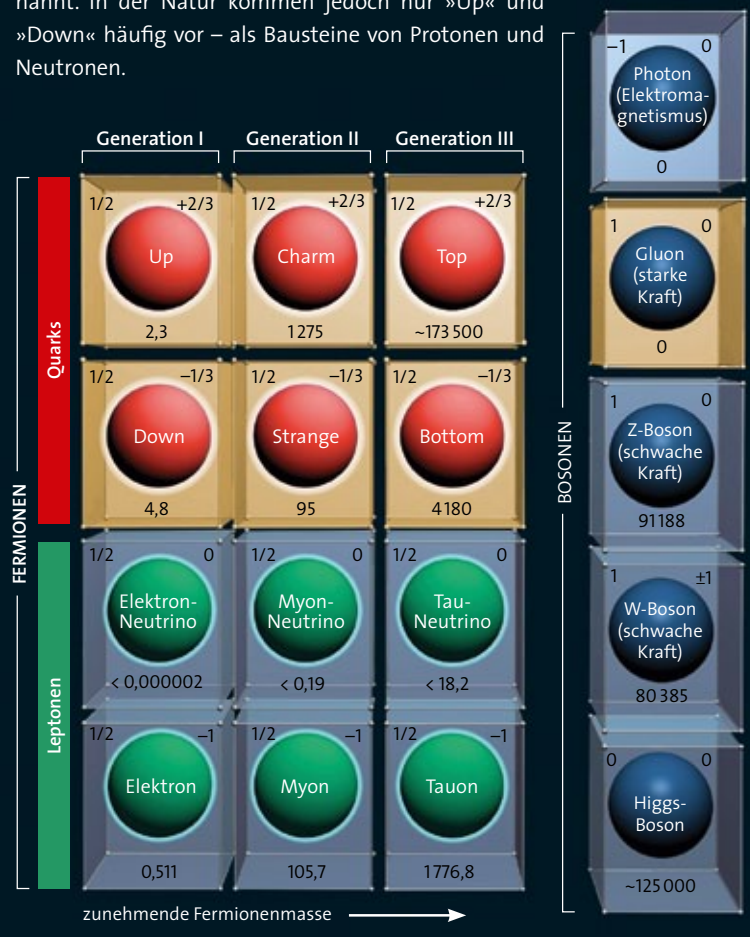
Die QCD sollte außerdem eine Erklärung dafür liefern, wie Atomkerne trotz der starken elektromagnetischen Abstoßung zwischen den Protonen darin zusammenhalten. Doch erweist es sich als große Herausforderung, die Kernphysik aus der QCD herzuleiten. Das Problem liegt in der schier unüberwindlichen Schwierigkeit, die Gleichungen für die großen Abstände zu lösen, bei denen die Wechselwirkung zwischen Quarks und Gluonen sehr stark wird. Weiterhin fehlt uns eine Antwort auf die Frage, wie aus der Theorie das Confinement folgt, also die Gefangenschaft von Quarks und Glu-

onen in Hadronen, die ein isoliertes Auftreten dieser Teilchen verhindert. Das ist auch eines von sechs herausragenden mathematischen Problemen, für deren Lösung das US-amerikanische Clay Mathematics Institute ein Preisgeld von einer Million Dollar ausgelobt hat.

Eine der verblüffenden Folgen aus der QCD ist, dass die Anzahl der Bausteine im Inneren eines Protons erheblich schwankt. Zusätzlich zu dem Grundgerüst aus drei Quarks schwirrt eine sich ständig ändernde Anzahl von Gluonen umher. Paare aus Quarks und Antiquarks entstehen und vergehen wieder. Die Physiker sprechen bildhaft von einem brodelnden »Quantenschaum«. Beschleunigt man Proto-

Der Teilchenbausatz

Die Kerne aller Atome im Universum bestehen aus nur zwei Arten von Elementarteilchen: Quarks und Gluonen. Gluonen zählen zu den Bosonen (rechter Block), welche die Naturkräfte übertragen (mit Ausnahme des Higgs-Bosons). Sie sind die Träger der stärksten der Wechselwirkungen. Diese bindet die Quarks in Protonen und Neutronen aneinander. Neben den Bosonen gibt es noch die Fermionen (linker Block), zu denen die Leptonen wie etwa das Elektron sowie die Quarks gehören. Von diesen gibt es sechs Typen, Flavours genannt. In der Natur kommen jedoch nur »Up« und »Down« häufig vor – als Bausteine von Protonen und Neutronen.

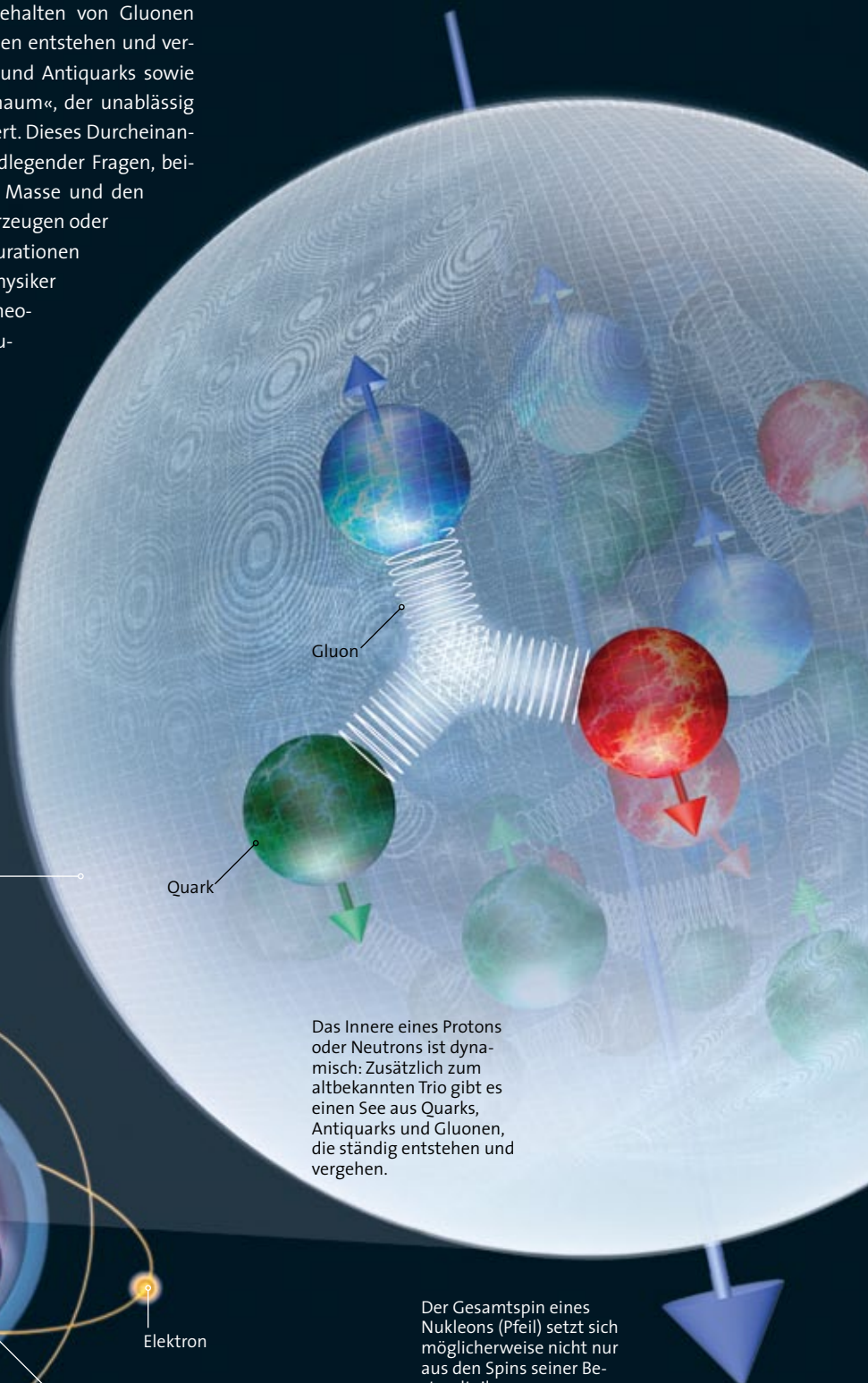
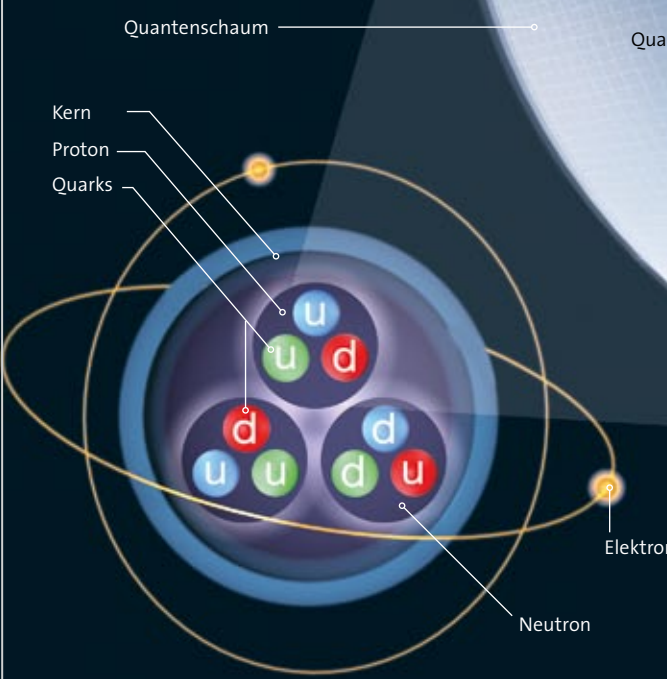


Geheimnisvolle Gluonen

Jedes Proton und Neutron im Inneren eines Atoms besteht im Wesentlichen aus drei Quarks, zusammengehalten von Gluonen (Bild). Zusätzlich zu diesen primären Teilchen entstehen und verschwinden permanent Paare von Quarks und Antiquarks sowie Gluonen. Das erzeugt einen »Quantenschaum«, der unablässig die Landschaft in den Atomkernen verändert. Dieses Durcheinander verkompliziert eine ganze Reihe grundlegender Fragen, beispielsweise wie Quarks und Gluonen die Masse und den Spin der aus ihnen aufgebauten Teilchen erzeugen oder wie Gluonen die Quarks in stabilen Konfigurationen zusammenhalten. Eine Methode, mit der Physiker diese Mysterien auflösen wollen, ist die theoretische und sogar experimentelle Untersuchung von ungewöhnlichen Zusammenstellungen aus Gluonen und Quarks (gegenüberliegende Seite)

Die Atomstruktur unter zwei Blickwinkeln

Das unten gezeigte klassische Bild eines Atoms enthält Elektronen, die einen Kern aus Protonen und Neutronen umkreisen. Diese bestehen wiederum aus jeweils drei Quarks. Das Bild rechts zeigt außerdem den Quantenschaum, ein genaueres und lebendigeres Bild des Inneren subatomarer Teilchen.



Das Innere eines Protons oder Neutrons ist dynamisch: Zusätzlich zum altbekannten Trio gibt es einen See aus Quarks, Antiquarks und Gluonen, die ständig entstehen und vergehen.

Der Gesamtspin eines Nukleons (Pfeil) setzt sich möglicherweise nicht nur aus den Spins seiner Bestandteile zusammen, sondern auch aus deren Bahnbewegungen.

Exotische Materiezustände

Physiker haben ungewöhnliche Kombinationen aus Quarks und Gluonen jenseits der vertrauten Protonen und Neutronen theoretisch entworfen – und in einigen Fällen sogar in Experimenten hergestellt. Diese Exoten bieten neue Möglichkeiten, die starke Wechselwirkung zu untersuchen – und damit vielleicht einige grundlegende Geheimnisse der Materie zu lüften.

Gluonenbälle und ihre Verwandtschaft

Theoretische Simulationen deuten darauf hin, dass Quarks und Gluonen auch andere Teilchen bilden können als nur Protonen und Neutronen. Ein Beispiel sind »Gluonenbälle« (a), die ausschließlich aus Gluonen bestehen. Auch Hybride aus Gluonen und einem Quark-Antiquark-Paar (b) sind denkbar, sowie Tetraquarks (c) aus Gluonen und zwei Quarkpaaren. Für Letztere gibt es inzwischen bereits eine wachsende Zahl von experimentellen Hinweisen. Gluonenbälle und Hybride entziehen sich bislang aber der Beobachtung.



Gesättigter Zustand

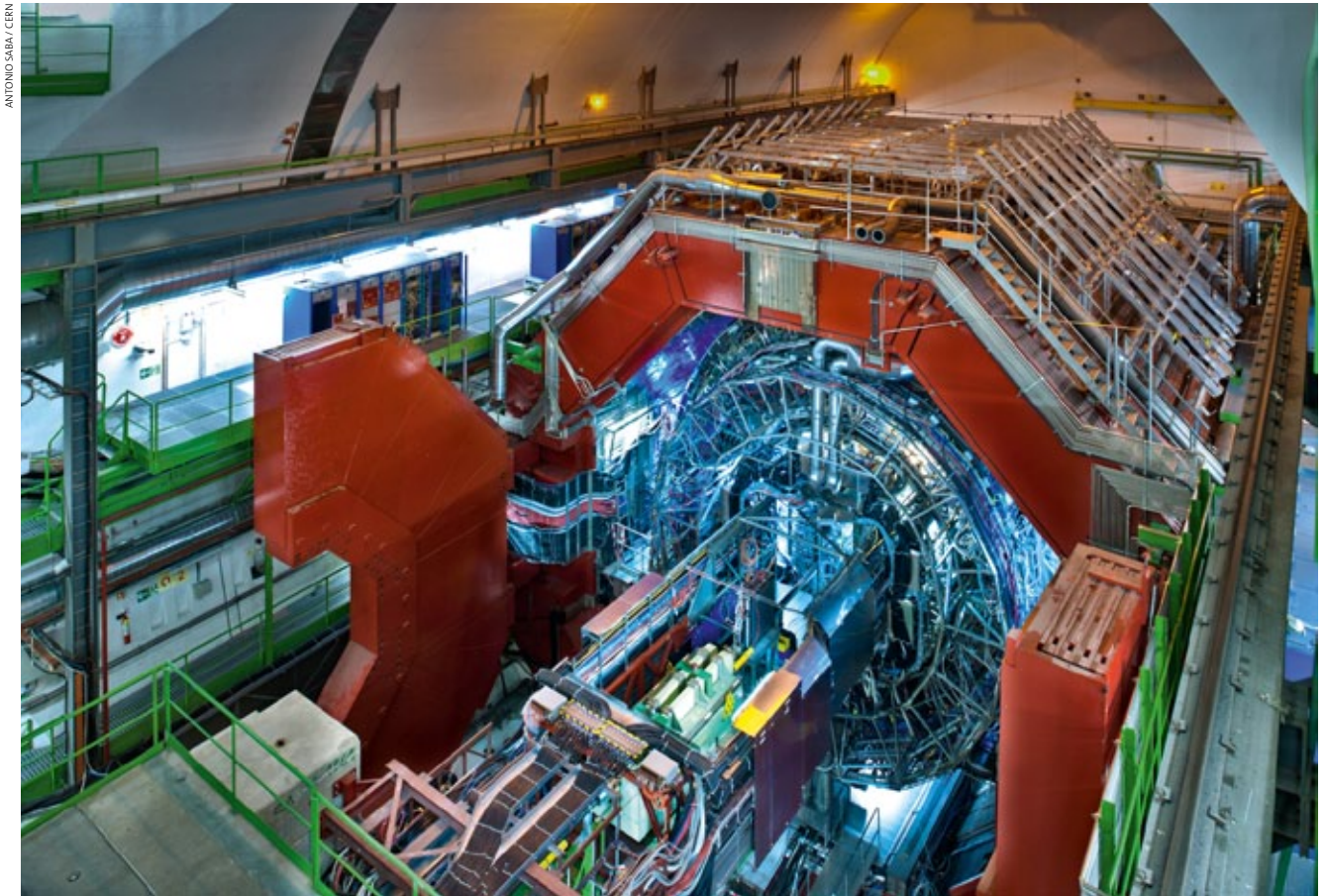
Beschleunigt man Protonen und Neutronen auf hohe Geschwindigkeiten, so vervielfacht sich die Zahl ihrer Gluonen. Dabei spalten sie sich fortlaufend in Tochterpaare auf, von denen jeder Partner etwas weniger Energie besitzt. Schließlich erreicht das Proton oder Neutron eine Grenze maximaler Besetzung – mehr Gluonen passen nicht hinein. Dieser theoretisch vorhergesagte Zustand wird als Farb-Glas-Kondensat bezeichnet. Teilchenbeschleuniger haben zwar deutliche Hinweise auf seine Existenz geliefert, aber ein eindeutiger Beweis steht noch aus.



Ein Abbild des jungen Alls

Am Anfang war der Kosmos zu heiß, als dass sich Atome oder auch nur stabile Protonen und Neutronen hätten bilden können. Quarks und Gluonen schwirrten damals frei umher. In Teilchenbeschleunigern gelang es, beim Zusammenstoß extrem energiereicher, schwerer Atomkerne dieses Gefüge, ein Quark-Gluon-Plasma, zu replizieren (links unten, künstlerische Darstellung). Es beim Abkühlen zu beobachten, liefert den Physikern nicht nur neue Erkenntnisse über das Verhalten der Elementarteilchen, sondern auch über die Entwicklung des frühen Universums.





ANTONIO SABAY / CERN

Der abgebildete ALICE-Detektor ist Teil des Large Hadron Collider im CERN bei Genf. Bei diesem Experiment versuchen Teilchenphysiker, mit kollidierenden Bleikernen einen Zustand extremer Dichte und Temperatur zu erzeugen, in dem sich Quarks und Gluonen frei bewegen können.

nen und Neutronen extrem, so spalten sich die Gluonen in ihrem Inneren in Paare auf, von denen jedes Gluon weniger Energie besitzt als das ursprüngliche. Jedes dieser Produkte erzeugt weitere Paare mit noch weniger Energie. Theoretisch geht dieser Prozess ewig fort – aber wir wissen, dass das nicht der Fall ist. Denn wenn die Gluonen sich immer weiter aufspalten würden, wäre das Proton nicht stabil; es würde kollabieren. Da Materie aber offensichtlich recht haltbar ist, muss etwas diese Kettenreaktion unterbrechen. Ein Lösungsansatz ist eine maximale Besetzungszahl für Gluonen in Protonen. Dabei werden sie so viele, dass einige den gleichen Raum einnehmen müssten. Die Teilchen stoßen sich dadurch ab, und die weniger energiereichen unter ihnen verschmelzen zu Gluonen mit mehr Energie. Das führt schließlich zu einem Gleichgewicht.

Dieser gesättigte Gluonenzustand wird auch als Farb-Glas-Kondensat bezeichnet. Er wäre eine Art Essenz der stärksten Kräfte im Universum, bleibt vorerst jedoch nur eine Vermutung. Bislang haben Forscher erst wenige experimentelle Hinweise auf seine Existenz, und sie verstehen seine Eigenschaften keineswegs vollständig. Erst tiefinelastische Streuexperimente mit noch höheren Energien, als wir

heute erreichen, können Aufschluss über diesen dichten, extremen Gluonenzustand liefern. Ist die Wechselwirkung, welche die Anzahl der Gluonen im Farb-Glas-Kondensat beschränkt, dieselbe, die auch die Nukleonen zusammenhält? In diesem Fall könnte die Beobachtung in zwei ganz verschiedenen Zusammenhängen neue Erkenntnisse darüber ermöglichen, wie die Gluonen diese Kraft erzeugen.

Woher kommt der Spin des Protons?

Ein weiteres Rätsel ist, wie sich der Spin der zusammengesetzten Teilchen aus demjenigen der einzelnen Quarks und Gluonen ergibt. Alle Hadronen besitzen einen solchen quantenmechanischen Drehimpuls, anschaulich vergleichbar mit dem eines rotierenden Körpers. Beispielsweise bewegen sich Teilchen mit unterschiedlichem Spin in einem Magnetfeld in verschiedene Richtungen.

Experimente zeigen, dass Quarks etwa 30 Prozent des Spins eines Protons erzeugen. Woher kommt der Rest? Das Bild eines Protons als schäumender Teilchensee aus Quarks und Gluonen legt sofort Letztere als weitere Verursacher nahe. Doch Versuche ergaben, dass nur etwa 20 Prozent des

Protonenspins von dort stammt. Es fehlt also immer noch die Hälfte.

Der Lösung des Problems könnte uns ein Blick in das Sonnensystem näher bringen: Zum Gesamtdrehimpuls tragen hier nicht nur die Eigendrehungen der Himmelskörper bei, sondern ganz entscheidend auch die Bahnbewegungen. Solche führen auch die Quarks, Antiquarks und Gluonen im Inneren eines Protons aus. Um diese Bahndrehimpulse zu verstehen, benötigen wir sowohl die Aufenthaltsorte als auch die Geschwindigkeiten von Quarks und Gluonen im Proton. Einer der Autoren (Ent) führt zu diesem Zweck mit Elektronenstrahlen hoher Intensität tiefinelastische Streuexperimente durch. Die Untersuchungen liefern immer mehr Details und entwickeln sich von einzelnen Schnappschüssen allmählich zu 3-D-Filmen von den subatomaren Bewegungen – und das mit einer Auflösung im Bereich von weniger als einem Femtometer, einem milliardstel Meter.

Um die wahre Natur der Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen zu verstehen, müssen wir die Teilchen nicht nur in den vertrauten Konfigurationen von Neutronen, Protonen und anderen wohlbekanntem Hadronen untersuchen, sondern in allen möglichen Situationen. Die QCD erlaubt auch die Existenz exotischer Zustände, die mit der normalen Materie nicht mehr viel zu tun haben. Simulationen deuten auf die Existenz neuer, farbladungsneutraler Hadronen wie beispielsweise Gluonenbälle, die ausschließlich aus Gluonen bestehen, oder so etwas wie Moleküle aus zwei Quark-Antiquark-Paaren. Auch Hybride sind möglich: gebundene Zustände aus Quark-Antiquark-Paaren und Gluonen. Bislang sind experimentelle Hinweise auf derlei seltsame Zusammenballungen rar. Immerhin spürten die Forscher bereits Kandidaten für »Tetraquarks« oder »Pentaquarks« aus vier beziehungsweise fünf Quarks auf (siehe SdW 10/2014, S. 14/15, und SdW 9/2015, S. 6). Dank einer ganzen Reihe von Projekten könnte sich die Situation jedoch bald deutlich verbessern. Beispielsweise beginnt gerade das Experiment GlueX an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility in Virginia, USA, das sich speziell diesen Exoten widmet.

Mit großen Teilchenbeschleunigern wie dem LHC bei Genf versuchen Physiker, einen extremen Materiezustand zu untersuchen, das Quark-Gluon-Plasma. Es entsteht, wenn Atomkerne mit enorm hohen Energien aufeinanderprallen. Theoretiker vermuten, dass bei einer solchen Kollision das Farb-Glas-Kondensat zerbricht und ein Schauer aus praktisch ungebundenen Quarks und Gluonen entsteht. Das Plasma wäre mehr als vier Billionen Grad Celsius heiß.

Das Quark-Gluon-Plasma ähnelt der Materie unmittelbar nach dem Urknall. Wenn man es beim Abkühlen beobachten könnte, wäre das also zugleich ein Einblick in die frühe Entwicklung des Kosmos. Außerdem ist die Verwandlung von Protonen und Neutronen in ein solches Plasma gewissermaßen die Umkehrung des Confinements und liefert so Rückschlüsse auf das, was die einzelnen Kernbausteine zusammenhält (siehe »Die Jagd nach dem Quark-Gluon-Plasma«, SdW 5/2011, S. 86–95).

Gern würden Wissenschaftler die Aufenthaltsorte, Geschwindigkeiten und Spins aller Bestandteile von Protonen und Neutronen vermessen können. Dann könnten sie die Beiträge der Quarks und Gluonen zur Masse und zum Spin der aus ihnen gebildeten Teilchen berechnen. Dieses Wissen ließe sich jedoch nur mit einem »Femtoskop« erschließen – einem Streuexperiment mit einer Auflösung, die einem Tausendstel des Protonenradius entspricht. In den USA bemühen sich Labore darum, ein solches Projekt zu finanzieren. Im Gegensatz zu bisherigen tiefinelastischen Streuexperimenten, bei denen Elektronen auf stationäre Atomkerne treffen, soll die neue Maschine beide Teilchenarten auf relativistische Geschwindigkeiten beschleunigen und frontal ineinanderrasen lassen. Dieser »Electron-Ion Collider« hätte neben der größeren Kollisionsenergie auch erheblich dichter gepackte Teilchenpakete in den Strahlen und damit eine wesentlich höhere Ausbeute an Zusammenstößen. Die Forscher hoffen auf eine tausendfach gesteigerte Kollisionsrate – und damit auf eine entsprechend große Zahl von Schnappschüssen aus dem Inneren der Protonen und Neutronen.

Seit die Quantenchromodynamik vor vier Jahrzehnten aufkam, haben die Teilchenphysiker bei ihrem Versuch, die starke Wechselwirkung zu verstehen, viele Fortschritte gemacht. Doch es fehlen immer noch entscheidende Stücke zu einem umfassenden und einfachen Bild davon, wie die Gluonen die Quarks zusammenkleben. Heute ist die Technik aber so weit, dass in den nächsten vier Jahrzehnten hoffentlich eine Antwort auf die entscheidende Frage vorliegen wird, wie Materie auf allerkleinster Ebene beschaffen ist. ~

DIE AUTOREN



Rolf Ent (links) arbeitet seit 1993 an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility im US-Bundesstaat Virginia und ist dort stellvertretender Direktor der experimentellen Kernphysik. **Thomas Ullrich** (Mitte) ist seit 2001 am Brookhaven National Laboratory in New York tätig. Außerdem forscht und lehrt er an der Yale University. Er war an zahlreichen Experimenten zur Untersuchung des Quark-Gluonen-Plasmas beteiligt. **Raju Venugopalan** leitet die Gruppe für theoretische Kernphysik am Brookhaven National Laboratory. Er untersucht dort die Wechselwirkung von Quarks und Gluonen bei hohen Energien.

QUELLEN

Braun-Munzinger, P., Stachel, J.: The Quest for the Quark-Gluon Plasma. In: Nature 448, S. 302–309, 2007
Gross, D. J., Wilczek, F.: Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories. In: Physical Review Letters 30, 1343–1346, 1973
Politzer, H. D.: Reliable Perturbative Results for Strong Interactions? In: Physical Review Letters 30, S. 1346–1349, 1973

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1368110

Die Urahnenn der großen Mythen

Anthropologen und Ethnologen analysieren Märchen, Mythen und Sagen, um Entwicklungslinien aufzudecken. Mit den Algorithmen von Genetikern verfolgen sie die Evolution der »Mythenfamilien« bis in vorgeschichtliche Zeit – und rekonstruieren deren Urformen.

Von Julien d’Huy

Einst begehrte Zeus, der Herr des Olympos, die schöne Nymphe Kallisto. Diese gehörte aber zum Gefolge der Jagdgöttin Artemis und war daher zur Keuschheit verpflichtet. Doch Zeus näherte sich der Nymphe in der Gestalt ihrer Herrin. Zu spät erkannte Kallisto den Betrug. Sie vermochte sich des mächtigen Gottes nicht zu erwehren, und so nahm das Schicksal seinen Lauf: Die Schwangere wurde von Artemis verstoßen und nach der Niederkunft noch von Hera, der eifersüchtigen Gattin des Zeus, in eine Bärin verwandelt. Eines Tages stieß sie auf ihren Sohn Arcas, aus dem ein mutiger Jäger geworden war. Als der sich anschickte, die vermeintliche Bestie zu töten, griff Zeus ein und versetzte beide als Sternbilder an das nächtliche Firmament. Wir kennen sie unter den Namen Großer und Kleiner Bär.

Diese dramatische Erzählung aus der griechischen und römischen Antike klingt überraschenderweise auch in vielen Mythen anderer Völker der Welt an. Die in Sibirien lebenden Tschuktschen etwa deuten das Sternbild des Orion als einen Jäger, der ein Rentier verfolgt. Es entspricht dem einem »W« gleichenden Sternbild, das im Westen Kassiopeia heißt. In

der ob-ugrischen Tradition verfolgt der Jäger einen Elch, repräsentiert durch unseren Großen Bären. Eine solche »Kosmische Jagd« kennen auch Völker in Afrika und in der Neuen Welt. Bei den Irokesen im Nordosten Amerikas etwa jagen und verwunden drei Jäger einen Bären. Dessen Blut färbt die Blätter des Herbstwalds. Doch das Tier erklimmt einen Berg und springt von dort an den Himmel. Bär und Jäger verschmelzen daraufhin zum Sternbild des Großen Bären.

Projektionsfläche Sternenhimmel

Dass Menschen am Sternenhimmel Gestalten wahrnehmen, ist eine Eigenheit unseres kognitiven Systems, die wohl einen Überlebensvorteil bot: Wer ein im Blattwerk des Urwalds verborgenes Raubtier ausmachte, konnte sich in Sicherheit bringen. Dass manche Kulturen andere Konstellationen mit den jeweiligen Beutetieren identifizierten, verwundert nicht weiter. Interessant ist die bei allen Variationen auffallende grundlegende Struktur: Ein Jäger verfolgt oder erlegt ein Tier; beide werden zu Sternbildern. Viele Forscher betrachten daher die verschiedenen Erzählungen als Vertreter einer weltweiten Mythenfamilie: der »Kosmischen Jagd«.

Eine nahe liegende Erklärung dieses Phänomens wäre eine universelle Eigenschaft der menschlichen Psyche, die eine solche Geschichte als Erklärung der kosmischen Konstellationen bei Jäger-und-Sammlervölkern geradezu zwingend hervorbringt (bäuerliche Gesellschaften erkennen in Sternbildern eher domestizierte Tiere). Doch warum fehlen entsprechende Erzählungen in den mündlichen Traditionen Indonesiens, Papua-Neuguineas und Australiens? Ethnologen und Anthropologen der so genannten historisch-geografischen Theorie glauben, dass die Familie »Kosmische Jagd« auf eine Urerzählung zurückgeht, die sich weltweit über einen sehr langen Zeitraum ausgebreitet hat. So waren Eurasien und Nordamerika 25 000 bis 14 000 v. Chr. durch eine Landbrücke verbunden, was Migrationen ermöglichte. Genetische Studien bestätigen, dass die meist als Präclovis bezeichneten ersten Siedler Amerikas aus Ostasien stammten.

AUF EINEN BLICK

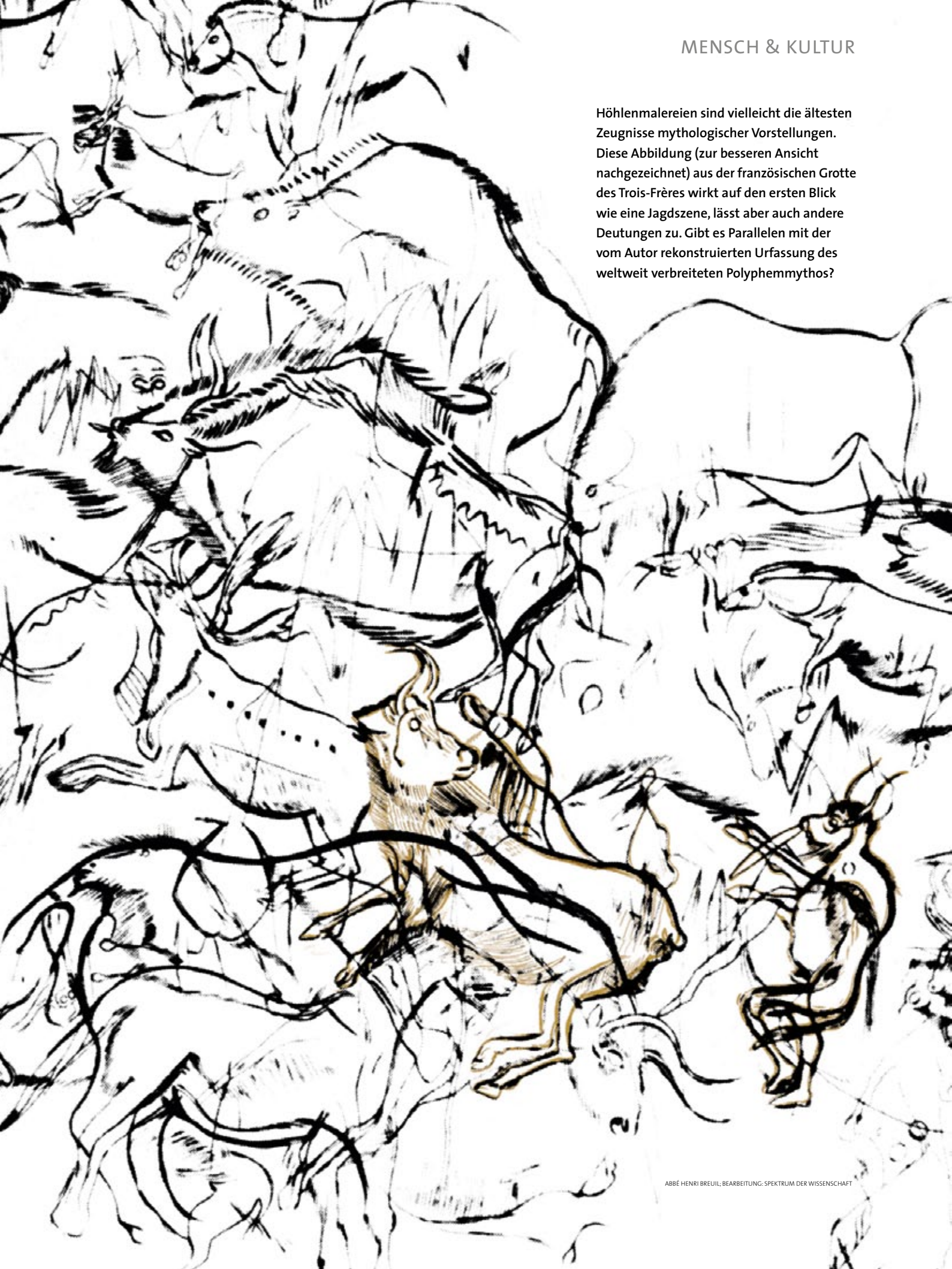
COMPUTERANALYSE URALTER LEGENDEN

1 Drei **Mythenfamilien** sind weltweit in zahlreichen Varianten vertreten: »**Kosmische Jagd**«, »**Pygmalion**« und »**Polyphem**«. Jede Version lässt sich in ihre charakteristischen Einzelelemente zerlegen, so genannte **Mytheme**.

2 Mytheme entsprechen in der Genetik den Grundbausteinen der DNA, sie kodieren gleichsam einen **Mythos**. Mit Hilfe **phylogenetischer Algorithmen** lassen sich daher Stammbäume und sogar die Urform einer Familie rekonstruieren.

3 **Mythenstammbäume** spiegeln auch die Besiedelungsgeschichte der Erde durch den Menschen wider. Insbesondere die »Kosmische Jagd« und »Polyphem« reichen offenbar bis in die Altsteinzeit zurück und gelangten im Zuge von Migrationen bis nach Nordamerika.

Höhlenmalereien sind vielleicht die ältesten Zeugnisse mythologischer Vorstellungen. Diese Abbildung (zur besseren Ansicht nachgezeichnet) aus der französischen Grotte des Trois-Frères wirkt auf den ersten Blick wie eine Jagdszene, lässt aber auch andere Deutungen zu. Gibt es Parallelen mit der vom Autor rekonstruierten Urfassung des weltweit verbreiteten Polyphemmythos?



Geht die traurige Geschichte um Kallisto also auf einen Mythos zurück, den sich Menschen schon in der Altsteinzeit am Lagerfeuer erzählten?

Das Phänomen solcher Familien, oft nur mündlicher Überlieferungen, wurde Anfang des 19. Jahrhunderts offenbar – durch die Sammlungen von Sagen und Volksmärchen der Sprachwissenschaftler Jakob und Wilhelm Grimm. Den Brüdern fielen bereits Ähnlichkeiten deutscher Volkserzählungen mit solchen aus Indien, Persien und anderen Ländern auf. Bald entstand das historisch-geografische Modell, dem zufolge solche Parallelen Anzeichen einer Verwandtschaftsbeziehung sind, die eine Eingruppierung der verschiedenen Vertreter in Familien rechtfertigt.

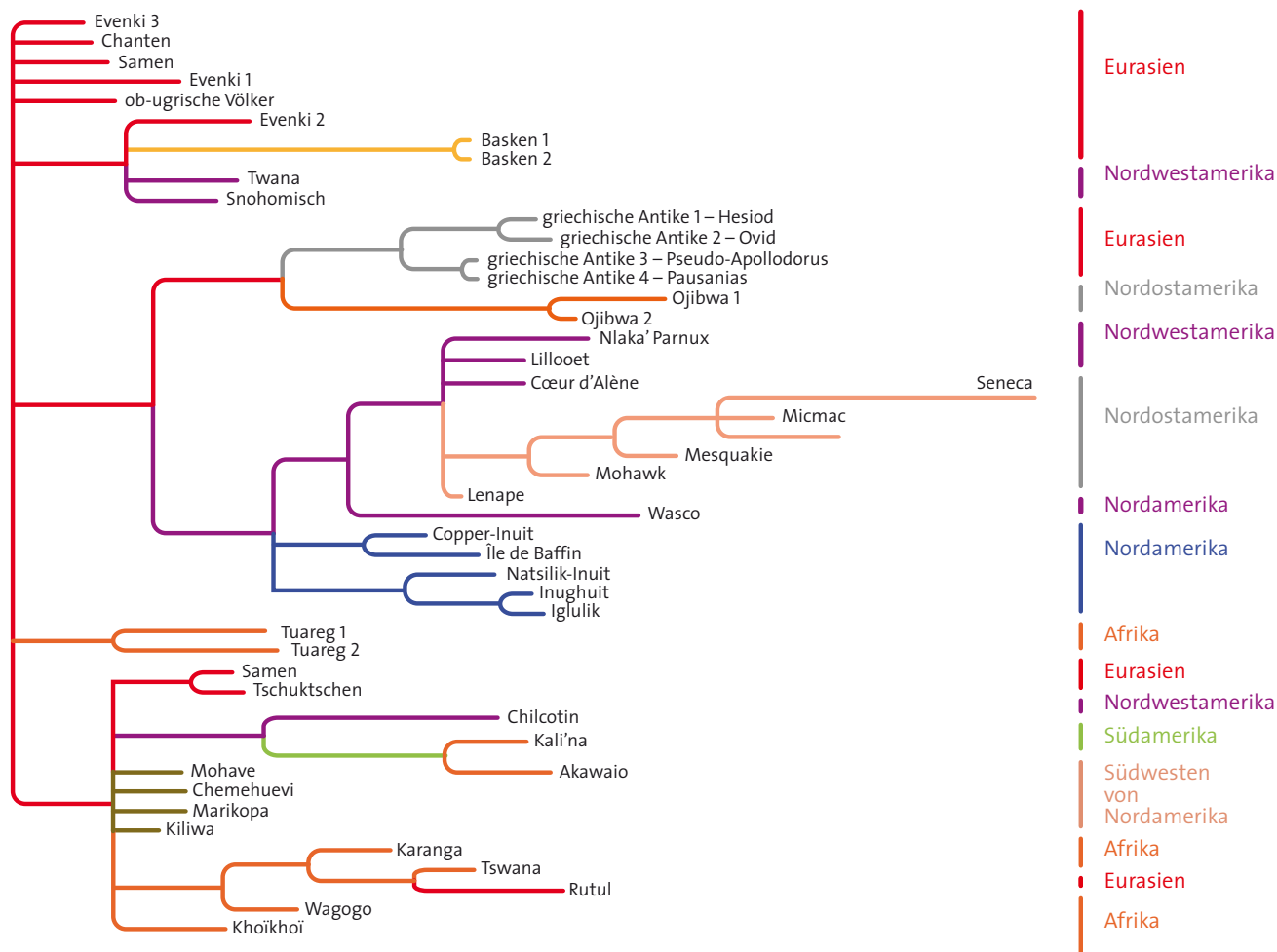
Gleichsam würden Mythen von einer Generation zur nächsten weitervererbt, wobei ihre wichtigsten Merkmale zwar meist beibehalten werden, jedoch unter mehr oder minder bewusster Hinzufügung von Innovationen eine Entwicklung stattfindet. Der Anthropologe Claude Lévi-Strauss (1908–2009) schrieb dazu: »In dem Glauben, lediglich ihren

Inhalt wiederzugeben, verändert man die Mythen zugleich.« Über längere Zeiträume hinweg muss sich eine mündlich tradierte Erzählung also zwangsläufig verändern, und zwar umso stärker, je größer der zeitliche Abstand zu ihrem Ursprung wird.

Diese »Evolution« kann zudem eine geografische Dimension haben. Schon 1951 zeigte die schwedische Volkskundlerin Anna Birgitta Rooth, dass »Aschenputtel« auf ein 4000 Jahre altes orientalisches Märchen zurückgeht: Eine Kuh ernährt zwei Kinder, deren leibliche Mutter gestorben ist. Ihre Stiefmutter tötet das Tier, doch aus den vergrabenen Knochen wächst ein Baum, der sie fortan nährt. Aus diesem Märchen verschwand im Lauf der Zeit der Bruder, das Mädchen hütet die Kuh, während es am Spinnrad arbeitet. Nach dem Tod des Tiers sprießen Früchte aus seinem Kadaver, die jedoch nur jener Prinz ernten darf, der das Mädchen heiraten wird.

Vor etwa 2500 Jahren sei auf dem Balkan eine neue Version entstanden: Die nährende Rolle der Kuh und die Schlachtung bildeten noch immer den Kern des Geschehens, doch nun er-

Evolutiongeschichte der »Kosmischen Jagd«



scheinen prächtige Kleider dort, wo das Tier begraben wurde. Das ermöglicht der Heldin, eine Feier des Prinzen zu besuchen, wo sie ihren Pantoffel verliert. Der junge Mann sucht nach der Besitzerin, droht aber einer Betrügerin aufzusitzen. Doch ein Tier entlarvt diese, der Prinz heiratet die Richtige. Die Geschichte ist Rooth zufolge quer durch Osteuropa bis nach Skandinavien gewandert, wo sie um das Jahr 1000 als unser heutiges »Aschenputtel« auftauchte.

Die Anfänge statistischer Mythenforschung

Den Beziehungen unter den Angehörigen von Mythenfamilien gehen Forscher auf den Grund, indem sie strukturelle Elemente und Motive identifizieren und deren Modifikationen verfolgen. Ein Ziel solcher Forschung ist es, einen Stammbaum aufzustellen. Dieser mag Aufschlüsse über Migrationsbewegungen in der Vergangenheit geben oder helfen, die ursprüngliche Geschichte, sozusagen ihren Urahn, zu rekonstruieren. In den 1990er Jahren setzte Jun'ichi Oda von der Universität Tokio erstmals mathematische Verfahren ein, wie sie

in der Evolutionsbiologie zur Rekonstruktion der stammesgeschichtlichen Entwicklung (der »Phylogenese«) verwendet werden. Dieser damals noch grobe Ansatz wird seitdem von einigen Forschern – darunter unserem Team – verfolgt, da er nicht nur mächtige, sondern auch verlässliche Werkzeuge bereitstellt. Denn wie wir erstmals zeigen konnten, geben die eingesetzten statistischen Verfahren Sicherheiten, die ein rein qualitatives Vorgehen nicht bieten kann.

Beispielsweise werfen Kritiker der historisch-geografischen Theorie vor, ihre Kriterien der Familiengruppierung seien willkürlich – mitunter werden nur ein oder zwei Charakteristika zur Kategorisierung verwendet – und zudem seien sie ethnozentrisch – die meisten Mythenfamilien nehmen Bezug auf den westlichen Kulturkreis. Dazu käme eine Stichprobenverzerrung, weil europäische Volkstraditionen weit intensiver studiert wurden als außereuropäische, was jede Stammbaumrekonstruktion verfälsche. Durch die Anwendung phylogenetischer Algorithmen auf die verfügbaren Datensätze lässt sich die Stabilität einer solchen Berech-

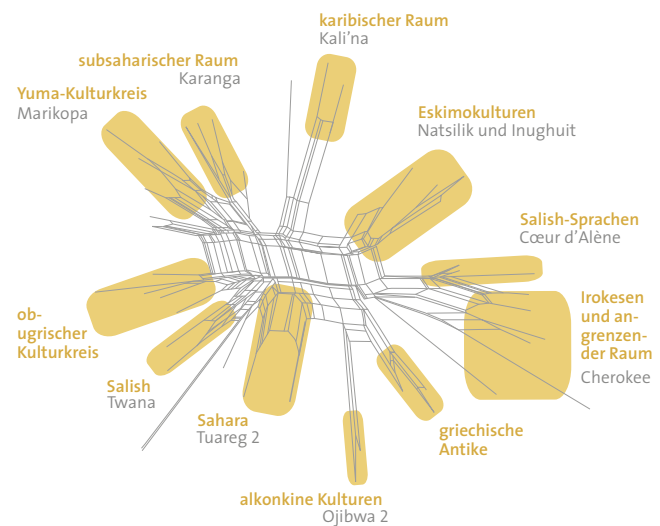
Computeralgorithmen ermittelten die wahrscheinlichsten Abstammungslinien der weltweit vorkommenden Versionen der »Kosmischen Jagd« (Abbildung links). Ein Kriterium war, dass die Verzweigungen in mindestens der Hälfte aller berechneten möglichen Bäume enthalten sind. Alle Varianten stammen von einer Version 0 aus paläolithischer Zeit ab, die wir wie folgt rekonstruierten: »Ein Mensch jagt ein großes, Gras fressendes Huftier mit Hörnern. Diese Jagd findet im Himmel statt, oder sie führt die Beteiligten dorthin. Das Tier überlebt und verwandelt sich in das Sternbild des Großen Bären.«

In einer ersten Verzweigung entspringen diesem Original neun Varianten in Eurasien. Während die meisten dort bleiben, gelangt eine nach Afrika, zwei kommen nach Amerika.

In der inzwischen verschwundenen Version 1 wird aus dem Tier das Sternbild Orion. Die nun folgende achtfache Verzweigung bringt insbesondere die deutlich veränderte Version 2 hervor: »Ein großes, Gras fressendes Huftier mit Hörnern wird bis in den Himmel verfolgt. Das Tier ist schon tot, als es unter die Sterne versetzt wird. Durch einen Fehltritt eines Familienmitglieds werden seine Jäger ebenfalls verwandelt, meist in die Plejaden, mitunter auch in den Orion.«

Während der Stamm der Chilcotin von British Columbia bei dieser Version stehen bleibt, erzählen die südamerikanischen Kali'na und Akawaio, das Tier sei ein Tapir gewesen und das betreffende Familienmitglied eine Frau, die ein Tabu brach. Die resultierende Version 3 erlangte damit einen größeren gesellschaftlichen Nutzen. Die Akawaio fügten einen Ehebruch und weitere Sternbilder hinzu, womit wir Version 4 erhalten: »Eine Frau nimmt sich einen Tapir zum Geliebten. Dieser verspricht, sie mit in den Osten zu nehmen, wo der Himmel auf die Erde trifft. Die Frau wartet auf eine Gelegenheit, als ihr Ehemann auf einen Baum steigt, um ihm die Beine abzuhacken. Jedoch wird der Bedauernswerte von sei-

ner Mutter geheilt. Mit Hilfe einer Krücke macht er sich daran, die Liebenden zu verfolgen, und holt sie ein. Er hackt dem Tapir den Kopf ab. Die Frau fliegt zusammen mit dem Geist des Tiers in den Himmel, verfolgt von ihrem Ehemann.« Letzterem entspricht das Sternbild Orion, die Plejaden stellen die Frau dar, und die Hyaden formen den Kopf des Tapirs.



Die obige Darstellung ordnet die verschiedenen Versionen der Kosmischen Jagd nach der Anzahl gemeinsamer Mytheme an. Der Abstand zum Protomythos ist dabei umso länger, je mehr Innovationen in eine Erzählung eingebaut wurden. Querverbindungen symbolisieren einen Austausch zwischen benachbarten Versionen. Insgesamt zeigt diese Darstellung des Stammbaums deutlich, dass die Mehrzahl der Mythen einer begrenzten Anzahl von Kulturräumen angehört.



Die berühmte Brunnszene in der Höhle von Lascaux (17000 bis 18000 Jahre vor heute) scheint eine Geschichte zu erzählen, vielleicht über die Konfrontation eines Jägers mit einem verletzten Bison. Doch es könnte sich ebenso um eine mythologische Szene handeln. Dafür spricht der Vogelkopf des Menschen, der dem abgebildeten Vogel auf dem Pfahl ähnelt. Möglicherweise steht der Mensch auch aufrecht; die Perspektive ist unklar. In dem Fall fährt das Bison in den Himmel auf, was gemeinsam mit weiteren Details an die »Kosmische Jagd« erinnert.

nung aber testen und eine einseitige Gewichtung von Stichproben korrigieren.

Diese Techniken haben wir nicht nur auf die »Kosmische Jagd«, sondern auch auf die Mythenfamilien »Polyphem« und »Pygmalion« angewendet. Versionen des Letzteren kennt man in Europa und in Afrika. Diese Sage kreist um einen Menschen, der sich in ein von ihm geschaffenes Kunstwerk verliebt. In der griechischen Überlieferung nach Ovid ist es eine weibliche Marmorskulptur. Der von realen Frauen enttäuschte Künstler kleidet sie, redet mit ihr, liebkost sie. Gerührt haucht Venus dem Stein Leben ein. Beim Volk der Venda im südlichen Afrika schnitzt ein Mann die Frauenskulptur aus einem Holzblock, die mal durch einen Priester, mal durch einen Gott lebendig wird. Als der Häuptling sie begehrt, wirft der Künstler die Frau zu Boden, wo sie wieder zu Holz wird.

In den Mythen vom Polyphemtypus wagt sich ein Held in die Höhle eines Monsters und entkommt in einer Tierherde verborgen. In Europa retten ihn meist Schafe. Die hier zu Lande bekannteste und namengebende Fassung stammt wieder aus dem griechischen Sagenkreis: Der Held Odysseus dringt mit seinen Gefährten auf der Suche nach Nahrung in eine Höhle ein, nicht ahnend, dass sie dem Zyklopen Polyphem als Schafstall dient. Der nimmt die Männer gefangen, um sie zu fressen. Zwar gelingt es den Griechen, Polyphem mit einer glühenden Pfahlspitze zu blenden, doch der Riese bewacht weiterhin den Ausgang. Im Bauchfell der Schafe versteckt, gelingt dann endlich die Flucht.

Ähnliche Erzählungen findet man auch in Nordamerika, so beispielsweise bei den Schwarzfußindianern, einem Volk des algonkinen Sprach- und Kulturkreises. Sie erzählen von einem Raben, der Bisons in eine Höhle einsperrt. Ihrer wichtigsten Nahrungsquelle beraubt und vom Hungertod be-

droht, nehmen die Indianer den Vogel gefangen und halten ihn über einen qualmenden Schacht, was das schwarze Gefieder erklärt, zudem an die Rolle des Feuers in der griechischen Sage erinnert. Der Rabe verspricht, die Tiere freizulassen, hält sich jedoch nicht daran (in gewisser Weise hatte auch der Zyklop ein Versprechen gebrochen: das den Griechen heilige Gebot der Gastfreundschaft, an das Odysseus appellierte). Nun verwandelt sich ein Indianer in einen Stab und ein zweiter in einen Welpen. Die Tochter des Raben empfängt sie und führt sie in die Höhle. Dort verwandeln sich die beiden abermals, der eine in einen großen Hund und der andere in einen Menschen. Sie führen die Bisons ins Freie, doch um dem scharfen Blick des am Eingang wachenden Raben zu entgehen, verstecken sich beide im Fell eines Bisons.

»Es gibt einen Helden«

Die phylogenetischen Algorithmen verarbeiten diskrete Informationen, zum Beispiel die Abfolge der vier verschiedenen Nukleotide in der menschlichen DNA. Um die raumzeitlichen Verwandtschaftsverhältnisse der Sagen nachzuvollziehen, haben wir daher jede Erzählung jeder Familie in Abfolgen der kürzest möglichen Sätze zerlegt, die wir als Mytheme bezeichnen. Vorsicht: Dies entspricht nicht der gängigen Definition, in der Mytheme bereits Kernelemente von Mythen darstellen! Für unsere Zwecke ist es ausreichend, Sätze wie »Es gibt einen Helden« oder »Der Held ist ein Jäger« zu verwenden. In der Zusammenschau der Mytheme kristallisieren sich dann die definierenden Merkmale der großen Mythenfamilien heraus. Manche kommen in nur einer oder zwei Fassungen der Geschichte vor, andere dagegen sind allen Versionen gemeinsam. Jedes Mitglied lässt sich anhand einer Merkmalsliste beschreiben. Indem wir Anwesen-

heit oder Abwesenheit eines bestimmten Mythems mit 1 beziehungsweise 0 kodieren, können wir sie mit den statistischen Methoden der Phylogenetik vergleichen, von anderen Familien abgrenzen und Stammbäume erstellen.

Die von uns verwendeten Algorithmen belegen, dass Ähnlichkeiten in den Merkmalslisten verschiedener Versionen eher auf verwandtschaftlichen Verbindungen beruhen als auf Neudichtungen, die zufällig einander entsprechen. Wie in der Evolution von Lebewesen gibt es aber Mutationen, in diesem Kontext als Innovationen bezeichnet: Mytheme verblasen, andere werden aus anderen Geschichten entlehnt. An die Stelle eines einäugigen Riesen tritt dann vielleicht ein Rabe, der Bisons statt Schafe einsperrt. Zum Glück gibt es statistische Methoden zur Einschätzung solcher Effekte. So ermöglicht der Retentionsindex, den Anteil solcher Merkmale an der Gesamtliste zu ermitteln, die zwei oder mehr Geschichten gemeinsam sind, obwohl diese nicht von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen.

Indem die Algorithmen nach Verzweigungspunkten suchen, an denen möglichst wenige Innovationen auftreten, ermitteln sie direkte Abstammungslinien, mithin Mythenstammbäume. Dabei offenbart sich eine zeitliche Dimension: Verzweigungen einander ähnlicher Versionen können nicht weit auseinanderliegen.

Übernimmt ein Volk eine Erzählung seiner Nachbarn, besteht eine Tendenz zur Verdrehung von Koordinaten. So werden beispielsweise mitunter Frauen in Männer verwandelt, oben und unten, Rohes und Gekochtes vertauscht. Im Extremfall lässt sich die Verwandtschaft nicht einmal mehr erkennen – weshalb derart starke Transformationen in unserer Studie keinen Eingang finden.

Die Eroberung der Welt durch den *Homo sapiens* begann vor ungefähr 100 000 Jahren, als die ersten Gruppen des anatomisch modernen Menschen Afrika verließen. Vor etwa 60 000 Jahren drang er in mehreren Wanderungswellen nach Europa, Zentralasien und bis nach Australien vor. Erst als die Beringstraße vor

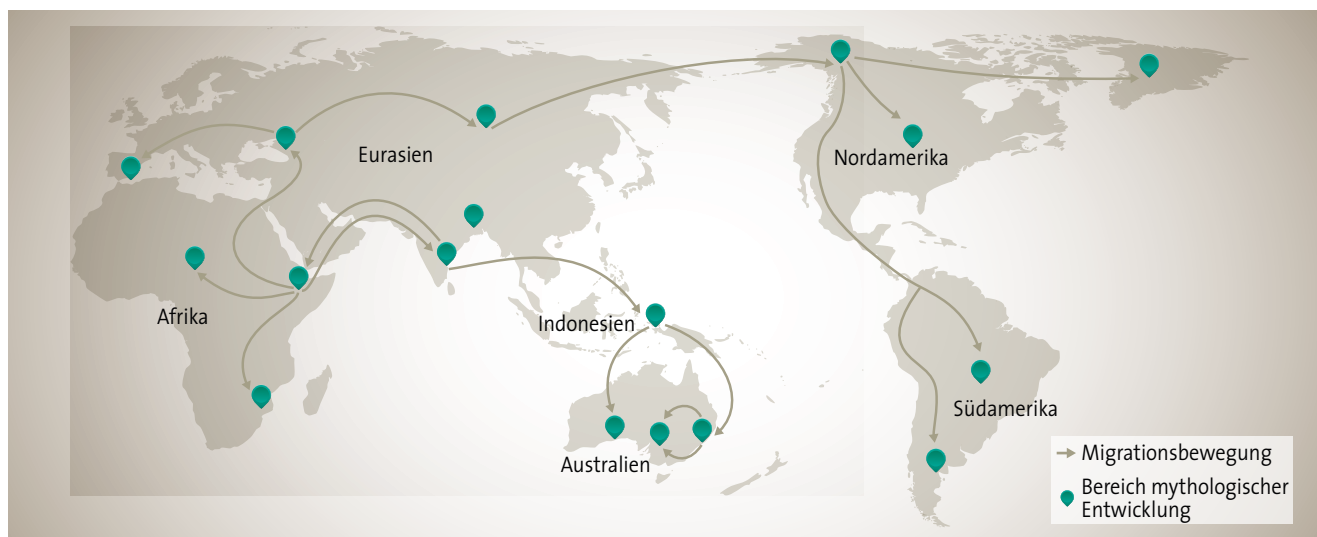
Solange man sich an eine eindeutig identifizierte Mythenfamilie hält, kann man davon ausgehen, dass Innovationen in der Merkmalsliste nur punktuell auftreten, so dass sie die genealogische Aussage nicht verschleiern. Daher beobachtet man trotz aller Varianten, dass sich die Versionen einer Mythenfamilie meist in einer schlüssigen Anordnung gruppieren lassen, nämlich nach Kontinenten, geografischen Zonen und Sprachgemeinschaften (Kasten S. 69). Dies zeugt von einer großen Beständigkeit der Erzählungen im Verlauf der Zeit.

Kulturtransfer durch Migration

An der sukzessiven Veränderung einer solchen von einer Generation zur nächsten vererbten Geschichte kann man Wanderungsbewegungen ablesen. Beispielsweise lassen sich Parallelen zwischen der Ausbreitung des Pygmalionmythos und einer Migration von Bevölkerungsgruppen aus dem Nordosten Afrikas ins südliche Afrika ziehen, die vor etwa 2000 Jahren stattgefunden hat. Die Polyphemerzählungen gelangten in einer ersten Expansionswelle noch in der Altsteinzeit weit über Europa hinaus bis nach Nordamerika; eine zweite Welle erfolgte in der Jungsteinzeit im Gefolge der Landwirtschaft.

Es genügt nämlich nicht, dass beispielsweise ein Volk mit einem entfernt lebenden im Warenaustausch stand, um neue Elemente in einen letztlich identitätsstiftenden Mythos zu importieren. Gemeinsam mit Kollegen konnte Quentin Atkinson von der University of Auckland bestätigen, dass ethnische und sprachliche Barrieren die Verbreitung von Folklorelementen sogar stärker aufhalten als die von Genen. Die Verbreitung einer solchen Überlieferung erforderte also eine Migration ihrer Überlieferer.

etwa 20 000 Jahren während der letzten Eiszeit trockenfiel, erreichte der Mensch den amerikanischen Doppelkontinent. Diese großen Wanderungsphasen lassen sich heute durch genetische Analysen, aber auch anhand der Stammbäume großer Mythenfamilien nachverfolgen.



Auch der Stammbaum der »Kosmischen Jagd« lässt darauf schließen, dass dieser Mythos Amerika in mehreren Schüben erreicht hat. Überraschenderweise vereint ein Ast die griechischen Versionen mit denen der algonkinen Sprachen und Kulturen. Das stimmt mit einigen Resultaten der Genetiker überein, die anhand von DNA-Vergleichen die Besiedlung Amerikas rekonstruieren wollen: Beiden Volksgruppen ist die so genannte Haplogruppe X2 gemeinsam, ein Genkonglomerat, das immer komplett vererbt wird und von eurasischen Vorfahren stammt, die vor etwa 30000 Jahren lebten.

Ein zweiter Ast des Stammbaums der »Kosmischen Jagd« weist auf die Überquerung der Beringstraße hin und setzt sich über die Inuitkulturen bis weit in den Nordosten Amerikas fort. Schließlich gibt es einen dritten Zweig, der vermuten lässt, dass Teile des Mythos von Asien ausgehend sowohl in Richtung Afrika als auch nach Amerika diffundierten.

Mit jeder Differenzierung wuchs ein Ast des Stammbaums, und je länger er wurde, desto weniger hatten die Versionen am äußeren Ende mit ihrem Ursprung gemein. Eine solche Beziehung beschreibt, was man in der Biologie als punktuell Gleichgewicht bezeichnet. Hiervon spricht man, wenn Arten während langer Zeiträume stabil bleiben, jedoch nach Eintreten eines erbgutverändernden Ereignisses (einer so genannten Punctuation) relativ schnell mutieren. Genau so verhielt es sich den berechneten Stammbäumen nach auch bei den Mythen, bei denen sich Phasen hoher Evolutionsgeschwindigkeit durch verschiedene Faktoren erklären lassen. Insbesondere migriert immer nur eine begrenzte Zahl von Menschen, was die Stabilität ihres kulturellen Gedächtnisses mindert. In einem Umfeld von um Ressourcen

konkurrierenden Gruppen kann die Modifikation der Mythologie dazu beitragen, sich von den jeweils anderen zu unterscheiden – ein gut dokumentiertes Phänomen in der Ethnologie. Ohnehin ist es sehr menschlich, Glaubensinhalte im Spiegel neuer Umwelt- und Kultureinflüsse zu revidieren.

Suche nach der Urform

Phylogenetische Algorithmen helfen nicht nur, solche Prozesse nachzuvollziehen. Ihre besondere Bedeutung in der vergleichenden Mythologie besteht darin, die jeweilige Urform zu rekonstruieren. Denn sie ermitteln die Wahrscheinlichkeit, ob ein bestimmtes Mythem bereits im Prototyp des Originals enthalten war oder nicht. Damit bestätigen sie die Annahme der historisch-geografischen Theorie, jeder großen, weit verzweigten Mythenfamilie müsse eine Urform zu Grunde liegen, und machen obendrein verloren gegangene beziehungsweise entlehnte Mytheme sichtbar. Die Berechnungen lassen sich immer wieder aktualisieren, sobald weitere Versionen in sie aufgenommen werden.

Eine der ersten Pygmalionversionen lautete demnach etwa wie folgt: »Ein Mann schnitzt aus einem Baumstumpf eine Frauengestalt, um seine Einsamkeit zu durchbrechen. Ein Gott haucht der Skulptur Leben ein, und sie verwandelt sich in eine schöne junge Frau. Sie wird zur Gattin ihres Schöpfers, jedoch gibt es daneben einen zweiten Mann, der sie gerne zur Gefährtin hätte.« Auf die Polyphemfamilie angewandt berechneten die phylogenetischen Verfahren folgende Geschichte: »Ein Jäger dringt in eine Höhle ein, in der eine Tierherde eingesperrt ist. Doch der Ausgang wird mit einem schweren Stein verschlossen, und ein Monster setzt alles

Von der Schlange zum Drachen

Der Auftritt des Drachen Smaug gehört sicher zu den packendsten Szenen in der dreiteiligen Verfilmung des »Hobbit«. Als böse, geflügelte Feuerspucker kennen viele Märchen und Sagen des Abendlands die Drachen. In Ostasien ist ihre Bedeutung eher die von Gottheiten denn von Dämonen. Der Kaiserthron Chinas galt als Drachenthron. Trotz der Bedeutungsunterschiede wie auch vieler Verschiedenheiten in ihrer Gestalt stellten sich die Menschen weltweit Drachen als Wesen vor, deren Körper der einer riesigen Schlange sei, welche aber Beine hat und einen Kopf, der dem anderer Tiere gleicht.

»Spektrum«-Autor Julien d’Huy hat die phylogenetische Analyse auch auf diese mythologische Figur angewandt. So finden sich Darstellungen gehörnter Schlangen auf vielen prähistorischen Felszeichnungen Afrikas und Nordamerikas (siehe Bild, San Rafael Swell, Utah). Der Forscher ermittelte grundlegende Variablen (Mytheme) wie »keine Füße / zwei Füße / vier Füße« oder »ein Kopf / viele Köpfe«, »kann fliegen«, »ist mit Sturm verbunden«, »lebt in einer Höhle«. Insgesamt definierte er Abbildungen und Erzählungen mittels 69 Variablen.



BRANCIU (MARRAMETI) / CC-BY-SA 3.0 (KREATIVECOMMONS.ORG) LICENSES/BY-SA 3.0/IEGALCODE

Als Urform aller Drachen rekonstruierte er eine Gestalt mit dem Leib einer riesigen geschuppten Schlange, aber mit Hörnern und Haaren, die ein Gewässer bewacht und fliegen, Stürme und Fluten auslösen kann. Diese Form reicht verschiedenen Felsmalereien nach bis in die Altsteinzeit zurück.

Eine zweite Analyse befasste sich mit dem Kampf des griechischen Gottes Apollon gegen den Drachen Python um das Heiligtum Delphi. Das Motiv eines solchen Duells konnte d’Huy bis nach Asien zurückverfolgen. Die positive Sichtweise auf Drachen entstand demnach erst im Lauf der Zeit. (K.-D.L.)



daran, ihn zu töten. Als es die Tiere nach draußen lässt, tastet es sie einzeln ab. Doch dem Helden gelingt die Flucht, indem er sich am Bauch eines Tiers festklammert.« Und die Urform der »Kosmischen Jagd« lautete mit hoher Wahrscheinlichkeit: »Ein Huftier wird von einem Jäger verfolgt, wobei sich dies am Himmel abspielt oder dorthin versetzt wird; das Tier lebt noch, als es unter die Sterne versetzt wird, und dieses Sternbild wird Großer Bär genannt.«

Bemerkenswert ist, dass die rekonstruierten Ursprünge der letzten bis in die Jüngere Altsteinzeit (Jungpaläolithikum) zurückreichen, also weit vor dem von der heutigen vergleichenden Sprachwissenschaft erfassten Zeitraum liegen. Aus diesem Abschnitt der Menschheitsgeschichte stammt eine Höhlenmalerei in der Drei-Brüder-Höhle (Grotte des Trois-Frères) in den französischen Pyrenäen (siehe Bild S. 70). Sie zeigt ein Wesen mit dem Körper eines Menschen, aber dem Kopf eines Bisons; es hält einen Stab oder kurzen Bogen in den Händen. Ein Bison in einer Herde wendet sich ihm zu, und die beiden Gestalten scheinen einen Blick auszutauschen. Betrachtet man das Hinterteil und insbesondere die Beine des Tiers genauer, erweisen sie sich aber ebenfalls als menschlich. Der Prähistoriker André Leroi-Gourhan (1911–1986) deutet sogar die Umrisse des scheinbaren Tiers als die eines Menschen. Bemerkenswert ist außerdem die detaillierte Darstellung des Afters. Tatsächlich erzählen manche nordamerikanischen Polyphemmythen, Helden hätten sich im Inneren eines Tiers versteckt, indem sie durch dessen Anus schlüpfen. Zudem erinnern weitere Aspekte der Höhlenmalerei an den rekonstruierten Protomythos: Es gibt eine Höhle und eine Herde, das Mischwesen hält einen Stab, und es unterzieht sein Gegenüber einem prüfenden Blick.

Auch für die »Kosmische Jagd« könnte es eine bildliche Darstellung geben, eine Jagdszene aus der Höhle von Lascaux (siehe Bild links). Allerdings gingen hier die Spekulationen noch weiter: Ein dunkler Fleck am Übergang vom Hals

des Bisons zum Rücken wäre dann ein Stern, die Haltung des Tiers würde den Aufstieg zum Himmel andeuten. Weitere Flecken am Boden wären sein Blut, das in manchen Versionen des Mythos die Herbstblätter färbt. Diese Beispiele sollen vor allem das Potenzial der Methode aufzeigen, längst vergangene Mythen zu neuem Leben zu erwecken.

Bleibt die Frage: Warum haben solche Erzählungen überhaupt eine derart lange Tradition? Den griechischen Erzählern der drei Sagen war sicher nicht bewusst, dass sie eine jahrtausendealte Überlieferung fortsetzten. Vermutlich brachten Mythen einer Gesellschaft Vorteile, beispielsweise indem sie Lebenserfahrungen weitergaben. Sicher halfen sie, der Welt eine Ordnung zu geben und so existentielle Ängste zu lindern. Vielleicht dienten sie auch einem viel einfacheren Drang des Menschen: die Welt zu verstehen. ~

DER AUTOR



Julien d'Huy ist Anthropologe am Centre d'études des mondes africains (UMR 8171) in Paris.

QUELLEN

- D'Huy, J.:** Polyphemus (Aa. Th. 1137). A Phylogenetic Reconstruction of a Prehistoric Tale. In: *Nouvelle Mythologie Comparée* 1, 2013. Im Internet unter: <http://nouvellemythologiecomparee.hautetfort.com/numero-1-no-1-2013/>
- D'Huy, J.:** A Cosmic Hunt in the Berber Sky: A Phylogenetic Reconstruction of a Palaeolithic Mythology. In: *Les Cahiers de l'AARS* 16, S. 93–106, 2013
- Tehrani, J.J.:** The Phylogeny of Little Red Riding Hood. In: *PLoS ONE* 8: e78871. 10.1371/journal.pone.0078871, 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1356012



Die Sitka-Fichten in der kanadischen Provinz British Columbia müssen vermutlich Gene von Bäumen aus wärmeren Regionen übernehmen, um sich in Zeiten des Klimawandels zu behaupten.

FORSTWIRTSCHAFT

Dem Wandel gewachsen

Die Klimaerwärmung bedroht Kanadas Wälder. Um sie fit zu machen für höhere Temperaturen, wollen Forscher Bäume aus südlicheren Gefilden einführen, die den heimischen Beständen ihre Gene für Hitzetoleranz vererben.

Von Hillary Rosner

Auf einem Feld in Vancouver, am Straßenrand direkt gegenüber einer Häuserreihe, stehen ungefähr 500 Sitka-Fichten dicht an dicht und recken ihr dunkelgrünes Nadelkleid der Sonne entgegen. Obwohl alle vor sieben Jahren gleichzeitig gepflanzt wurden, variiert ihre Größe dramatisch. Die kleinsten sind nur ungefähr 60 Zentimeter hoch und stammen von der Kodiak-Insel in Alaska; die größten dagegen bringen es auf rund zwei Meter und kommen aus Oregon. Doch die Größe ist nicht der einzige augenfällige Unterschied. Obwohl die Fichten aus Alaska zur selben Art gehören wie diejenigen aus Oregon, knospen sie volle drei Monate früher. Zudem bleiben sie üppig grün, egal wie tief die Temperaturen fallen.

Die Pflanzung am Rand des weitläufigen Campus der University of British Columbia ist Teil eines Experiments mit dem Ziel, die kanadischen Wälder vor den Folgen des drohenden Klimawandels zu schützen. Bäume sind an ihren Lebensraum angepasst. Doch der verändert sich in dem Maße, wie die Erde sich erwärmt. Nun können Bäume nicht einfach losmarschieren und sich ein neues Habitat suchen. Wenn sie es nicht schaffen, mit dem Klimawandel Schritt zu halten, sind sie dem Untergang geweiht.

Da die Bäume selbst ortsgebunden sind, erproben Wissenschaftler eine neue Lösung: Sie wollen den Genen die Chance geben, zu wandern – und den Pflanzen so dazu verhelfen, sich genetisch den veränderten Umweltbedingungen anzupassen. Für dieses Experiment hat Sally N. Aitken die Fichtenschonung in Vancouver gepflanzt. Sie ist Direktorin des Centre for Forest Conservation Genetics an der örtlichen Universität. Ihrer Ansicht nach könnte die Rettung der Wälder in British

Columbia – und andernorts – von einem Verfahren abhängen, das »assisted gene flow« heißt. Wissenschaftler verpflanzen dabei Organismen mit vorteilhaften Eigenschaften von einer Stelle ihres Verbreitungsgebiets an eine andere, wo sie ihre besonderen Erbanlagen an die angestammte Flora weitergeben können. So besitzen die Bäume aus Oregon und die aus Alaska vielleicht wechselseitig nützliche Gene. Doch ohne menschliches Zutun kommen beide niemals zusammen.

Förster können hier nachhelfen, indem sie beispielsweise Setzlinge von Fichten oder Küstenkiefern aus niedrigen Breitengraden nehmen und sie bei etwas höheren einpflanzen. Wenn dort dann im Zuge der globalen Erwärmung die Durchschnittstemperatur steigt, sollten die Bäume am neuen Standort problemlos gedeihen, sich mit verwandten Arten vor Ort kreuzen und so ihre auf die Wärme zugeschnittenen Gene verbreiten. Der Wald insgesamt würde sich dadurch anpassen. Insofern bildet der »assisted gene flow« ein Mittel, der Evolution behutsam auf die Sprünge zu helfen.

Doch ganz so simpel ist die Sache nicht. Man kann nicht einfach einen Baum aus Oregon 1000 Meilen weiter nördlich in British Columbia einpflanzen und darauf warten, dass es dort wärmer wird. Der Grund sind genau jene lokalen Anpassungen, die den »assisted gene flow« attraktiv erscheinen lassen. Küstenkiefern zum Beispiel wachsen in sehr verschiedenen Regionen Kanadas und haben je nach ihrem Standort besondere Gene, die ihnen helfen, Hitze, Kälte oder Trockenheit zu ertragen oder lokal vorkommende Krankheiten oder Schädlinge abzuwehren. Wenn dann eine arktische Kaltfront durch Vancouver zieht und auf Setzlinge aus wärmeren Regionen trifft, bekommt das denen nicht gut. Denn ihnen fehlen die speziellen genetischen Anpassungen für das Gedeihen in ihrem neuen Lebensraum. »Wir müssen die Sache in ganz kleinen Schritten angehen«, sagt Aitken. »Obwohl die in einigen Jahrzehnten zu erwartenden Veränderungen erheblich sind, ist bis dahin noch mit wochen-, monate- oder jahrelangen Unterbrechungen des allgemeinen Erwärmungstrends zu rechnen, die diese Bäume überleben müssen.«

250 Millionen Setzlinge jährlich

Herauszufinden, wie man die heutigen Wälder am besten für das Klima von morgen rüsten kann, ist keine leichte Aufgabe. Doch in British Columbia, wo die Forstwirtschaft für ein Drittel aller Exporte aufkommt und die Hälfte des Baumbestands kommerziell verwertet wird, kommt ihr große Bedeutung zu. Gesetze schreiben eine Wiederaufforstung nach dem Fällen vor, um den Holznachschub und gesunde Ökosysteme zu gewährleisten. Ungefähr 250 Millionen Setzlinge werden jährlich gepflanzt. Woher sollten sie kommen, und wie weit entfernt von ihrem Ursprungsort kann man sie einpflanzen? Das sind ebenso knifflige wie drängende Fragen. Eine falsche Entscheidung könnte die Wälder für Jahrzehnte ruinieren.

In dem kleinen Experiment mit den Sitka-Fichten untersucht Aitken Bäume von 14 unterschiedlichen Standorten zwischen Kalifornien und Alaska. So will sie Erfahrungen sammeln, um massive Fehler bei Projekten größeren Ausma-

AUF EINEN BLICK

BÄUME FÜR DEN KLIMASCHOCK RÜSTEN

1 Wälder passen sich genetisch an die lokalen Umweltbedingungen an; der heutige **Klimawandel** vollzieht sich jedoch so schnell, dass sie nicht mithalten können.

2 Deshalb versuchen Wissenschaftler die Evolution zu beschleunigen, indem sie **Bäume mit Genen für Hitzetoleranz und geringen Wasserbedarf** neben solche setzen, die diese Gene beziehungsweise Eigenschaften künftig benötigen; dann können sich beide miteinander kreuzen.

3 Diese neue Strategie – »**assisted gene flow**« (AGF) – wird derzeit in verschiedenen Klimazonen in British Columbia getestet.

ßes zu vermeiden. Ihr Team konnte bereits 35 DNA-Segmente identifizieren, die einen Einfluss darauf haben, wie kälteempfindlich die Fichten sind und wann sie austreiben. Mittlerweile durchmustern die Forscher das Erbgut der Bäume auch nach Genen, die mit der Beständigkeit gegen andere Umwelteinflüsse zusammenhängen. Solche günstigen Versionen sollen sich dann in Populationen verbreiten, die genau diese Eigenschaften benötigen – und zwar so schnell, dass die Veränderungen mit dem Klimawandel Schritt halten.

Dieses größere Projekt namens AdapTree könnte wegweisend sein für ähnliche Vorhaben auf der ganzen Welt. Langfristig profitieren vielleicht sogar andere Biotope davon – zum Beispiel Korallenriffe, die ebenfalls durch den Klimawandel bedroht sind. Forscher in den Vereinigten Staaten, Abu Dhabi, Katar und Australien haben vorgeschlagen, Korallen aus dem Persischen Golf in den Indopazifik zu verpflanzen, wo sie ihre Gene für Hitzetoleranz weitergeben könnten. Ebenso gibt es Versuche, mit Samen aus vielerlei Lebensräumen das Grasland im Mittleren Westen der USA wiederherzustellen.

Aitken und Michael C. Whitlock, Populationsgenetiker am zoologischen Institut der University of British Columbia, haben den Begriff »assisted gene flow« in einer Publikation aus dem Jahr 2013 geprägt. Schon länger verfolgen Wissenschaftler und Umweltschützer eine noch kühnere Idee, nämlich die assistierte Migration. Hierbei werden Arten weit entfernt von ihrem Herkunftsort und außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets angesiedelt. »Assisted gene flow« ist ein gemäßigerer Ansatz, der vor allem auf die Übertragung der Gene zielt. Nach dem erfolgreichen Abschluss von AdapTree in ein paar Jahren werden DNA-Sequenz-Daten für 12000 Kiefern und Fichten vorliegen, die von mehr als 250 Populationen aus British Columbia und Alberta stammen.

Diese Bäume spüren die Folgen des Klimawandels bereits. In den 1970er Jahren ließ die Regierung von British Columbia eine Karte mit den verschiedenen biogeoklimatischen Zonen in der Provinz erstellen. 40 Jahre lang bildete diese Karte die Grundlage für die waldbaulichen Planungen im westlichen Kanada und gab Auskunft darüber, welche Setzlinge wo zu pflanzen sind. Inzwischen ist sie aber durch den Klimawandel zu großen Teilen überholt. Einige Zonen haben sich ver-

schofen, andere sind dramatisch geschrumpft. Manche Lebensräume in höheren Regionen und auf einigen Hochebenen sind schon zur Hälfte verloren gegangen und dürften bis 2100 zu 80 Prozent verschwunden sein. Setzlinge von Bäumen, die einst in einer bestimmten Region gediehen, gehen dort heute ein. Die Lebensräume verwandeln sich und bringen Ökosysteme hervor, die sich von den früheren völlig unterscheiden – wobei freilich umstritten ist, ab wann ein Ökosystem als »völlig verändert« gelten kann.

Logenplatz im Drama der globalen Erwärmung

Die Anpassungsfähigkeit einer bestimmten Population hängt entscheidend davon ab, wie schnell sich die Individuen fortpflanzen. In jeder Generation können neue nützliche Eigenschaften aufkommen. Ein Käfer, der sich rasch vermehrt, hat wesentlich bessere Aussichten, sich anzupassen, als ein Baum, der sehr lange lebt und sich nur langsam fortpflanzt. In seiner kurzen Lebensspanne spürt das einzelne Insekt keine nennenswerte Veränderung. Ein Baum dagegen sitzt im Drama der globalen Erwärmung gleichsam auf einem Logenplatz.

Frisch gepflanzte Bäume sind vor allem in den ersten 20 Jahren gefährdet, dann werden sie widerstandsfähiger und »können ungünstige Umstände eine Weile verkraften«, wie Brad St. Claire, Genetiker am U.S. Forest Service in Corvallis in Oregon, es ausdrückt. Doch in Zeiten der globalen Erwärmung steht zu befürchten, dass sich die lokalen Bedingungen bereits in den kritischen ersten Dekaden beträchtlich verändern.

»Wenn man Pflanzen in höhere Breiten bringt, damit sie an das künftige Klima angepasst sind, dann müssen sie mit der jetzt noch herrschenden Kälte dort zurechtkommen«, sagt St. Clair. »Wir haben ein bewegliches Ziel«, räumt auch

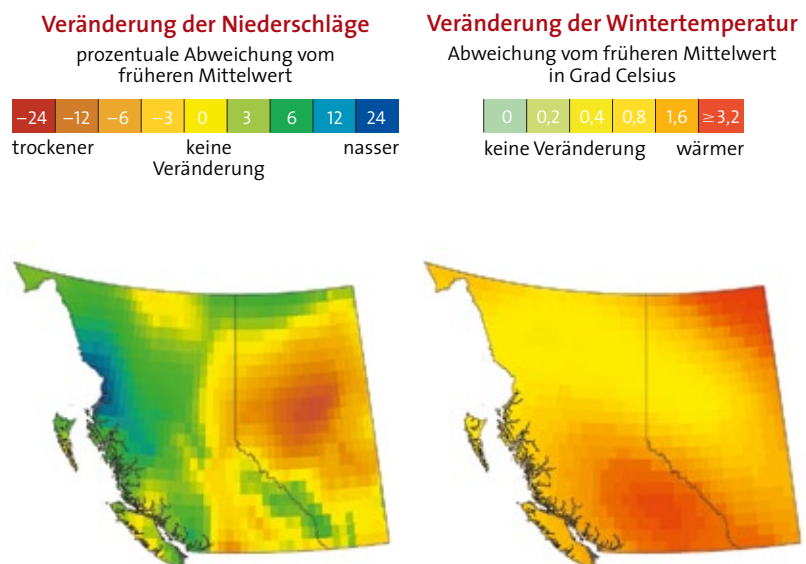
Aitken ein. »In welchem Entwicklungsstadium sollen die Bäume optimal an das Klima angepasst sein? Schon als Setzlinge, im Alter von zehn oder gar erst von 30 Jahren?« Eine naheliegende Möglichkeit, das Risiko zu minimieren, besteht darin, die Biodiversität zu erhöhen, indem man lokale Varietäten zusammen mit fremden anpflanzt. »Dabei wollen wir nicht auf jedem Hektar das Gleiche machen; denn man sollte nicht nur für ein einziges Klimawandelszenario planen«, so Aitken.

»Assisted gene flow« erscheint jedenfalls als probates Mittel, für mehr genetische Vielfalt zu sorgen. Das Ziel muss dabei sein, den Genpool der Wälder mit Elementen anzureichern, die ihre Widerstandskraft stärken. Während sich die Umwelt verändert, leiden einige Bäume vielleicht zunächst, andere aber verfügen über Erbmaterial, das ihnen durch raue Zeiten hilft. »Da sich bevorzugt diejenigen Bäume fortpflanzen, die robuster sind«, sagt Aitken, »erwarten wir Populationen, die zunehmend besser mit den herrschenden Bedingungen fertigwerden.« Am wichtigsten sei es, in der Anpassungsphase genug gesunde Bäume zu erhalten, die überleben und sich vermehren.

Aitken ist sehr heimat- und naturverbunden: Sie geht oft wandern und unternimmt gerne Schitouren; außerdem besitzt sie eine kleine Blockhütte in den Wäldern von British Columbia. Allein aus diesem Grund hofft sie, dass ihre Arbeit zu einer neuen, klügeren Strategie in der Forstwirtschaft beiträgt. Ohne »assisted gene flow« käme es, so fürchtet sie, zu einem allmählichen Niedergang der Bäume an den Rändern ihres jeweiligen Verbreitungsgebiets. »Bäume können zwar auch unter widrigen Umständen lange überleben, aber sie verlieren die Fähigkeit, sich fortzupflanzen«, sagt Aitken. »Das wäre für die Wälder langfristig das Todesurteil. Sie beständen dann gewissermaßen nur noch aus lebenden Lei-

Wettertrends für Bäume

Wie stark sich das Klima im Westen Kanadas bereits gewandelt hat, zeigt der Vergleich der gemittelten Wetterdaten in den Zeitspannen von 1961 bis 1990 und 1997 bis 2006. Im Durchschnitt haben die Niederschläge entlang der Pazifikküste stark zugenommen, wodurch es inzwischen immer öfter zur früher seltenen Kieferschütte durch Pilzbefall der Nadeln kommt. Weiter im Landesinneren ist das Klima dagegen trockener geworden, was erklären könnte, warum dort vermehrt Fichten und Espen eingehen. Dass es im Winter heute überall wärmer ist, begünstigt zudem die Ausbreitung des schädlichen Bergkieferkäfers. (Die Methoden für diese Analysen wurden 2009 in der Fachzeitschrift »Agricultural and Forest Meteorology« publiziert.)



KARTEN: ANDREAS HAWANN



1



2

Im Rahmen des AdapTree-Experiments nehmen Wissenschaftler Piniensamen aus unterschiedlichen Lebensräumen (1) und lassen sie im Ge-

hen.« Und zu allem Übel würden die Baum-Zombies Raum und Sonnenlicht beanspruchen – Ressourcen, welche die Keimlinge dringend benötigen.

Zur Mitte eines Ausbreitungsgebiets hin wäre die Situation nicht ganz so dramatisch. Doch auch dort würden die Bäume wohl langsamer wachsen und sich nur mit Mühe behaupten. Heißt das, dass sie letztlich ebenfalls zu Grunde gingen? »Wahrscheinlich nicht«, meint Aitken. »Innerhalb einer Population gibt es viel Variation. Deshalb werden die Arten wohl nicht aussterben, aber unsere Wälder dürften auf Dauer sehr ungesund aussehen.« Das zöge andere Pflanzen und Tiere in Mitleidenschaft, weil sich ganze Ökosysteme um Bäume ranken – bieten diese doch vielen anderen Organismen Nahrung und Schutz, regulieren den Wasserhaushalt und verhindern die Bodenerosion.

Mit ihrem Ansatz stößt Aiken in eine Lücke: Bisher ist das Versetzen einzelner Bäume innerhalb ihres normalen Verbreitungsgebiets wenig untersucht worden. Dabei sind die ökologischen Risiken geringer als beim Anpflanzen völlig fremder Arten, weil diese nicht Teil des angestammten Ökosystems sind – auch wenn sie einige erwünschte Eigenschaften mitbringen.

Der »assisted gene flow« birgt allerdings gleichfalls Risiken. Im schlimmsten Fall könnten etwa zusammen mit den nützlichen Genvarianten auch solche eingeführt werden, welche die Überlebenschance einer größeren Population verschlechtern. »Das Problem sollte sich jedoch von selbst lösen«, meint Andrew Weeks, Genetiker an der University of Melbourne. »Die natürliche Selektion würde die nachteiligen Varianten mit der Zeit ausmerzen. Indem man den

Genpool erweitert, eröffnet man der Population zweifellos die besten Zukunftschancen.«

Die Wälder British Columbias erwirtschaften jährlich zehn Milliarden Dollar und sind auch sonst von vielerlei Nutzen, indem sie beispielsweise Überflutungen und die Bodenerosion verhindern. Sie angesichts des Klimawandels einfach ihrem Schicksal zu überlassen, wäre fahrlässig, zumal sich die Auswirkungen der globalen Erwärmung bereits zu zeigen beginnen. Seit Mitte der 1990er Jahre haben Invasionen von Schädlingen und Waldbrände – die beide mit den erhöhten Temperaturen zusammenhängen – Millionen von Hektar Wald vernichtet und viele Häuser zerstört. »Die Natur hat schon mehrere Warnschüsse in Sachen Erderwärmung abgegeben«, sagt Greg O’Neill, Wissenschaftler beim Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations von British Columbia. Durch die Insekten und Brände ist der Klimawandel ins Bewusstsein der Menschen hier gedrungen: »Es handelt sich um keine abstrakte Gefahr irgendwann in der Zukunft, wir stecken schon mittendrin.«

Schwindel erregende Masse an Daten

Die Schäden haben auch die Regierung zum Handeln bewogen. 2009 begann British Columbia, die Vorschriften für das Ausbringen von Setzlingen zu überarbeiten. Im gleichen Jahr startete O’Neill einen Versuch zur assistierten Migration, um herauszufinden, ob, wo und wie Förster nach dem Holzeinschlag ganz andere Arten als vorher ansiedeln könnten. An 48 verschiedenen Stellen in Kanada und den westlichen Vereinigten Staaten – von Whitehorse bis Sacramento – pflanzten Wissenschaftler 15 Arten wirtschaftlich wichtiger Bäume, die teils von tausende Meilen entfernten Standorten stammten.

Diese extreme Migration dient zunächst einmal rein wissenschaftlichen Zwecken, um herauszufinden, wie die Bäume den Ortswechsel vertragen. Es geht nicht um einen generellen Leitfaden für das Verpflanzen über weite Distanzen hinweg. Die Erkenntnisse sind sehr allgemeiner Natur – »etwas in der Art wie ›Pflanze diesen Baum nicht in geringerer Höhe oder weiter südlich«, sagt O’Neill. Auf jeder Testfläche gibt es eine Wetterstation, und die Versuchsergebnisse sollen zeigen, wie das Überleben und Gedeihen der Setzlinge von den lokalen Bedingungen abhängt. Dann lässt sich, so der

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Wald und Waldsterben« finden Sie unter



www.spektrum.de/t/wald



FOTOLIA / SMILEUS



JACK WOODS / ADAPTREE PROJECT, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA



PIA SWETS / ADAPTREE PROJECT, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA

wächshaus keimen (2). Anschließend vergleichen sie die Größe und Form der Triebe (3) und prüfen die Nadeln auf ihre Frostbeständigkeit (4).

Forscher, auch die Reaktion der Bäume auf den Klimawandel vorhersagen.

Die genetischen Analysen von AdapTree liefern ähnliche Prognosen auf einem anderen Weg. In dem sich stetig ausweitenden Projekt haben Wissenschaftler das Erbgut von Millionen von Engelmann-Fichten und Küstentannen nach interessanten DNA-Sequenzen durchkämmt und dazu eine schnelle Screening-Methode entwickelt, die derjenigen ähnelt, welche die Firma 23andMe für die Analyse menschlicher Genome einsetzt. Man betrachtet ungefähr 50 000 kurze Abschnitte des genetischen Codes, in denen jeweils ein Basenpaar variiert, weshalb sie Einzelnukleotid-Polymorphismen (single nucleotide polymorphisms, SNPs) heißen, und versucht festzustellen, welche davon mit der Anpassung an den jeweiligen Standort zusammenhängen. Bei den bisherigen Untersuchungen an 600 jungen Bäumen gelang es, genetische Marker zu identifizieren, die viele der beobachteten Unterschiede in der Toleranz gegenüber Kälte, Hitze und Trockenheit erklären.

Die Masse an Rohdaten ist Schwindel erregend. Beidseitig auf Din-A4-Blättern ausgedruckt, ergäben sie einen 150 Kilometer hohen Papierstapel, wie Aitkin veranschaulicht. Und das ist nur ein Teil der Information. Die Wissenschaftler untersuchen nun, wie die Gene tatsächlich funktionieren, also wie die darin verschlüsselten Instruktionen ausgeführt werden, wenn die Bäume unter Stress durch Hitze oder Trockenheit geraten.

Einige Breitengrade weiter südlich beginnen auch Spezialisten des U.S. Forest Service das Für und Wider des »assisted gene flow« abzuwägen. In den Vereinigten Staaten haben Förster traditionell wenig auf Klimaunterschiede innerhalb der Verbreitungsgebiete von Bäumen geachtet, wenn sie Pflanzungen vornahmen. Die regionale Temperaturvariation erschien einfach zu gering, um sich negativ auszuwirken. Doch inzwischen ist auch hier das Bewusstsein für die Bedeutung des Mikroklimas gewachsen.

Schon immer haben Menschen Bäume in andere Regionen oder gar Kontinente verpflanzt. »Oft gab es Fehlschläge, weil die Bedingungen für das Gedeihen auf dem fremden Boden nicht ausreichend bekannt waren«, sagt Glenn Howe, Waldgenetiker an der Oregon State University. Das brachte die Forstverwaltungen mit der Zeit dazu, auf Nummer sicher zu gehen. In den westlichen Vereinigten Staaten sind die aus-

gewiesenen Pflanzgebiete für Bäume eng umgrenzt. »Das ist in einem stabilen Klima wahrscheinlich sinnvoll«, sagt Howe. »Wenn sich das Klima ändert, könnte allzu restriktives Vorgehen jedoch zum Problem werden.«

British Columbia stellt sich der Herausforderung. Die Schwierigkeiten sind dabei nicht nur wissenschaftlicher Art, sondern betreffen ebenso die Verwaltung. So verfügt die zentrale staatliche Samenbank von British Columbia über Saatgut für mehr als sechs Milliarden Bäume. Diesen Bestand kann man nicht über Nacht komplett erneuern. Als zäh erweisen sich auch überkommene Vorstellungen und Verhaltensweisen: Wissenschaftler müssen die Forstverwaltungen dazu bringen, den Ergebnissen der Genanalysen zu vertrauen und nicht nur dem, was sie mit eigenen Augen in der freien Natur sehen. Es kommt entscheidend darauf an, all die Einzelnukleotid-Polymorphismen und Sequenzdaten in »ein Lexikon für Förster zu übersetzen«, betont Aitkin.

Denn letztendlich stecken dahinter lebende Bäume, die als unersetzliche Naturschätze unser aller Leben in vielfältiger Weise bereichern. Um unter veränderten Umweltbedingungen überleben zu können, müssen sich manche von ihnen neue Territorien erschließen. Und dafür benötigen sie unsere Hilfe. ~

DIE AUTORIN



Hillary Rosner ist Journalistin in Colorado. Sie schreibt unter anderem für »National Geographic«, »New York Times« und »Wired«.

QUELLEN

- Aitkin, S. N., Whitlock, M. C.:** Assisted Gene Flow to Facilitate Local Adaptation to Climate Change. In: Annual Reviews of Ecology, Evolution, and Systematics 44, S. 367–388, 2013
- Lotterhos, K. E., Whitlock, M. C.:** Evaluation of Demographic History and Neutral Parameterization on the Performance of FST Outlier Tests. In: Molecular Ecology 23, S. 2178–2192, 2014
- Pedlar, J. H. et al.:** Placing Forestry in the Assisted Migration Debate. In: BioScience 62, S. 835–842, 2012

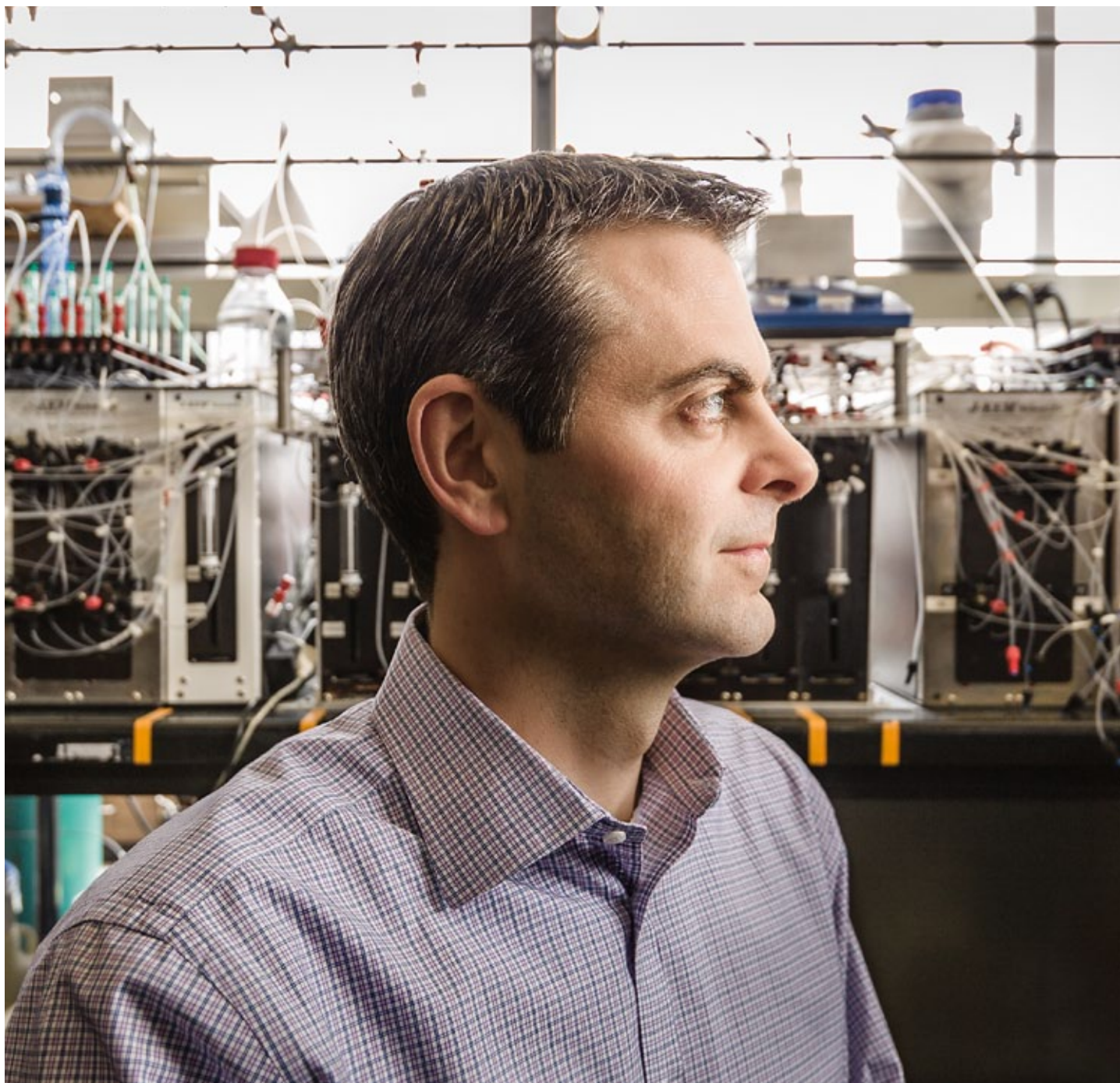
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372765

CHEMIEROBOTER

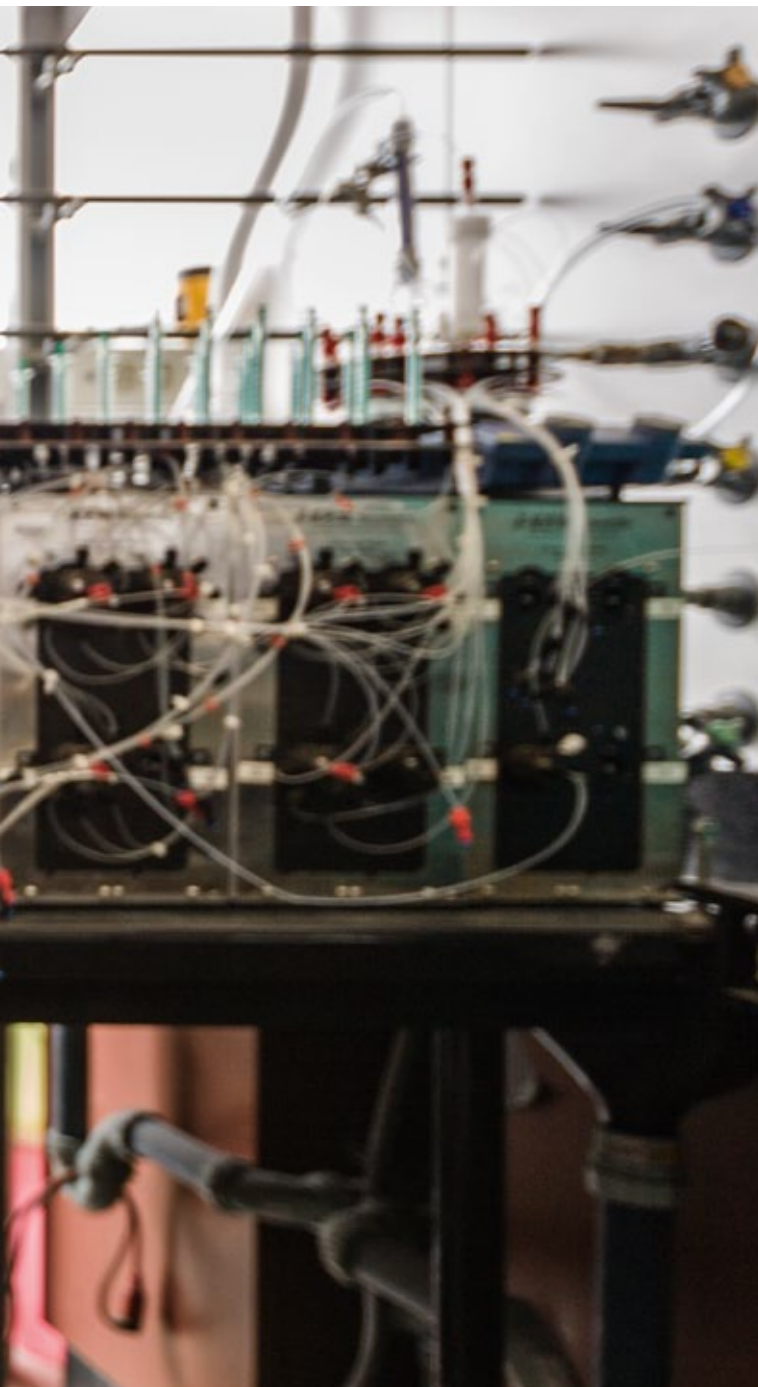
Die Synthesemaschine

Ein Automat, der selbsttätig kleine organische Moleküle zusammenbaut, verspricht Chemiker von lästiger Routinearbeit zu entlasten. Das könnte unter anderem die Entwicklung neuer Medikamente beschleunigen.

Von Robert F. Service



CHRIS BROWN PHOTOGRAPHY, WWW.CHRISBROWNPHOTO.COM



Die organische Chemie ist eine Quälerei. Jeder Chemiestudent in höheren Semestern kann ein Lied davon singen. Da gibt es die verwirrenden Namen von Molekülen, Bindungstypen, Reaktionen und Reagenzien, die »Kochrezepte«, das Hocken im Labor und Starren auf Glaskolben bis spät in die Nacht, die Trennungen, Reinigungen und Analysen. Selbst für Experten ist die Synthese von Molekülen ein zähes, mühsames Geschäft.

»Wir meinen das ändern zu können«, verspricht Martin Burke, Chemiker an der University of Illinois in Urbana-Champaign. Und zum Beweis bietet er an, einen chemischen Laien wie mich eine komplizierte Synthese durchführen zu lassen.

Burke nimmt mich mit in Zimmer 456 des Roger Adams Laboratory. Dort steht auf einer schwarzen Laborbank eine Vorrichtung von der Größe einer üblichen Espressomaschine in Kaffeebars. Obenauf befinden sich zwei Aluminiumblocks mit neun 2,4 Zentimeter breiten Löchern für Fläschchen. Ein Gewirr von dünnen Schläuchen verbindet die verschiedenen Teile. Doch das Grundprinzip ist einfach. Es handelt sich um die chemische Version eines Autobahnkreuzes, dazu gedacht, Lösungen nach einem bestimmten Plan von Behälter zu Behälter zu leiten. Burke und seine Mitarbeiter nennen es einfach »die Maschine«.

Burkes Doktorand Michael Schmidt gibt mir das Rezept und die Ausgangsstoffe zur Herstellung von Crocacin C, einem im Jahr 2000 erstmals von drei australischen Chemikern synthetisierten Fungizid. Das Plastikfläschchen Nummer 1, das eine Prise eines weißen, kristallinen Pulvers enthält, kommt in Loch Nummer 1, Fläschchen 2 mit einem anderen weißen Pulver in das zweite Loch und so weiter. Schmidt lässt mich ein paar dünne Schläuche anschließen, um Wasser, ein organisches Lösungsmittel, Luft und Stickstoffgas zuzuführen. Dann drücke ich den Startknopf auf dem Laptop, der unter der Laborbank steht. Damit ist meine Arbeit erledigt.

Der Chemiker Martin Burke vor dem von ihm entwickelten Syntheseautomaten für organische Verbindungen an der University of Illinois in Urbana-Champaign.

CHRIS BROWN PHOTOGRAPHY, WWW.CHRISBROWNPHOTO.COM

Den Rest macht die Maschine. Mit sanftem Surren führt sie Dutzende von Reaktionsschritten im immer gleichen Zyklus durch: Vorbereiten, Reagierenlassen, Abtrennen, Spülen. Zwei Tage später meldet Burke per E-Mail, dass meine erste Totalsynthese abgeschlossen ist. Das Ergebnis: sechs Gramm gelblich-weißes Crocacin C.

Befreiung von der Fron stupider Handarbeit

Die Substanz ist nur eine von vielen organischen Verbindungen, die Burkes Maschine herstellen kann: sowohl kettenartige als auch ringförmige oder wie Schalen gebogene Moleküle mit Bindungen in allen möglichen Varianten und Orientierungen. Wie die schon länger bekannten DNA-Syntheseautomaten hängt das Gerät vorgefertigte Bausteine aneinander. Und weil Tausende solcher Blöcke inzwischen kommerziell erhältlich sind, könnte es Milliarden unterschiedlicher organischer Verbindungen herstellen – mit denkbaren Anwendungen als Medikamente, Agrochemikalien oder Werkstoffe.

»Es ist ein faszinierendes neues Hilfsmittel«, schwärmt Cathleen Crudden, organische Chemikerin an der Queen's University im kanadischen Kingston, »und es bedeutet einen riesigen Fortschritt auf dem Gebiet der Synthese kleiner Moleküle.« Peter Seeberger vom Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam stimmt zu. »Es handelt sich um einen echten Meilenstein, und er bildet erst den Anfang«, erklärt der Forscher, der selbst Syntheseautomaten für einen anderen Verbindungstyp entwickelt hat: die Oligosaccharide genannten kurzen Zuckerketten, die als Schwänze an vielen Proteinen und Fettstoffen hängen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2015, S. 28).

Die wachsende Automatisierung, glauben er und eine Reihe seiner Kollegen, biete Biologen und Vertretern vieler anderer Disziplinen einen neuartigen, einfachen Zugang zu den Substanzen, die sie brauchen. Zugleich gebe sie organischen Chemikern die Freiheit, anspruchsvollere Ziele zu verfolgen, als nur immer wieder Moleküle herzustellen, von denen sie längst wissen, wie sie gemacht werden.

»Je mehr wir dieses Hilfsmittel verbessern und allgemein zugänglich machen, desto mehr profitiert die Wissenschaft«, versichert Seeberger.

Seit ihren Anfängen in den 1820er Jahren hat sich die organische Chemie allen Automatisierungsversuchen hartnäckig widersetzt. Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelang die Konstruktion von Synthesemaschinen für Biopolymere, in denen bestimmte Sorten von Bausteinen über dieselbe Art von chemischer Bindung kettenartig miteinander verknüpft sind. Diese Bindung fungiert dabei wie eine Eisenbahnkupplung, mit der Rangierer Waggons in beliebiger Reihenfolge aneinanderhängen können. Heute lassen sich so drei Sorten von Biopolymeren vollautomatisch

AUF EINEN BLICK

MECHANISCHER MOLEKÜLEBASTLER

1 Organische Chemiker bauen ihre Moleküle bis heute per Hand in Dutzenden von Schritten Stück für Stück zusammen. Dabei nehmen sie teils immer wieder dieselben Prozeduren vor – was auch ein Automat erledigen könnte.

2 Solche Automaten werden inzwischen schon routinemäßig zur **Synthese von Eiweißstoffen oder Nukleinsäuren** eingesetzt. Hier dient eine Standardreaktion dazu, vorgefertigte Bausteine in einer vorgegebenen Reihenfolge zu verknüpfen.

3 Forscher haben nun eine vielseitige Verknüpfungsreaktion identifiziert, mit der sich auch andere organische Moleküle aus kleineren Einheiten zusammenfügen lassen. Sie bildet den Kern eines neuartigen **Syntheseautomaten für organische Verbindungen**.

zusammenbauen: kurze DNA-Ketten (Oligonukleotide), Proteinstücke (Peptide) und Oligosaccharide.

Die Verfahren haben inzwischen erhebliche wirtschaftliche Bedeutung erlangt. Nach Schätzungen des Marktforschungsunternehmens MarketsandMarkets wird das Geschäft mit der Synthese von Oligonukleotiden bis 2019 ein Volumen von 1,7 Milliarden Dollar (1,5 Milliarden Euro) erreichen. Medikamente auf Basis synthetischer Peptide erbringen bereits mehr als 14 Milliarden Dollar (12 Milliarden Euro) jährlich. »Wenn Ähnliches mit kleinen Molekülen möglich wäre, hätte das enorme Auswirkungen«, sagt Richard Whitby, organischer Chemiker an der University of Southampton (England). Denn diese Moleküle bilden nicht nur das Rückgrat der pharmazeutischen Industrie, sondern dienen auch zur Herstellung von zahllosen anderen Produkten wie Farb- und Leuchtstoffen, Agrochemikalien und molekularen Sonden.

Was es so schwierig macht, die Synthese von kleinen Molekülen zu automatisieren, ist die schier unbegrenzte Vielfalt geometrischer Formen, in der sie daher kommen. Allein die vier Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff lassen sich nach einer jüngst publizierten Berechnung zu 10^{60} verschiedenen Verbindungen kombinieren – das ist mehr als die Anzahl der Atome im Universum.

Zudem ähnelte die Synthese organischer Moleküle schon immer eher dem Anfertigen von Möbelstücken als dem Aneinanderhängen von Waggons. Schreiner können vielerlei Holz verwenden und es auf die verschiedensten Arten zusammenfügen: mit Zapfen, Schwalbenschwänzen, Überlappungsfugen und so weiter. Wie Tischler müssen organische Chemiker sicherstellen, dass jede Bindung richtig orientiert ist. Wenn ein Kohlenstoffatom von einem Molekül nach außen weg statt nach innen zeigt, ist das Produkt biologisch meist genauso nutzlos wie ein Stuhl, von dem ein Bein seitlich absteht.

»Dies bedeutet einen riesigen Fortschritt auf dem Gebiet der Synthese kleiner Moleküle«

Cathleen Crudden, Queen's University

Aus diesem Grund arbeiten organische Chemiker in der Regel mit komplizierten Vorschriften, um eine Bindung nach der anderen zu knüpfen, und bauen ein Molekül in Dutzenden bis Hunderten von Schritten Stück für Stück zusammen. Nur dieses methodische Vorgehen bietet die Gewähr dafür, dass am Ende genau das gewünschte Produkt herauskommt. »Das ist das Dogma seit 180 Jahren«, meint Burke, der nicht nur die hochgewachsene Statur, sondern auch etwas vom Durchhaltevermögen eines Marathonläufers hat. Als Doktorand an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) traf er im November 1998 eine 22-jährige Patientin mit Mukoviszidose. Bei dieser Erbkrankheit fehlt ein Protein, das normalerweise einen Ionenkanal durch die Zellmembran bildet, der zum Transport von Kochsalz dient. Ohne ihn ist der Schleim in der Lunge zu zähflüssig, was zu chronischem Husten und häufigen Infektionen führt. Die Patientin, eine intelligente und wissbegierige junge Frau, stellte Burke immer detailliertere Fragen zu der Krankheit, so dass er ihr den genauen genetischen Defekt erklärte. Am Ende fragte sie: »Wenn die Ärzte die Ursache so genau kennen, warum können sie nichts dagegen tun?« »Diese Unterredung veränderte mein Leben«, sagt Burke.

Künstlicher Ersatz für einen fehlenden Ionenkanal

Wie er wusste, zielen moderne Arzneimittel darauf ab, überaktive Proteine zu hemmen, fehlende aber können sie nicht ersetzen. Allerdings war dem Forscher auch bekannt, dass kleine Wirkstoffmoleküle in manchen Fällen in der Lage sind, die ausgefallene Funktion zu übernehmen. In seinen frühen Vorlesungen über organische Chemie hatte er von einer solchen Substanz erfahren: Amphotericin B oder kurz Amph B, ein von Bakterien hergestelltes Antipilzmittel. Das Molekül lagert sich mit seinesgleichen und bestimmten Bestandteilen der Zellmembran, so genannten Sterinen, zu einem Ionenkanal zusammen. Auf diese Weise, so die damalige Vermutung, durchlöchert Amph B die Zellhülle der Pilze und lässt sie absterben. Wegen erheblicher Nebenwirkungen kommt die Substanz freilich nur bei schweren Pilzinfektionen zum Einsatz.

Nach Abschluss seiner Doktorarbeit plante Burke 2005, zunächst einmal den vermuteten Wirkmechanismus der Substanz zu beweisen und sie dann so abzuwandeln, dass sie weniger schädlich ist. Langfristig aber hatte er eine noch kühnere Vision: Er wollte die Fähigkeit des Moleküls, Kanäle zu bilden, dazu nutzen, Mukoviszidosepatienten zu helfen. Wenn seine Idee funktionierte, könnte Amph B als eine Art molekulare Prothese den Salztransport in der Lunge übernehmen – vielleicht nicht so gut wie das Original, aber gut genug, um die Symptome zu lindern.

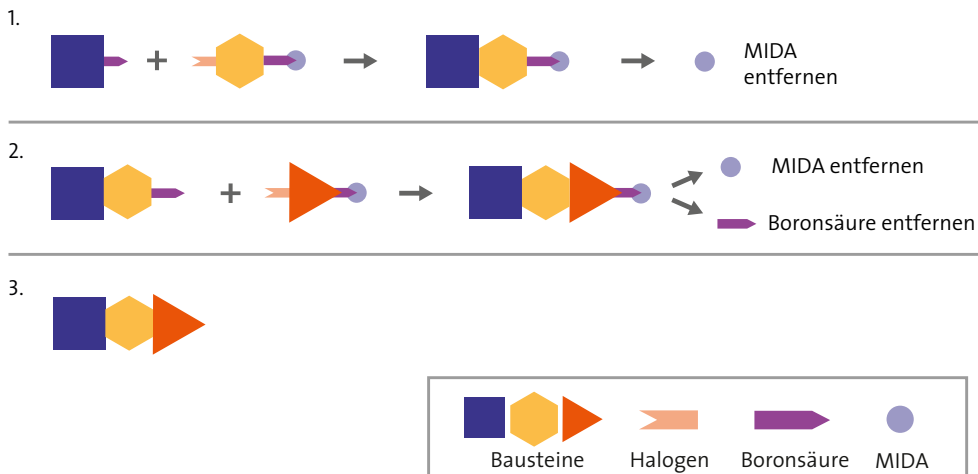
Leider stieß Burke auf eine schier unüberwindliche Hürde. »Schnell erkannten wir, dass die Sache an der Synthese zu scheitern droht«, sagt er. Amph B ist ein kompliziertes Molekül, das 47 Kohlenstoffatome enthält, und die 1987 publizierte, einzige bekannte Synthese umfasst mehr als 100 Schritte. Genug von dem Molekül – und Abwandlungen (De-

privaten) davon – herzustellen, um die Biologie der Porenbildung zu entschlüsseln, würde Jahre, wenn nicht Jahrzehnte dauern.

Neidvoll blickte der Forscher auf seinen engen Freund und Kollegen Rahul Kohli, der die biologische Aktivität großer ringförmiger Peptide untersuchte. Am Ende jeder Woche tauschten die beiden sich bei einem Bier in der Bar »The Cellar« über ihre Arbeit aus. »Es haute mich um, wie schnell seine Forschung voranging«, berichtet Burke. Der Grund war ein Syntheseeautomat, der ganze Bibliotheken von Peptiden für Kohlis Untersuchungen ausspuckte. »Selbst während wir beim Bier zusammensaßen, fabrizierte die Maschine weiter Substanzen für ihn. Ich wurde krankhaft eifersüchtig auf dieses Gerät und fragte mich, ob etwas Analoges nicht für meine Moleküle möglich wäre.«



Schläuche leiten die Ausgangsverbindungen aus Fläschchen ins Innere des Automaten. Dort werden sie schrittweise zu den gewünschten Molekülen verknüpft.



Der Automat verbindet Kohlenstoffatome, die eine Boronsäuregruppe tragen, mit solchen, an denen ein Halogenatom hängt. Eine MIDA-Gruppe wirkt dabei als Schalter, der sich um eine Boronsäuregruppe wickelt und erst abgespalten werden muss, bevor sie reagieren kann.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: SCIENCE

Als Burke genauer darüber nachdachte, wurde ihm klar, dass die Aminosäurebausteine, die Kohlis Syntheseautomat zusammenfügte, strukturell durchaus komplex waren. Sie kommen in einer breiten Palette von Formen und Größen daher, einige mit bis zu zwei Ringen als Anhängseln. Dennoch fügte die Maschine sie anstandslos zusammen, indem sie stets dieselbe Verknüpfung herstellte. »Die ganze Komplexität steckt in den Bausteinen, und die kauft man in der Flasche«, überlegte Burke.

Könnte dasselbe nicht auch bei kleinen Molekülen funktionieren? Nach seiner Promotion beschloss der Jungwissenschaftler, dieser Möglichkeit nachzugehen. Er konzipierte ein entsprechendes Forschungsprogramm und ging damit auf die Suche nach einer Postdoc-Stelle. »Beim Bewerbungsgespräch in Illinois machten sie mir ein Angebot, und ich nahm es sofort an«, erzählt Burke. Seither arbeitet er dort an der Verwirklichung seiner Vision.

»Es handelt sich um einen echten Meilenstein, und er bildet erst den Anfang«

Peter Seeberger, MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung

Moleküle zusammenknipsen wie Druckknöpfe

Als Erstes galt es, die beste Reaktion zum Verknüpfen der Bausteine auszumachen. Die Wahl fiel letztlich nicht schwer. In den 1970er Jahren hatte der Chemiker Akira Suzuki von der Universität Hokkaido (Japan) eine Möglichkeit entdeckt, mit Palladium als Katalysator die Kohlenstoffatome an zwei Molekülen zu verbinden, während sich an den beiden Reaktionspartnern sonst nichts ändert. Der Trick bestand darin, an eines der Kohlenstoffatome ein Halogenatom wie Brom oder Iod anzufügen und das andere mit einem Boronsäurerest zu versehen, einem Boratom mit zwei Hydroxylgruppen (OH). Bei der Reaktion werden durch Zugabe von Natronlauge Bor-säure und Natriumchlorid abgespalten. Nach Aussage von Seeberger ist diese so genannte Suzuki-Kupplung heute eine der nützlichsten Reaktionen in der organischen Chemie und

findet breite Anwendung; ihr Entdecker erhielt denn auch 2010 den Nobelpreis.

Damit hatte Burke seinen Verknüpfungsmechanismus gefunden. Indem er Moleküle synthetisierte, die auf der einen Seite eine Boronsäuregruppe und auf der anderen ein Halogenatom trugen, konnte er sie gleichsam zusammenknipsen wie Druckknöpfe. Aber er benötigte einen weiteren Mechanismus, der dafür sorgte, dass der Katalysator nicht einfach endlos Bausteine in beliebigen Kombinationen aneinanderfügte. »Um ein Molekül Schritt für Schritt aufzubauen, brauchten wir einen Schalter«, erklärt Burke.

Im Jahr 2007 fand er ihn: ein Molekül namens MIDA (N-Methyliminodiessigsäure), das sich um das Bor wickelt und es dadurch blockiert. Nun konnte Burkes Team mit einem Baustein beginnen, der nur eine freie

Boronsäuregruppe, aber kein Halogenatom trug. Zu ihm gaben die Forscher einen zweiten Baustein, der sowohl ein Halogenatom als auch eine – allerdings eingewickelte – Boronsäuregruppe enthielt. Diese war somit blockiert und konnte nicht an der Umsetzung teilnehmen. Das stellte sicher, dass nur eine Reaktion stattfand: zwischen dem Halogenatom am zweiten Baustein und der Boronsäuregruppe am ersten. Und schwupp waren die beiden Moleküle verknüpft! Anschließend entfernten die Forscher das MIDA von dem soeben verschweißten Paar, fügten einen anderen Baustein mit Halogenatom und eingewickelter Boronsäuregruppe hinzu und wiederholten die Prozedur (siehe Schemazeichnung oben).

Das Verfahren funktionierte. Im Jahr 2012 berichtete Burkes Team in den »Proceedings of the National Academy of Sciences«, dass es ihm mit dieser Methode gelungen war, ein abgewandeltes Amph B zu synthetisieren, das keine Ionenkanäle bilden konnte, aber trotzdem Pilze abtötete. Damit war die bisherige Annahme widerlegt: Die Substanz

wirkte nicht, indem sie die Zellhülle durchlöcherte, sondern indem sie die Sterine band, die nötig waren, damit die Membranproteine korrekt arbeiten.

Schon 2008 hatten Burke und seine Mitarbeiter im »Journal of the American Chemical Society« mitgeteilt, dass sich ihr Verfahren dazu eigne, eine ganze Reihe pharmazeutisch wirksamer Verbindungen aus der Klasse der so genannten Polyene herzustellen. Wie sie später errechneten, reichen zwölf MIDA-Boronsäure-Bausteine aus, um drei Viertel der 2839 Polyene zu synthetisieren, die aus der Natur bekannt sind. Offenbar waren sie auf dem richtigen Weg.

Probleme beim Reinigungsschritt und ihre verblüffende Lösung

Allerdings nahmen sie all das Verknüpfen immer noch per Hand vor. Den Vorgang zu automatisieren, warf neue Probleme auf. Das größte bestand darin, einen Weg zu finden, das jeweils erzeugte Molekülpaar zu reinigen, also von Nebenprodukten, ungenutzten Ausgangssubstanzen und molekularem Abfall zu trennen. Bei Synthesemaschinen für DNA, Peptide und Oligosaccharide gelingt das, weil die Bausteine all dieser Biopolymere über einen einheitlichen chemischen Henkel verfügen, der sich dazu nutzen lässt, die Reaktionsprodukte jeweils an einem Feststoff – etwa Plastik-Kügelchen – zu verankern. Zwischen den Syntheseschritten kann man die überschüssigen Reagenzien dann einfach auswaschen.

Für kleine Moleküle existiert dagegen kein solcher einheitlicher Henkel. Doch dann entdeckte Burkes Team 2008 per Zufall, dass die MIDA-Boronsäuren in Gegenwart eines Gemischs aus Methanol und Ether an Kieselgelteilchen haften bleiben. Bei Zugabe von Tetrahydrofuran, einem anderen Lösungsmittel, lösen sie sich dagegen ab. Das erlaubte den Forschern, ihre Moleküle nach Wunsch festzuhalten oder freizugeben. Um die Verbindungen zu reinigen, ließen sie die Lösung einfach zusammen mit einer Methanol-Ether-Mischung durch ein mit Kieselgel gefülltes Glasrohr laufen. Darin blieben die Reaktionsprodukte hängen. Nach dem Auswaschen der Verunreinigungen wurden sie dann mit Tetrahydrofuran wieder abgelöst. Dieses einfache Verfahren öffnete laut Whitby die Tür zur Automatisierung.

Burke und seine Mitarbeiter verfolgten fortan mit Hochdruck den Bau ihrer Maschine. Mehrere Jahre vergingen mit dem Entwerfen und Anpassen des Apparats. Zusammen mit Ingenieuren aus der universitätseigenen Werkstatt fertigten und kombinierten die Forscher die nötigen Teile und schrieben das Computerprogramm für das schrittweise Abarbeiten der Synthesevorschriften. Währenddessen schufen sie zusätzliche Möglichkeiten, die Bausteine in unterschiedlichen Orientierungen zusammenzufügen und statt linearer Kettenmoleküle auch steifere ringförmige Verbindungen zu erzeugen. Dadurch gelang es, ein breiteres Sortiment von Naturprodukten herzustellen.

Noch ist unklar, wie viele Moleküle Burkes Synthesemaschine letztendlich zu produzieren vermag. Mit rund 5000 Bausteinen sollte sie nach Schätzungen des Forschers rund

70 bis 75 Prozent der 260 000 bekannten kleinen organischen Naturstoffe anfertigen können. »Wenn uns das gelingt, verlagert sich der geschwindigkeitsbestimmende Schritt von der Synthese zum Verständnis der Funktion«, meint Burke. »Ich denke, die organische Chemie brennt darauf!«

Doch einige seiner Kollegen stehen der Automatisierung auch skeptisch gegenüber. »Manche fühlen sich bedroht«, räumt Seeberger ein. Zudem sind bisher nur rund 200 Bausteine mit Halogenatom und in MIDA gewickelten Boronsäuregruppen kommerziell erhältlich. Immerhin einige weitere Tausend tragen zumindest eines der beiden Anhängsel und eignen sich somit als Start- oder Schlussglied. Dennoch müssten sich auch andere Chemiker mit der Methode anfreunden und mehr komplett ausgestattete Bausteine produzieren, um das Potenzial des Verfahrens auszuschöpfen.

Burke beschäftigt sich derweil wieder mit seiner Lieblingsverbindung: Amph B. Wie er berichtet, hat sein Team mit Hilfe des Synthesemaschinen bereits ein Derivat hergestellt, das Pilze abtötet, menschliche Zellen hingegen schont. Es bindet sich an das pilzspezifische Ergosterin, aber nicht an das Cholesterin von Säugetieren. Dank dieser Selektivität ist es zumindest in Zellkultur weniger schädlich als Amph B. Anfang 2015 hat Burke das entsprechende Knowhow in das von ihm gegründete Start-up-Unternehmen Revolution Medicines eingebracht, das auch seine Synthesemaschine vermarktet.

Seinen Traum einer molekularen Prothese für Mukoviszidosepatienten hat der Forscher gleichfalls noch nicht aufgegeben. Wie er berichtet, arbeitet sein Team bereits an einem Derivat von Amph B, das die fehlenden Ionenkanäle bildet. Noch lässt sich nicht sagen, wie die Sache ausgeht. Aber der neue Ansatz, die organische Chemie zu automatisieren, beginnt zweifellos Früchte zu tragen. ~

DER AUTOR



Robert F. Service ist Wissenschaftsredakteur in Portland (Oregon) und schreibt als Korrespondent für die Fachzeitschrift »Science« über Chemie und Materialforschung.

QUELLEN

- Gray, K.C. et al.:** Amphotericin Primarily Kills Yeast by simply Binding Ergosterol. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 109, S. 2234–2239, 2012
- Lee, S.J. et al.:** Simple, Efficient, and Modular Syntheses of Polyene Natural Products via Iterative Cross-Coupling. In: Journal of the American Chemical Society 130, S. 466–468, 2008
- Woerly, E.M. et al.:** Synthesis of Most Polyene Natural Products Using just Twelve Building Blocks and One Coupling Reaction. In: Nature Chemistry 6, S. 484–491, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372766

© Science
Service, R.F.: The Synthesis Machine. Science 347, S. 1190–1193, 2015;
Abdruck genehmigt von AAAS

Computer-Halluzinationen

Neuronale Netze erkennen nicht nur vorgelegte Bilder sehr treffsicher – sie produzieren mit Hilfe ihres reichen Erfahrungsschatzes auch neue. Diese freilich sehen aus wie Ausgeburten einer kranken Fantasie.

VON BRIAN HAYES

Gesehene Gegenstände zu erkennen, zählt zu den Stärken des menschlichen Gehirns. Wir können einen Stapel Fotos durchblättern und ohne Nachdenken sagen, was darauf abgebildet ist: Hund, Kuchen, Fahrrad, Teekanne ... Wie wir diese Höchstleistung vollbringen, wüssten wir allerdings nicht zu erklären. Wenn ich eine Rose sehe, werden gewisse Neurone im visuellen Kortex meines Gehirns aktiv; bei einer Tulpe sind es andere. Welche Unterschiede zwischen beiden Blumen lösen die verschiedenen Reaktionen aus?

Niemand mag sich Elektroden in den Schädel stechen lassen, um diese Frage durch Experimente zu beantworten. Wie wäre es, ersatzweise ein künstliches Gehirn zu untersuchen? Neuerdings erreichen die Computer in der Bilderkennung die Leistung menschlicher Experten. Andererseits sind sie in allen Einzelheiten von Menschen konstruiert – also müssten wir doch angeben können, wie sie funktionieren. Aber das stimmt nicht. Die maschinellen Bilderkennungssysteme stellen sich als fast so undurchschaubar heraus wie die natürlichen. Es handelt sich um »tiefe neuronale Netze« (Spektrum der Wissen-

schaft 9/2014, S. 62). Sie sind den Strukturen im echten Gehirn nachempfunden und haben ihre Fähigkeiten nicht einprogrammiert bekommen, sondern an Beispielen gelernt. Nun steckt ihr Wissen über Bilder in großen Zahlentabellen; und mit denen kann kein Mensch unmittelbar etwas anfangen.

In den letzten zwei Jahren haben die neuronalen Netze jedoch diesen oder jenen Blick in ihr Inneres preisgegeben. Ein Zugang verläuft über Bilder, die eigens darauf angelegt sind, das Netz in die Irre zu führen, vergleichbar den Vexierbildern, die unser Gehirn zwischen zwei Interpretationen hin- und herspringen lassen. Oder man betreibt das Netz sozusagen im Rückwärtsgang: Statt ihm ein Bild vorzulegen und nach dem zugehörigen Begriff zu fragen, gibt man einen Begriff vor und lässt das Netz ein zugehöriges Bild erzeugen.

Ein verwandtes Verfahren löste in den letzten Monaten einen gewaltigen Wirbel aus. »Deep dreaming« reichert ein Bild mit Motiven an, die das Netz zu erkennen gelernt hat. Ein Berggipfel wird zum Vogelschnabel, ein Knopf verwandelt sich in ein Auge, Schildkrötenhunde, Fischeidechsen und andere Mischwesen bevölkern die Landschaft. Über den unmittelbaren Reiz hinaus, der diese fantastischen Bilder im Internet überaus populär gemacht hat, dienen sie als (Zerr-)Spiegel für den »Geist des neuronalen Netzes«. Sie geben einen Einblick in dessen Funktionsweise, der auf direktem Weg nicht zu haben ist.

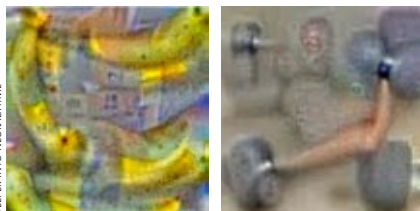
Wie ihre natürlichen Vorbilder sind die Neurone eines künstlichen neuronalen Netzes einfache signalverarbeitende Bauteile. Jedes von ihnen befindet sich in einem gewissen Aktivitätszustand. Im natürlichen Neuron ist das die Häu-

figkeit, mit der es Impulse ausstößt, im nachgemachten Bauteil eine einfache Zahl. Tausende bis Millionen von ihnen sind in Schichten angeordnet, und die Information fließt stets von einer Schicht zur nächsthöheren. Jedes Neuron errechnet seinen eigenen Aktivitätszustand aus den Zuständen gewisser Neurone in der Schicht unter ihm und reicht diesen zu anderen in der unmittelbar darüberliegenden Schicht weiter.

Gelehrige Netze

In einem neuronalen Netz zur Bilderkennung ist jedes Neuron der untersten (»Eingabe«-)Schicht einem Pixel (Bildpunkt) zugeordnet. Seine Aktivität ist gleich der Helligkeit dieses Pixels, und bei Farbbildern gibt es für jedes Pixel drei Eingangsneurone für Rot-, Blau- und Grünwert. Die oberste Schicht besteht aus »Ausgabe-Neuronen«, die jeweils zu einer möglichen Bildkategorie (»Katze«, »Fahrrad«, »Rose«, »Tulpe«) gehören. Die dazwischenliegenden »verborgenen« Schichten arbeiten irgendwie die Merkmale heraus, welche die Kategorien voneinander unterscheiden – wenn das Netz ausgelernt hat.

Im Urzustand gleicht das Netz einer »Tabula rasa«. Bevor es irgendetwas erkennen kann, muss es trainiert werden. Ein Lehrer – üblicherweise ein Computerprogramm – legt der Eingabeschicht ein Bild vor. Daraufhin wandert die Aktivität von unten nach oben durch das Netz, und irgendein Element der Ausgabeschicht zeigt schließlich maximale Aktivität. Wenn es sich zum Beispiel um das Neuron für »Katze« handelt, das Bild aber eine Banane zeigt, dann wandert eine Fehlerkorrektur von oben nach unten durch das Netz mit dem Effekt, dass die Aktivität des falschen Ausgabe-Neu-



Die Vorstellung des Netzes GoogLeNet von den Begriffen »Banane« (links) und »Hantel« (rechts). Offensichtlich hat das System eine Hantel kaum je ohne einen muskulösen Arm gesehen, der sie hochhält, und sich daraufhin ein falsches Bild gemacht.

MICHAEL TYKA ET AL. / GOOGLE INC. / CREATIVISION.COM / LICENSED BY DATA COLLECTOR / GOOGLE RESEARCH BLOGSPOT / DEZ/2015/06/INCEPTIONISM-GOING-DEEPER-INTO-NEURAL-NETWORKS



BRIAN HAYES



BRIAN HAYES

rons gedämpft und die des richtigen verstärkt wird. Dabei werden nicht etwa neue Verbindungen zwischen Neuronen geknüpft oder andere gekappt; auch die Funktionsweise jedes einzelnen Neurons bleibt gleich. Vielmehr ändern sich nur die »synaptischen Gewichte«. Diese Zahlen geben an, wie stark die Aktivität des signalisierenden Neurons auf die des empfangenden einwirkt. Wie sie zu ändern sind, das errechnet ein Algorithmus namens »Backpropagation«. Erst dieses Verfahren hat die künstlichen neuronalen Netze zu einem praktisch anwendbaren System gemacht.

Frühe Realisierungen beschränkten sich auf eine verborgene Schicht, da vielschichtiger («tiefer») Netze nur schwer zu trainieren waren. Mittlerweile ist dieses Problem durch schnellere Hardware, bessere Algorithmen und größere Sortimente zum Trainieren überwunden worden. Netze mit mehr als einem Dutzend Schichten sind heute nichts Besonderes mehr.

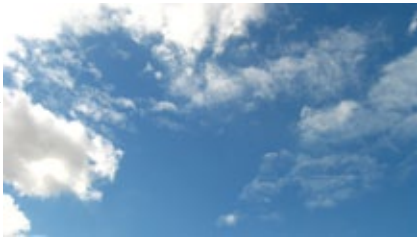
Aus sieben Bergen (Sandsteinformationen im Norden des US-Bundesstaats New Mexico) fantasiert sich ein neuronales Netz sieben Zwerge zurecht – mit Hundeköpfen. Dabei interpretiert es vorhandene Merkmale des Originals auf neue Weise, zum Beispiel dunkle Flecken als Hundeschnauzen, und ergänzt diese zu vollständigen Köpfen. Ein Steilhang rechts hinten im Bild verwandelt sich in eine sanft ansteigende Landschaft.

Manche Netze sind komplett verdrahtet: Jedes Neuron einer Schicht empfängt Information von allen Neuronen ein Stockwerk tiefer. Bei den neueren Bilderkennungsnetzen dagegen reagiert ein Neuron nur auf das, was in einem kleinen Bereich unter ihm passiert. Zum Beispiel sind fast alle Schichten so regelmäßig gitterförmig aufgebaut wie die unterste, und jedes Neuron achtet nur auf ein Quadrat der Größe 3·3 oder 5·5 unmittelbar unter sich. Außerdem ist das Sortiment der synaptischen Gewichte für alle Neurone einer Schicht dasselbe. Dadurch reagiert das Netz in gleicher Weise auf spezielle Bildmotive wie Kanten oder Kreise, einerlei wo im Bild sie vorkommen.

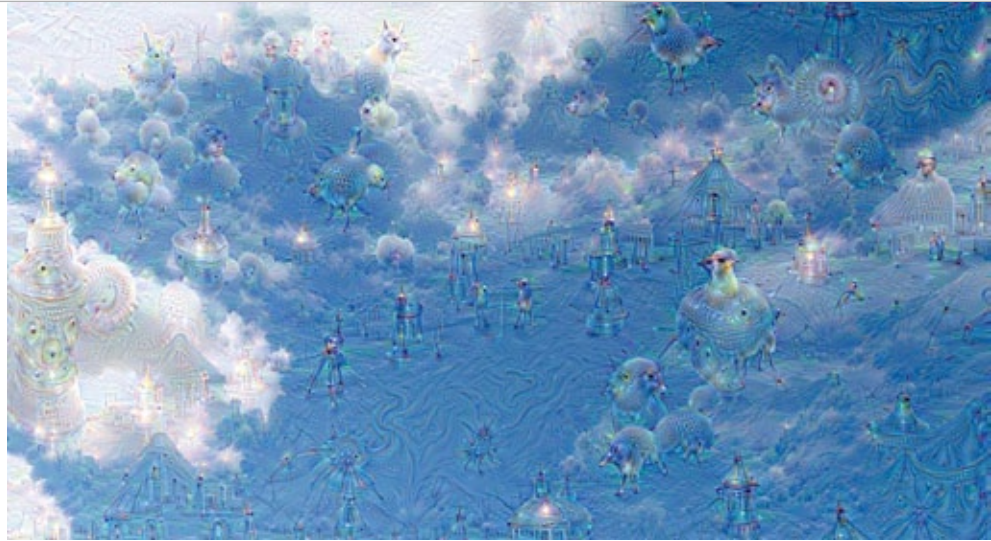
Im Effekt arbeitet eine solche Schicht wie ein Gerät, das Nachrichtentechniker einen ortsunabhängigen Filter nennen würden. Die zugehörige mathematische Operation heißt Faltung (englisch: convolution) und die nach diesem Prinzip gebauten Netze »convolutional neural networks« oder kurz »Convnets«.

Ein solches Netz ist wie geschaffen, um in einem Bild eine Hierarchie aufeinander aufbauender Strukturen zu finden. Die Neurone der untersten Schichten sind extrem kurzsichtig, aber je weiter die Information nach oben wandert, desto großräumigere Merkmale geraten ins Blickfeld. So finden sich kleine Elemente wie Augen, Mund und Nase zu ganzen Gesichtern zusammen.

MICHAEL TYKA ET AL., GOOGLE INC. / CC-BY-4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG / LICENSES/ BY/4.0/LEGALCODE)



Einen unschuldigen Wolkenhimmel bevölkert das neuronale Netz, das vorrangig mit Tierbildern trainiert wurde, mit den unglaublichsten Kreaturen. Immerhin strecken alle Tiere ihre Beine nach unten, und auch die Gebäude haben die richtige Orientierung, mit der Kuppel nach oben.



MICHAEL TYKA ET AL., GOOGLE INC. / CC-BY-4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG / LICENSES/ BY/4.0/LEGALCODE); GOOGLERESEARCH.BLOGSPOT.DE/2015/06/INCEPTIONISM-GOING-DEEPER-INTO-NEURAL.HTML

Jedes Jahr messen die Bilderkennungs-fachleute ihre Kräfte beim ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. Die Wettbewerber bekommen eine Trainingsmenge von 1,2 Millionen Bildern, die in 1000 Kategorien sortiert sind. Nach der Lernphase müssen die Programme weitere 100 000 Bilder in die richtigen – von Menschen vergebenen – Kategorien einordnen. Manche Kategorien sind weit gefasst («Restaurant«, «Scheune«), andere sehr eng («Welsh Springer Spaniel«, «Stahlbogenbrücke«).

In den Jahren 2012 bis 2014 haben stets Convnets die ersten Plätze bei dem Wettbewerb belegt. Der Sieger von 2014 war ein 22-schichtiges Netz mit ungefähr 60 Millionen Parametern na-

mens GoogLeNet, das Christian Szegedy von Google gemeinsam mit acht Kollegen entwickelt hat.

Wenn ein Convnet einen Welsh Springer Spaniel erkennen kann, was genau hat es dann gelernt? Bei einem Menschen würden wir sagen, er habe sich einen Begriff oder ein geistiges Modell dafür zugelegt, wie diese Hunderasse aussieht. Vielleicht steckt ungefähr so etwas in den synaptischen Gewichten von GoogLeNet, aber wie sollen wir das in den 60 Millionen Zahlen ausfindig machen?

Zum Beispiel, indem wir die Information gegen die übliche Richtung fließen lassen – eine Idee, der neben anderen Gruppen Andrea Vedaldi und Andrew Zisserman von der University of Oxford

und ihre Kollegen nachgehen. Sie greifen sich ein bestimmtes Neuron der obersten Schicht heraus und suchen nach einem Bild, das dieses Zielneuron zu maximaler Aktivität veranlasst. Rechnerisch ist das Verfahren dem Backpropagation-Algorithmus zum Verwechseln ähnlich, nur arbeitet man nicht mit einem fest vorgegebenen Bild und variablen synaptischen Gewichten, sondern genau umgekehrt. Das Ergebnis dieser Suche verkörpert in einem gewissen Sinn die Vorstellung des Netzes von einer Banane oder einer Hantel (Bilder S. 86). Gegenprobe mit Ihrem eigenen Gehirn: Was für ein Bild entsteht in Ihrem Kopf, wenn Sie an eine Banane denken? Mathematisch gesehen kann diese Umkehrung des Informationsflusses

ZACHI EVENOR / CC-BY-2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG / LICENSES/ BY/2.0/LEGALCODE)



Bei diesem Foto von Zachi Evenor hat der Software-Ingenieur Günther Noack ein neuronales Netz angewiesen, die Aktivität der Neurone in einer niedrigen Schicht zu verstärken. Offensichtlich sind diese auf die Erkennung geschwungener Kanten spezialisiert.



GÜNTHER NOACK, SOFTWARE INGENIEUR / CC-BY-4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG / LICENSES/ BY/4.0/LEGALCODE); GOOGLERESEARCH.BLOGSPOT.DE/2015/06/INCEPTIONISM-GOING-DEEPER-INTO-NEURAL.HTML

nie auf ein eindeutiges Ergebnis hinauslaufen. Klassifizieren heißt viele Bilder in einen Topf werfen; diese Abbildung ist offensichtlich nicht umkehrbar. Jede Kategorie steht für eine potenziell unendliche Menge von Bildern, die zu ihr passen. Und das Netz kann uns auch nicht ein typisches Beispiel zeigen, denn es hat sich kein einziges Bild wirklich gemerkt. Vielmehr präsentiert es uns eine wolkige und unvollständige Sammlung von Merkmalen, die es für diese spezielle Klassifizierung als nützlich befunden hat. Das sind schwarze und weiße Flecken für den Dalmatiner und rundliche gelbe Bereiche für die Zitrone; viele andere Einzelheiten fehlen oder sind dem menschlichen Auge nicht zugänglich.

Lernen aus Defekten

Vieles über die kognitiven Fähigkeiten des Menschen haben wir aus Fehlfunktionen gelernt: von großen Ausfällen durch Verletzungen oder Erkrankungen bis zu gewöhnlichen Versprechern oder Wahrnehmungstäuschungen. Zwei Forschergruppen haben kürzlich diese Idee auf Convnets angewandt – mit überraschenden Ergebnissen.

Ein Team unter der Leitung von Christian Szegedy, dem Entwickler von GoogLeNet, fand mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens Bilder, die ein neuronales Netz in die Irre führen: In einem Bild, welches das Netz korrekt als Schulbus erkennt, ändert der Algorithmus ein paar Pixel, so wenig, dass das menschliche Auge keinen Unterschied bemerkt; aber das Netz ordnet nun das Bild einer anderen Kategorie zu.

Ein komplementäres Experiment führten Anh Nguyen, Jason Yosinski und Jeff Clune von der University of Wyoming durch. Sie konstruierten Bilder, in denen ein Mensch nur zufälliges Rauschen sieht, das Netz jedoch mit großer Sicherheit einen Gepard oder Tausendfüßler erkennt.

Wer daraufhin Zweifel an der Brauchbarkeit neuronaler Netze überhaupt bekommt, muss sich keine übertriebenen Sorgen machen. Nicht jede zufällige kleine Änderung einiger Pixel führt ein Netz in die Irre – im Gegenteil, es trägt sogar eine reichliche Portion an

zufälligen Störungen. Die heimtückischen Gegenbeispiele sind so extrem selten, dass eine Fehlklassifikation rein durch Zufall praktisch nicht vorkommt.

Gleichwohl ist das Ergebnis bemerkenswert. Mathematiker stellen sich die Menge aller möglichen Bilder gern als einen abstrakten Raum vor. Jedes Bild ist ein Punkt in diesem Raum, und wenn sich zwei von ihnen nur in wenigen Pixeln unterscheiden, liegen die

Die Fantasie eines neuronalen Netzes bringt Waldgeister zum Vorschein.



MICHAEL TYKA ET AL. / GOOGLE INC. / CC-BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BBY4.0/LEGALCODE); GOOGLE RESEARCH BLOGSPOT.BF/2015/06/INCEPTIONISM-GOING-DEEPER-INTO-NEURAL-NETWORKS



MICHAEL TYKA ET AL. / GOOGLE INC. / CC-BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BBY4.0/LEGALCODE); GOOGLE RESEARCH BLOGSPOT.BF/2015/06/INCEPTIONISM-GOING-DEEPER-INTO-NEURAL-NETWORKS



MICHAEL TYKA ET AL. GOOGLE INC. / CC BY-SA. © RESEARCH COMMONS ORCID I D ES BY/OL/15642081/US/AM. NETWORK TRAINED ON PLACEPICTURE MIT COMPUTER SCIENCE AND AI LABORATORY, GOOGLE RESEARCH BIODIDOT/12/05/06/INCEPTIONISM.A CONING DEEPER INTO NEURAL NET.

Punkte nah beieinander. Durch das Training zerlegt das Netz den Raum in Teilgebiete, die zu den verschiedenen Kategorien gehören. Wir wissen jetzt, dass es dort noch unübersichtlicher zugeht, als man bei der Raumdimension von ungefähr einer Million ohnehin annehmen möchte. Denn offensichtlich gibt es so etwas wie »Wurmlöcher«, die zwei eigentlich weit voneinander entfernte Gebiete verbinden.

Inceptionismus – eine neue Kunstrichtung

Im Juni 2015 erregte ein Beitrag im »Google Research Blog« plötzlich Aufmerksamkeit weit über den Kreis der Fachleute hinaus, vor allem wegen der beigefügten Galerie surrealistischer und seltsam attraktiver Bilder (Bild oben). Die neue Kunstrichtung bekam den Namen »Inceptionismus« in Anspielung auf den Sciencefiction-Film »Inception« und dort vor allem auf das Zitat »We need to go deeper«. In einem späteren Blogbeitrag wurde der Begriff »deep dream« eingeführt und hat sich mittlerweile durchgesetzt.

Bei diesem Bild wurde immer wieder das Zwischenprodukt durch einen vergrößerten Ausschnitt seiner selbst ersetzt. Im Effekt bleibt von der Originalvorlage nichts übrig, so dass man das Bild als freie Halluzination ansehen kann.

Der Algorithmus hinter den Tieftraum-Bildern stammt von Alexander Mordvintsev, einem Software-Ingenieur bei Google in Zürich. Den Blogbeitrag verfasste er gemeinsam mit Mike Tyka, einem Biochemiker, Künstler und Software-Spezialisten bei Google in Seattle, und dem Praktikanten Christopher Olah aus Toronto.

Ein Rezept für tiefe Träume lautet folgendermaßen: Nimm ein Bild als Vorlage und wähle eine spezielle Schicht innerhalb des neuronalen Netzes, die »Arbeitsschicht«. Lass den Bilderkennungsprozess von unten nach oben bis zu dieser Schicht ablaufen. Wende dann von der Arbeitsschicht aus abwärts den Backpropagation-Algorithmus an, aber verändere nicht wie sonst üblich die synaptischen Gewichte, sondern die Pixel des gewählten Bilds, und zwar so, dass die Aktivität der Neurone in der Arbeitsschicht ansteigt. Wiederhole die-

ses Wechselspiel aus Bildererkennung (aufwärts) und Bildveränderung (abwärts) mehrere Male. Streue außerdem alle paar Runden etwas Zufall in den Prozess, indem du zum Beispiel die Pixel des Bilds aus denen der unmittelbaren Umgebung neu berechnest.

Im Verlauf des Prozesses erscheinen geisterhafte Strukturen im Bild, zunächst schwach, dann immer deutlicher. Ein schwarzer Fleck wird zu einer Hundeschnauze, eine Kleiderfalte zu einem Spinnennetz, Windmühlen und Leuchttürme sprießen aus dem blauen Himmel. Der Prozess ist selbstverstärkend. Was immer das Netz im Verlauf des Trainings an Bildelementen gesehen hat, es baut sie dort ein, wo sie vielleicht ein bisschen passen. Bei der nächsten Iteration passen sie schon etwas besser, und so weiter.

Bemerkenswerterweise hatten Mordvintsev, Tyka und Olah gar keine künst-

lerischen Absichten im Sinn, als sie ihre Technik erfanden, sondern ein ganz gewöhnliches Bildbearbeitungsproblem: Verluste an Bildschärfe beim Vergrößern auszugleichen. »Wir erwarteten, dass einige fehlende Details hinzukommen würden, wenn wir die Aktivität des Convnets an zufällig gewählten Stellen eines leicht unscharfen Bilds maximieren. Und siehe da, es funktionierte«, schrieben sie mir auf meine Anfrage.

Wenige Wochen nach ihrem Blogbeitrag stellten die drei ihr Programm »Deep Dream« frei verfügbar ins Netz. Als bald begannen viele andere mit dem Algorithmus zu experimentieren, und mittlerweile bieten kommerzielle Websites Einfachversionen für den Amateur an, der nicht in die Tiefen des Programmierens einsteigen will. Binnen kurzer Zeit überschwemmte eine Fülle von Bildern das Internet; suchen Sie nach dem Stichwort »deep dreaming«.

Das Programm selbst umfasst nur ungefähr 100 Zeilen in der Programmiersprache Python, benötigt aber Zusatzsoftware, die zum Teil noch kompiliert werden muss. Wenn alles gut geht, braucht man für die Installation der Software ein paar Stunden. Mir gelang das erst beim dritten Versuch, mit einer jungfräulichen Festplatte.

Freie Halluzinationen

Eigentlich ist »Träumen« nicht das richtige Wort für den Prozess. Ein echter Traum entsteht, wenn das Sehsystem abgeschaltet ist. Aber hier ist es hyperaktiv, und man sollte seine Produkte besser Halluzinationen nennen. In den Bildern erleben wir gewissermaßen den Versuch des neuronalen Netzes, das Gesehene mit Sinn zu verstehen. Das Training hat in ihm Erwartungen etabliert, wie die Bestandteile der Realität zusammengehören, und entsprechend füllt es die Lücken.

Vielen Bildern sieht man an, dass das Netz auf kleinräumige Zusammenhänge mehr Wert legt als auf das große Ganze. Gesichter – von Menschen wie von Tieren – haben Augen, Mund und Nase mitsamt ihrer Umgebung am richtigen Platz, aber häufig sitzt der Kopf auf dem falschen Körper. Außerdem kann das

Netz nicht zählen. Hunde haben häufig mehr als vier Beine oder mehr als einen Kopf. Andererseits stehen alle Beine irgendwie auf dem Boden. Dinge aller Art stehen aufrecht und ruhen auf einer Grundfläche, die das System bei Bedarf sogar zurechtmacht, indem es eine Steilwand uminterpretiert (Bilder S. 87). Manchmal hat ein Bild sogar eine Andeutung von Perspektive: großer Hund vorne, winziges Gebäude am Horizont.

Die wildesten Halluzinationen stammen aus den mittleren Schichten eines Convnets. Aber die Produkte der tieferen Schichten sind nicht nur ansehnlich, sondern erzählen uns auch etwas über Mechanismen der Wahrnehmung. Der visuelle Kortex der Säuger entdeckt in den ersten Verarbeitungsstufen Kanten in verschiedenen Orientierungen, Helligkeits- und Farbverläufe sowie andere einfache Formen mit großem Kontrast wie helle Punkte in dunkler Umgebung. Ganz ähnliche Motive finden sich in den untersten Schichten eines neuronalen Netzes – und niemand hat sie dort einprogrammiert. Vielmehr hat das Netz sie sich beim Training selbst zugelegt.

Vielleicht ist die Deep-Dream-Technik nichts weiter als eine kurzlebige Mode. Bisher ist sie nur als Programm und in Blogbeiträgen veröffentlicht; wissenschaftliche Arbeiten lassen noch auf sich warten.

Dabei wirft die Methode eine Reihe interessanter Fragen auf. Warum etwa dominieren bestimmte Inhalte die Traumbilder? Die Allgegenwart der Hundeköpfe mag durch Besonderheiten der Bilddatenbank ImageNet zu erklären sein, aus der die Trainingsdaten stammen; 120 der 1000 Kategorien sind Hunderassen. Vögel, Spinnen, prachtvolle Gebäude, Laternen und Gartenpavillons kommen ebenfalls häufig vor, und Augen sind überall. Aber wo sind die anderen Haustiere? Alle Trainingsbilder sind aus dem Internet, und das ist angeblich voll von Katzen – so sehr, dass das Programm »Google Brain« sie beim Lernen ohne Lehrer zur zweitwichtigsten Kategorie (nach menschlichen Gesichtern) erklärte (Spektrum der Wissenschaft 9/2014, S. 62).

Ich wüsste auch gern, welche geometrischen Objekte in der Bildvorlage das Netz am ehesten zum Verschönern aufgreift. Dieser Frage wollte ich nachgehen, indem ich ihm einfache Strukturen vorlegte, zum Beispiel Kiesel am Strand. Aber dabei kommt nicht viel heraus. Der neueste Schrei ist »geführtes Träumen« (»guided dreaming«): Das Netz bereichert ein Bild nach den Vorgaben eines anderen Bilds.

Vergessen wir nicht: Eigentlich sollte die zugehörige Software nicht verrückte Bilder erzeugen, sondern gewöhnliche erkennen und klassifizieren. Und das macht sie recht gut. Die zweiköpfigen Hunde und die Spinnen im blauen Himmel gehören offensichtlich quasi als Nebenprodukte zu dieser Arbeit dazu. Es fragt sich nur, warum. ~

DER AUTOR



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

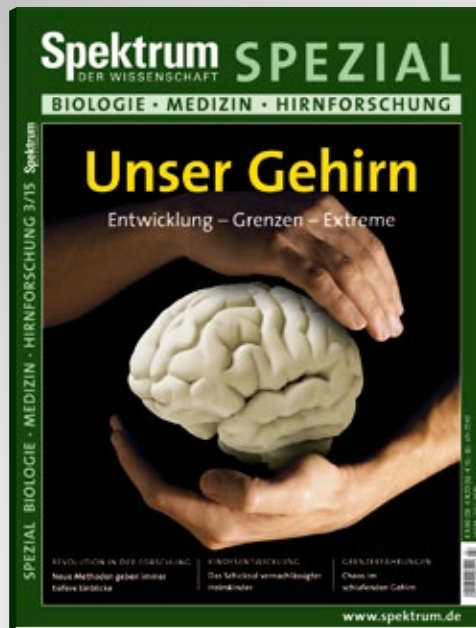
QUELLEN

- Mahendran, A., Vedaldi, A.:** Understanding Deep Image Representations by Inverting them. 2014. <http://arxiv.org/abs/1412.0035>
- Mordvintsev, A. et al.:** Inceptionism: Going Deeper into Neural Networks. <http://googlesearch.blogspot.de/2015/06/inceptionism-going-deeper-into-neural.html>
- Nguyen, A. et al.:** Deep Neural Networks are Easily Fooled: High Confidence Predictions for Unrecognizable Images. In: Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR, 15). IEEE, 2015
- Szegedy, C. et al.:** Intriguing Properties of Neural Networks. 2013. <http://arxiv.org/abs/1312.6199>
- Yosinski, J. et al.:** Understanding Neural Networks through Deep Visualization. In: 31st International Conference on Machine Learning, 2015. www.evolvingai.org/files/2015_Yosinski_ICML.pdf

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1372769

© American Scientist

Unsere Neuerscheinungen



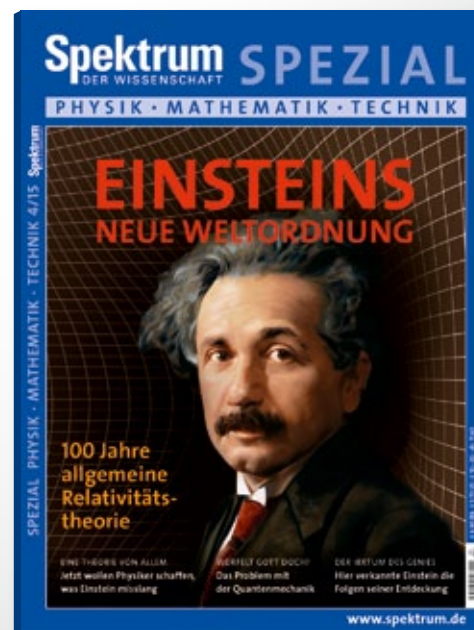
Die Sprache des Gehirns • Im Kopf herrscht niemals Ruhe • Hirnstimulation: Unter Strom • Die genetische Kartierung des menschlichen Gehirns • € 8,90



Faktor Zeit: Planung, Selbstkontrolle und Ungeduld • Kooperation: Zwischen Eigennutz und Gemeinnutz • Erbfaktoren: Entscheiden die Gene? • € 8,90



100 Jahre und quicklebendig • Urknall oder nicht? • Inflation – der Auftakt zum Urknall • Ein Pulsar-Schwerkgewicht bestätigt Einstein • Nobelpreis für die Dunkle Energie • € 8,90



100 Jahre Raumzeit: Der Glanz des Genies • Quantenphysik: Kosmische Würfelspiele • Als die Nazis Einstein zum Feind erklärten • Auf der Suche nach der Theorie von Allem • € 8,90

Alle Hefte auch im Handel erhältlich!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!



1915

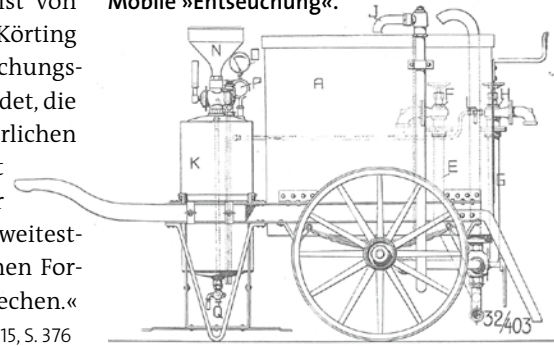
Kuriose Reinigung

»Für die Reinigung und Entseuchung von Viehwagen, Ställen, Rampen und derglei-

chen sind eine ganze Reihe verschiedener Vorrichtungen nötig, zu deren Durchführung viel Personal, ausgedehnte Entseuchungsanlagen und mehrere Apparate bisher erforderlich waren. Um die Kosten möglichst herabzumindern sowie die Reinigung und Entseuchung der Wagen zu vereinfachen

und zu verbilligen, ist von der Firma Gebr. Körting die fahrbare Entseuchungsmaschine durchgebildet, die in sich alle erforderlichen Apparate vereinigt und es in einfachster Weise ermöglicht, weitestgehenden hygienischen Forderungen zu entsprechen.«
Die Welt der Technik 24, 1915, S. 376

Mobile »Entseuchung«.



Wälder aus Stein

»Versteinerte Wälder in Deutsch-Südwestafrika kommen in den Bezirken Gibeon und Keetmanshoop vor. An einer Stelle finden sich Baumstämme bis zu 15 m Länge. Die Stämme liegen z.T. in rotem Sandstein eingebettet und sind von ihm derart umschlossen, daß man unwillkürlich denkt, der Sandstein müsse eine weiche Masse gewesen sein, als er sich um die Stämme legte. An Wahrscheinlichkeit gewinnt diese Annahme durch einen in der Nähe gefundenen riesigen Muschelkern von etwa ½ m Länge. Die Kalkschale der eigentlichen Muschel fehlt, sie ist wohl verwittert. Während das versteinerte Holz hier grau ist, kenne ich eine Stelle, wo das Holz eine Gelbfärbung von Gelblichweiß bis Zitronengelb aufweist.«
Kosmos 12, 1915, S. 420/421

Unter der Weste was Neues

»Das Geräusch von Propeller und Motor macht die Verständigung im Flugzeug sehr schwierig. Man hat versucht durch Mikrophone den Schall zu verstärken, ohne damit Erfolge zu erzielen, weil mit der Stimme des Sprechenden zugleich Nebengeräusche verstärkt werden. In Amerika soll jetzt ein »Aerophon« erprobt worden sein. Während bisher der Sprechende das Mikrophon vor den Mund halten mußte, wird nach der neuen Erfindung das Mikrophon über der Brust getragen. Es sollen nicht mehr die Schallwellen, sondern die Resonanz des Brustkastens auf das Mikrophon einwirken; da das Mikrophon zudem noch von der Weste bedeckt wird, können äußere Geräusche sich wenig bemerkbar machen.«
Prometheus 1362, 1915, S. 159

Käse aus dem Moor

»In dem oberbayrischen Moor-Kurort Holzhausen wird neuerdings der zur Herstellung von Camembert verwendeten Milch Moor-Schwebestoff zugesetzt, dessen heilkräftige Wirkung be-

reits durch Bäder- und Trinkkuren erprobt ist. Der Käse reift etwas langsamer und hat eine graubraune Färbung, unterscheidet sich jedoch im Geschmack nicht von dem normalen Produkt. Bei den Patienten erfreut

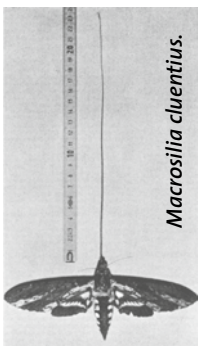
sich dieser Moor-Käse grosser Beliebtheit und gilt als besonders bekömmlich. Ob er in grossem Masstab hergestellt und vertrieben werden darf, hängt noch von einem Gutachten ab, das die Bundesversuchsanstalt für

1965

Milchwirtschaft in Kiel erstatten wird.«
Neuheiten und Erfindungen 355, 1965, S. 226

23 Zentimeter Rüssellänge

»Im Juliheft des »Kosmos« erwähnt H. Eisenbeiss den Langrüsselschwärmer *Macrosilia morgani preadicta* aus Madagaskar als Beispiel für eine extreme Anpassung der Rüssellänge an die Blütenpornlänge der Wirtspflanze. Hier in Brasilien lebt ein naher Verwandter dieser Art; *Macrosilia cluentius*. Das Bild zeigt ein Exemplar, das von mir präpariert wurde. Der Rüssel ist gut 23 cm lang, und die Spannweite beträgt 18 cm. Im Gegensatz zu der madagassischen Art besucht dieses Tier die großen Blüten der Stechapfelarten *Datura suaveolens* und *D. stramonium*. Dr. Hans Löwenthal, Brasilien.«
Kosmos 12, 1965, S. 536



Möwen unerwünscht

»Als man in Oriental Bay, Wellington, neue Straßenlaternen aufstellte, wurden sie von den Möwen sofort als Schlafplätze gewählt. Das führte zu Verschmutzungen, man befürchtete auch, daß die Lichtausbeute vermindert und die Metallteile angegriffen würden. Vogelleim und ähnliche Abschreckungsmittel haben verschiedene Nachteile. Deshalb habe ich eine andere Methode erfunden. Sie besteht darin, daß man parallel zu den zu schützenden Flächen kurze Drahtstücke befestigt. Da Möwen sehr gut sehen, kann die Verwendung von Drähten mit farbigen Kunststoffüberzügen sowohl wegen der Sichtbarkeit als auch wegen der besseren Rostbeständigkeit von Vorteil sein. Ein Versuch hatte vollen Erfolg: Die Straßenbeleuchtungen blieben sauber.«
Die Umschau 24, 1965, S. 784



Luc Jacquet

Zwischen Himmel und Eis

Dokumentation, Frankreich 2015

Lauflänge 89 Minuten

Ab 26.11. 2015 in deutschen Kinos

ERDE UND UMWELT

Klimawandel in beeindruckenden Bildern

Ein Dokumentarfilm über das Leben des Antarktischforschers Claude Lorius.

Der französische Regisseur Luc Jacquet («Die Reise der Pinguine») und sein Landsmann Claude Lorius, Glaziologe und emeritierter Präsident des Centre national de la recherche scientifique (CNRS), teilen eine Leidenschaft für einen ganz besonderen Ort: die Antarktis. Beide kamen mit Anfang 20 zum ersten Mal auf den weißen Kontinent, und beide sollten dort mehr als ein Jahr lang bleiben – wenn auch in unterschiedlicher Mission und mit einem zeitlichen Abstand von 35 Jahren. Seither sind sie mehrfach dorthin zurückgekehrt, und es eint sie die Angst, große Teile dieser einzigartigen Eiswelt könnten der globalen Erwärmung nicht standhalten.

Jacquets Dokumentarfilm »Zwischen Himmel und Eis«, der kurz vor der Pariser UN-Klimakonferenz in den deutschen Kinos anläuft, warnt zum einen vor dem anthropogenen Klimawandel. Zum anderen ist er das Testament des 83-jährigen Lorius, dessen Lebensgeschichte anhand reichhaltigen Archivmaterials aus der Ich-Perspektive erzählt wird.

Der Regisseur nimmt den Zuschauer mit auf eine Zeitreise ins Jahr 1956. Lorius, damals Student an der Universität seiner Heimatstadt Besançon, bewirbt sich um die Teilnahme an einer Expedition in die Antarktis. Zunächst von Abenteuerlust getrieben, macht er sich

zusammen mit zwei anderen auf den Weg zur winzigen Forschungsstation Charcot. Die Reise dauert mehrere Monate, und nahe am Zielort ist es dermaßen kalt, dass es bereits einem Abenteuer gleichkommt, sich draußen zu erleichtern. Ein Jahr lang harren die drei auf der Station aus. Sie sammeln unter anderem Daten, aus denen sich die Wanderbewegungen der Eisschilde berechnen lassen. Lorius ist fasziniert davon, wie viel Information bereits in der individuellen Form der Kristalle steckt, die er unter dem Mikroskop inspiziert. Selbst wenn der Abenteurer in ihm niemals sterben wird – von diesem Moment an ist er vor allem Wissenschaftler. Er ahnt, dass tief im Eis noch weitere Geheimnisse verborgen sind. Die Suche danach treibt ihn in den folgenden 28 Jahren dazu, noch 21 weitere Male in die Polregionen aufzubrechen.

Seine wohl wichtigste wissenschaftliche Erkenntnis kommt Lorius bei einem abendlichen Whiskey, den er mit Polareis genießt. Als das Eis schmilzt, steigen Gasblasen auf – Überbleibsel aus der Zeit, in der es einst gefror. Je tiefer die Eisschicht, umso älter müsse die darin eingeschlossene Luft sein, folgert der Forscher. Gelänge es, diese mit modernen Messinstrumenten zu untersuchen, könne man vielleicht die Zusammensetzung der Atmosphäre in vergangenen Zeiten bestimmen. Daraus wiederum ließe sich das damalige Klima rekonstruieren.

Mitten in der aufgeheizten politischen Stimmung der 1970er Jahre bricht der französische Glaziologe zur russischen Forschungsstation Wostok auf, unweit des geografischen Südpols. Unter widrigsten Bedingungen birgt das Team, dem neben dem Franzosen auch amerikanische und russische Kollegen angehören, Bohrkerne aus bis zu 3000 Meter Tiefe. Bei 50 Grad unter dem Gefrierpunkt sortieren die Wissenschaftler ihre Proben. Die Mühe lohnt sich, denn die im Eis eingeschlossene Luft erlaubt Einblicke in 420 000 Jahre Klimageschichte.

Die Ergebnisse dieser Analysen stehen heute in jedem Lehrbuch. In der Summe ergeben sie das Bild von vier verblüffend ähnlichen Zyklen von Eis-



Ein Wal taucht im Eiswasser ab.

zeiten und Interglazialen, innerhalb derer die Durchschnittstemperatur jeweils um fünf Grad schwankte. Über den gesamten Zeitraum hinweg wurden die Temperaturschwankungen offenkundig von Veränderungen der atmosphärischen CO₂-Konzentration begleitet. In den zurückliegenden Jahrzehnten allerdings geriet dieser regelmäßige Zyklus aus der Bahn: Der CO₂-Gehalt stieg exponentiell an, weit über den Rekordwert der vorangegangenen 400 000 Jahre hinaus. Der anthropogen bedingte Klimawandel, dessen Existenz bis dahin nur wenige Wissenschaftler postuliert hatten, war wissenschaftlich bewiesen.

Eigentlich könnte Lorius, der führende Kopf hinter dieser gewaltigen Erkenntnis, als einer der erfolgreichsten

Wissenschaftler seiner Zeit stolz auf sein Lebenswerk zurückblicken, für das er in den zurückliegenden Jahren mit Auszeichnungen überhäuft wurde. Im Film allerdings erscheint er immer wieder mit betrübter Mine und fast bis zur Hüfte im Wasser stehend – an Orten, wo die Auswirkungen des Klimawandels bereits deutlich erkennbar sind. Mittlerweile finde er zwar in der internationalen Politik zunehmend Gehör, sagt Lorius. Aber er beklagt, dass den zustimmenden Worten der Politiker keine Taten folgten. Daher beschleiche ihn das Gefühl, nichts erreicht zu haben. Allerdings gebe er die Hoffnung nicht vollkommen auf, denn »im Angesicht des Wesentlichen wächst der Mensch über sich hinaus«.

Ob Luc Jacquet mit seinem neuen Film diese Wirkung erzielt, darf man bezweifeln. Dass der Mensch dringend die von ihm verursachten Treibhausgasemissionen reduzieren sollte, ist inzwischen keine neue Erkenntnis mehr. Zudem setzt der Regisseur mit bildgewaltigen Aufnahmen und anrührender Musik eher auf Emotionen als auf Fakten. Trotzdem ist ihm ein beeindruckendes Doppelporträt gelungen: von einem Wissenschaftler mit Leib und Seele – und von einer einzigartigen Umwelt, die es in dieser Form wahrscheinlich nicht mehr lange geben wird.

Maren Emmerich

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Stuttgart.



Rudolf Taschner

Die Mathematik des Daseins

Eine kurze Geschichte der Spieltheorie

Hanser, München 2015

256 S., € 21,90

MATHEMATIK

Streiflichter auf die Spieltheorie

Der Mathematiker Rudolf Taschner erzählt anekdotenreich über eine spannende Disziplin – löst aber nicht alle Versprechen ein.

Rudolf Taschner ist Professor für Mathematik an der Technischen Universität Wien und war Österreichs Wissenschaftler des Jahres 2004. Er hat sich zudem als umtriebiger Buchautor einen Namen gemacht. »Spektrum der Wissenschaft« hat viele seiner Werke rezensiert, zuletzt »Die Zahl, die aus der Kälte kam« (2013). Nun legt er einen neuen Band vor. Der Einschlag wirbt mit den Worten »Sein Buch liest sich wie ein Thriller«, und beim flüchtigen Betrachten bemerkt man vielleicht gar nicht, dass diese »Spiegel«-Kritik sich auf das Vorgängerbuch bezog. Nichtsdestoweniger ist auch das aktuelle

Werk flüssig geschrieben und versucht immer wieder, die Neugier der Leser zu entfachen. Der Autor arbeitet viel mit Dialogen zwischen den handelnden Personen, die dem Leser den Eindruck vermitteln, Zeuge historischer Unterhaltungen zu sein. Allerdings sind diese Gespräche zum großen Teil erfunden und werden als Stilmittel zu oft eingesetzt, ebenso wie mehrere erfundene »Zitate«.

Das Buch untergliedert sich in 17 Geschichten, deren Überschriften alle gleich beginnen: »Spielen mit Wasser und Diamanten«, »Spielen mit der Kreide«, »Spielen mit den Zahlen« und so

weiter. Das erscheint plausibel, da man zunächst davon ausgeht, dass sich das Werk mit der Theorie von Spielen befasst; dennoch wirkt es in der häufigen Wiederholung ermüdend. Am Ende des Werks folgen – nach Dankesworten und einem achtseitigen Glossar – noch »Zahlenspiele«, zehn Aufgaben, anhand derer die Leser überprüfen können, ob sie die vorher vermittelten mathematischen Strategien verstanden haben und auch in leicht veränderten Situationen anwenden können. Der Buchtitel »Die Mathematik des Daseins« bezieht sich auf die letzte der Geschichten, »Spielen mit dem Dasein«, und beschäftigt sich mit der berühmten pascalschen Wette, wonach der Erwartungswert des Gewinns, der durch Glaube an Gott erreicht werden kann, stets größer ist als der Erwartungswert durch Unglaube.

Als Zwischenfazit nach den ersten drei Kapiteln stellt man fest, nicht besonders viel über Spieltheorie erfahren zu haben. Vielmehr vermittelt das Werk Details über die handelnden Personen und die Zeit, in der sie lebten – und vor allem darüber, welchen Zeitgenossen sie begegnet sind. Man liest etwa, dass es laut dem österreichischen Ökonomen Carl Menger (1840–1925) bei der Preisbildung auf den Grenznutzen einer Ware ankommt, und erfährt, wie

dessen Sohn Karl zur Mathematik kam. Auch lernt man das Spiel »Zahlensack« des Bachet de Méziriac (1581–1638) kennen, bei dem der Spielgegner keine Chance hat, zu gewinnen; der Autor bezeichnet es deshalb als Falschspiel.

Auffällig ist, wie viele Wiener in dem Buch vorkommen. So treten neben dem Philosophen Ludwig Wittgenstein (1891–1951) und dem Musiker Wolfgang Amadeus Mozart (1756–1791) etliche Angehörige des Wiener Kreises auf – was insofern verwundert, als Letztere nichts mit Spieltheorie zu tun hatten. Nichtwiener wiederum, die sich mit dem Thema »Spielen« auseinandergesetzt haben, fehlen, etwa Friedrich Schiller (1759–1805). Dadurch bekommt das Werk einen Beigeschmack von Lokalpatriotismus.

Es wäre überzogen, Taschners Buch als Enttäuschung zu bezeichnen, auch wenn man als Mathematiker mehr erwartet. Es ist jedoch, im Widerspruch

zum Untertitel, weniger eine Geschichte der Spieltheorie als eine Sammlung von Mosaiksteinchen, die für Leser ohne Vorkenntnisse ein Bild davon vermittelt, womit sich Spieltheorie beschäftigt. Dazu gehören mehr oder weniger bekannte Szenarien, die mit Glücksspielen zu tun haben, etwa das Teilungsproblem (»problème des partis«), das am Anfang der Geschichte der Wahrscheinlichkeitsrechnung stand, oder das Sankt-Petersburg-Paradoxon. Natürlich darf in einem Buch, in dem Wahrscheinlichkeiten und Erwartungswerte vorkommen, auch das Ziegenproblem (Monty-Hall-Dilemma) nicht fehlen.

Spannend und für Unterrichtszwecke hervorragend verwendbar sind Taschners Analysen spieltheoretischer Probleme, etwa des Gefangenendilemmas, des Chicken Game oder des Conan Doyles Final Game (Sherlock Holmes gegen Professor James Moriarty). Auch hat er gut nachvollziehbar herausge-

arbeitet, welche Beiträge verschiedene Personen geleistet haben, die für die Entwicklung der Spieltheorie bedeutsam waren. Unter anderem geht der Autor auf John von Neumanns Min-Max-Theorem, auf John Nashs Gleichgewicht und auf Anatol Rapaports Tit-for-Tat-Strategie ein.

Taschner hat eine große Begabung, Geschichten zu erzählen, und diese lebt er auch im vorliegenden Buch wieder aus. Wer »lediglich« geistreich unterhalten werden möchte, kann an dem Werk seine Freude haben. Wer sich jedoch am Untertitel orientiert und die Erwartung hegt, eine systematische Einführung in die Geschichte der Spieltheorie zu bekommen, dürfte nach der Lektüre eher unzufrieden sein.

Heinz Klaus Strick

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.



Tim Birkhead

Die Sinne der Vögel

oder Wie es ist, ein Vogel zu sein

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2015

210 S., € 24,99

PHYSIOLOGIE

Aus der Vogelperspektive

Die faszinierenden Sinne von Adler, Kiwi und Co.

Der britische Ornithologe Tim Birkhead erklärt in diesem spannend geschriebenen Sachbuch, warum es sinnvoll ist, Dinge nicht nur aus der Vogelperspektive zu sehen, sondern ebenso zu hören, zu schmecken oder zu riechen. Als Professor für Verhaltensforschung und Wissenschaftsgeschichte an der renommierten University of Sheffield (England) schreibt er über ein Thema, dem er sich erkennbar ein Leben lang intensiv und mit Herzblut ge-

widmet hat. Das Werk ist nicht nur für Vogelenthusiasten lesenswert, sondern spricht mit seiner unterhaltsamen Art auch interessierte Laien an.

Birkhead zeichnet wichtige biologische Erkenntnisse nach und überzeugt dabei als Experte für die Sinne der Vögel. Pointiert und mit Anekdoten unterfüttert, schildert er sowohl seine eigenen Forschungen als auch die von Kollegen. Wissenschaftler wie er versuchen, die rätselhaften Phänomene der Vogel-

welt aufzuklären. Das gleicht oft einer packenden Detektivgeschichte – etwa bei Untersuchungen zur visuellen Wahrnehmung. Lange verblüffte es Forscher, dass viele Vögel ein so unfassbar gutes Sehvermögen besitzen, obwohl sie verglichen mit Menschen eher kleine Augen haben. Laut Birkhead kann beispielsweise der Buntfalke ein zwei Millimeter großes Insekt aus 18 Meter Entfernung erkennen, während wir bereits aus vier Meter Distanz damit Schwierigkeiten haben. Die Erforschung dieses Rätsels führte zu der Erkenntnis, dass nicht nur die Augengröße das Sehvermögen bestimmt: Ebenso wichtig ist der anatomische Bau. Die Augen vieler Vögel sind länglich geformt und funktionieren damit ähnlich wie Fernrohre. Zudem weist die Netzhaut mancher Greifvögel eine fünfmal so hohe Zapfendichte auf wie die des Menschen, liefert also ein viel höher aufgelöstes Bild.

Das Buch besticht nicht nur mit etabliertem Wissen, sondern auch, indem es auf Gebiete eingeht, in denen die moderne Wissenschaft noch Erkenntnislücken hat. Eines davon ist der

Lernpaket Stirlingmotor selbst bauen

☎ (9-3597-4) statt 99,- nur 79,-

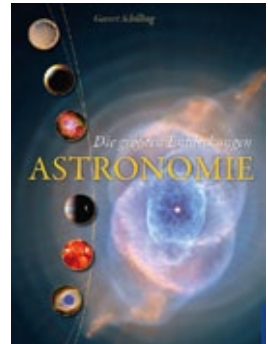
Entdecken Sie mit diesem Bausatz die faszinierende Welt der Stirlingmotoren, die ohne innere Verbrennung angetrieben werden. Das Arbeitsmedium ist Luft oder ein anderes Gas. Damit kann der Stirlingmotor die unterschiedlichsten Wärmequellen für seinen Antrieb nutzen – insbesondere auch regenerative Energien. Dieser zukunftsweisende Antrieb bietet viele technische Besonderheiten und spannende Ansätze. Bauen Sie mithilfe dieses Pakets einen voll funktionsfähigen Niedertemperatur-Stirlingmotor. Viele Elektronikbauteile ermöglichen zahlreiche Experimente und erleichtern Ihren Einstieg in die Welt der Stirlingmotoren. Im Begleitbuch finden Sie alle physikalischen Grundlagen und die unterschiedlichen Typen der Stirlingtechnik anschaulich erläutert. Inhalt: Bausatz Stirlingmotor + Experimentierboard + über 20 Bauteile (IC, Trimmer, Widerstand, Kondensatoren, Steckboard, Sensoren, LED...) + Handbuch. Wichtige Funktionsteile bestehen aus transparentem Glas bzw. Plexiglas und erlauben dadurch einen direkten Blick auf die Funktionsabläufe. Als technische Besonderheiten besitzt dieses Modell eine magnetische Kopplung.



Govert Schilling: Astronomie – Die größten Entdeckungen

☎ (9-4621-7)
statt 49.90
nur 14.99

Dieser Bildband präsentiert die 100 wichtigsten Entdeckungen der Astronomie. Die einzigartige Kombination historischer Tatsachen und aktueller Forschungsergebnisse lässt die Geschichte der Sternkunde Revue passieren. Und damit auch die Geschichte der Menschheit: Immer wieder erschütterten neue Erkenntnisse über das Universum unser Weltbild. Ein faszinierendes Zeitdokument des menschlichen Forscherdrangs. (R) 240 Seiten, 200 Fotos, 27 x 33 cm, gebunden.



Bausatz UKW-Radio selber bauen

☎ (9-4733-1) statt 29.95 nur 16.99

Radio hören kann jeder – Sie können jetzt etwas viel Spannenderes, nämlich Ihr eigenes Radio konstruieren. Mit diesem Paket geht es ganz leicht und macht dabei jede Menge Spaß. Alle erforderlichen Komponenten sind enthalten: Gehäuse, Lautsprecher, Steckplatine, SMD-bestückte Empfangsplatine mit integriertem UKW-Empfänger TDA7088, Lautsprecherverstärker, Potis und vieles mehr. Hochwertige Bauteile sorgen für klaren UKW-Empfang und

gute Lautstärke. Mehrere Schaltungsvarianten werden dazu vorgestellt und erklärt. Abmessungen des zusammengebauten Radios: 190 x 135 x 26 mm (B x H x T) Zusätzlich erforderlich: eine 9-V-Blockbatterie, ausreichend für bis zu 50 Stunden Musikgenuss.

Heinrich Hemme: Das große Buch der mathematischen Rätsel

☎ (9-3328-9)
statt Originalausgabe
24.80 jetzt als
Sonderausgabe
nur 7.95

Das Buch bietet 200 spannende Knocheleien mit überraschenden Lösungen. (SA) 288 Seiten, Format 13 x 20 cm, gebunden.



Der Bestseller aus dem Jahr 1910!

Arthur Brehmer: Die Welt in 100 Jahren

☎ (9-3806-6) statt Originalausgabe 19.80
jetzt als Sonderausgabe nur 9.95

In den Jahren 1909 und 1910 entstand dieses reich illustrierte Buch über eine damals ferne Zukunft, das, anders als die literarischen Visionen jener Zeit, von Experten verschiedener Bereiche geschrieben und möglichst sachliche Prognosen versammelte. Dem einflussreichen Journalisten Arthur Brehmer (1858 - 1923) gelang es, prominente Autoren zu gewinnen, sich Gedanken über die Zukunft zu machen. Ernst Lübbert (1879 - 1915) schuf die kongenialen Illustrationen. Mit ihren Zukunftsprognosen haben die Experten von 1910 auch einige Treffer gelandet – eine spannende und erhellende Lektüre. Reprint von 1910, mit ergänzendem Vorwort von Georg Ruppelt. (SA) 319 Seiten, zahlr. s/w-Illustrationen, Format 17 x 24 cm, gebunden.



Mit ihren Zukunftsprognosen haben die Experten von 1910 auch einige Treffer gelandet – eine spannende und erhellende Lektüre. Reprint von 1910, mit ergänzendem Vorwort von Georg Ruppelt. (SA) 319 Seiten, zahlr. s/w-Illustrationen, Format 17 x 24 cm, gebunden.



Ernst Peter Fischer: Das große Buch der Elektrizität

☎ (9-2612-5) statt 39.95 nur 19.95

Was wäre unsere Welt ohne Strom? Arbeit, Licht, Mobilität, Kommunikation - nicht nur die moderne Gesellschaft weltweit, sondern jeder Einzelne von uns ist abhängig von der Elektrizität. Wir leben im elektronischen Zeitalter. Unsere Welt steht unter Strom. Der Wissenschaftshistoriker und Bestsellerautor Ernst Peter Fischer erzählt verständlich und unterhaltsam die Geschichte der Elektrizität. Klangvolle Namen wie



Alessandro Volta, Michael Faraday, Thomas Alva Edison, Werner von Siemens und Heinrich Hertz erinnern an erste Versuche mit teils skurrilen Apparaturen und an bahnbrechende technische Entwicklungen, die unser heutiges Leben prägen. Infokästen, mehr als 400 Bilder und Grafiken machen dieses Buch zu einer lehrreichen wie kurzweiligen Lektüre und vermitteln die Grundlagen zum Verständnis der aktuellen Debatten über Energiewirtschaft und die Technologien der Zukunft. (R) 400 Seiten, zahlr. Abb., 26 x 24 cm, geb. (Fackelträger)



bei Mail:Order:Kaiser

Postfach 80791 München

Tel. 0180 5 34 17 34*

Fax 0180 5 33 33 23*

info@science-shop.de

Name, Vorname

Straße

PLZ/Ort

Datum / Unterschrift

SciA1513

Stück ☎ Bestellnummer/Titel

Lieferung bequem per Rechnung (Bonität vorausgesetzt)

Versandkostenanteil: 4.99 € (in Deutschland)

Alle Preise in Euro inkl. MwSt. und zzgl. Versandkosten

Volles Rückgaberecht für 14 Tage

schwer fassbare Magnetsinn, der weiterhin intensiv erforscht wird. Studien zufolge können Rotkehlchen das Erdmagnetfeld nicht nur wahrnehmen, sondern es regelrecht sehen. Und dass Trottelummen gute Nachbarn sind und monogam lebende Zebrafinken möglicherweise so etwas wie Liebe empfinden, sind ebenso erstaunliche Einsichten. Hier kommt der Autor seinem im Untertitel gegebenen Versprechen schon ziemlich nahe.

Doch natürlich weiß auch Birkhead nicht wirklich, wie es sich anfühlt, ein Vogel zu sein. Was erlebt ein Falke, der mit mehreren hundert Kilometern pro Stunde auf seine Beute herabstößt? Wie empfindet ein Kiwi, der seine Umwelt praktisch nur mit Hilfe des Geruchs- und Tastsinns per Schnabelspitze wahrnimmt? Antworten darauf kann man als Mensch nicht geben. Der Autor macht denn auch klar, dass er sich den Vögeln aus biologischer und nicht phi-

losophischer Perspektive nähert. Dies gelingt ihm durchweg gut. Ein nützliches Glossar, umfangreiche Anmerkungen nebst Literatur- und Stichwortverzeichnis sowie die detailgetreuen Zeichnungen der Künstlerin und Vogelkuratorin Katrina van Grouw runden das lesenswerte Buch ab.

Arne Baudach

Der Rezensent ist Doktorand der Biologie in Gießen.



Die Geheimnisse der Quantenphysik – Welle oder Teilchen?

Komplett-Media, Grünwald 2015

DVD, 2 Filme zu jeweils zirka 60 Minuten

€ 29,99

PHYSIK

Der Albtraum, der wahr wurde

Eine neue DVD verdeutlicht: Die Quantenphysik ist so seltsam wie von Physikern befürchtet.

Eine mittelalterliche Burg mit meterdicken Wänden aus Stein. Was passiert, wenn man die Mauern mit Bällen bewirft? Sie prallen ab. Was in der klassischen Welt normal erscheint, gilt in der Quantenwelt der subatomaren Teilchen nicht mehr. Dort tunneln Teilchen durch Potenzialwälle hindurch, die sie auf klassische Weise nicht überwinden können. Der Film »Einsteins Albtraum«, der erste auf der vorliegenden DVD, verdeutlicht das mit Bildern von riesigen roten Medizinbällen, die »spukhaft« durch Burgmauern hindurchschweben. Damit entführt er seine Zuschauer in die geheimnisvolle Welt der Quantenphysik. Als Sprecher tritt der Physiker Jim Al-Khalili von der University of Surrey (England) in Erscheinung.

Der Filmtitel spielt darauf an, dass die Quantenphysik Albert Einstein (1879–1955) lebenslang Sorgen bereitete. Einer ihrer vielen seltsamen Effekte

widersprach seiner klassisch geprägten Intuition besonders stark: die Verschränkung. Zwei Teilchen können verbunden sein, so dass sie einen gemeinsamen Quantenzustand ergeben. Sobald man Messungen an einem der Teilchen vornimmt, steht das entsprechende Messergebnis für das zweite schlagartig fest – egal, wie groß ihr Abstand ist. Und dies geht nicht auf verborgene Eigenschaften der Teilchen zurück, wie Einstein vermutete.

Al-Khalili illustriert dies an einem Paar Handschuhe. Er legt sie einzeln in separate Schachteln. Wenn nun jemand in einem Karton den rechten Handschuh findet, weiß er sofort, dass in dem anderen der linke sein muss. So weit, so verständlich – doch hier hört die Analogie auch schon auf. Denn die Quantenphysik ist um einiges befremdlicher: Was man aus der Schachtel zieht, entscheidet sich erst, wenn

man sie öffnet – per Zufall. Trotzdem findet man in der anderen Schachtel stets das Gegenstück. Und das im selben Moment, also schneller, als sich das Licht ausbreiten kann.

Die Quantenverschränkung ist wohl das am widersinnigsten erscheinende Phänomen der Physik. Al-Khalili bringt es den Zuschauern mit gelungenen Vergleichen und aufschlussreichen Experimenten näher. Natürlich kann er es nicht intuitiv begreifbar machen. Unser Vorstellungsvermögen ist darauf ausgelegt, klassisch-physikalische Erscheinungen zu verarbeiten; bei Quanteneffekten versagt es.

Der Chronologie folgend, führt Al-Khalili über den Photoeffekt ins Thema ein. Den Welle-Teilchen-Dualismus erklärt er mit dem Doppelspaltexperiment. Sodann schreitet der Film über die Quantenverschränkung zur bellischen Ungleichung fort und schließlich zu den Experimenten, die diese überprüfen – mit dem Ergebnis, dass Einsteins Albtraum Realität ist.

Der Film ist absolut sehenswert, was vor allem an den klugen Analogien liegt, die der Physiker benutzt. Ein schönes Beispiel ist seine Wurfbude, an der er versucht, mit roten, energiearmen Tischtennisbällen oder mit blauen, energiereichen Golfbällen die Dosen umzuwerfen. Dabei erklärt er sehr geschickt den Photoeffekt. An anderer Stelle spielt er Karten gegen einen Dämon – und verliert immer, selbst wenn er die Regeln des Spiels noch ändern darf. Denn der Dämon spielt so, wie sich ein verschränktes Quantensystem ver-

hält: Seine Karten wissen auf spukhafte Weise immer schon, was Al-Khalili zieht.

Es haben sich aber auch kleine Fehler in den Film eingeschlichen. So wird der Begriff »Ultraviolett katastrophe« unsauber verwendet. Er bezeichnet eigentlich das Phänomen, dass die Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers, beschrieben mit der klassischen Strahlungsformel, bei kleinen Wellenlängen viel zu groß wird, so dass die Gesamtstrahlung gegen unendlich strebt. Al-Khalili hingegen benutzt ihn als Bezeichnung dafür, dass es schwierig ist, energiereiche Photonen zu erzeugen. An anderer Stelle behauptet er, der Schatten seiner Hand im Sonnenlicht sei unscharf wegen der Welleneigenschaften des Lichts. Tatsächlich ist der Grund viel simpler: Die Sonne ist keine punktförmige Lichtquelle. Mitunter wirkt auch die Übersetzung nicht sehr glücklich – es wäre besser, Einsteinitate direkt zu verwenden, statt sie aus dem Englischen zurückzuübertragen.

Der zweite Film auf der DVD, »Es werde Leben«, beschäftigt sich mit Quantenbiologie. Zentraler Gegenstand dieser modernen Disziplin sind biochemische Reaktionen, bei denen Quanteneffekte eine wichtige Rolle spielen. Dazu gehören der Magnetsinn mancher Tiere, die Fotosynthese, die Atmungskette oder genetische Mutationen. Unlängst ist auf dem deutschen Markt auch ein Buch hierüber erschienen, an dem Al-Khalili mitgewirkt hat.

Die zweite DVD-Episode ist sehr aktuell und wartet mit interessanten, lehrreichen Beispielen auf. Wussten Sie beispielsweise, dass die gängigen Lehrbuchklärungen, wie das Riechen funktioniert, nicht ausreichen, um das Phänomen zu verstehen? Das übliche Schlüssel-Schloss-Modell versagt an einem bestimmten Punkt, und dort kommt man nur weiter, wenn man Quantenschwingungen der Elektronen berücksichtigt. Obgleich dieses Gebiet hoch spannend ist, schafft es der Physi-

ker nicht, eine durchgängige Geschichte darüber zu präsentieren. Stattdessen liefert er mit seinen Ausführungen über Rotkehlchen, Tauflieden und Frösche nur einzelne Beispiele. Vermutlich ist die Forschungsrichtung einfach noch zu jung, um kohärente Erzählstränge darauf zu stützen.

Etwas eigenartig wirkt Al-Khalilis Perspektive auf die neu entdeckten Quanteneffekte in der Biologie. Oft hören sich seine Erklärungen so an, als folge »die Natur« einer geheimen Intelligenz und bediene sich der Quantenphänomene in lebenden Systemen bewusst. Das ist für meinen Geschmack zu nahe an der kreationistischen Auffassung des »Intelligent Design«. Eine Einbettung in die Evolutionstheorie wäre sinnvoller gewesen.

Stefan Gillessen

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

 **STERNE UND
WELTRAUM**



DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2016

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

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

MOTIVE
JETZT SCHON
ONLINE
ANSCHAUEN!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.sterne-und-weltraum.de/kalender

E-Mail: service@spektrum.de

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!





Ewald Weber

Der Fisch, der lieber eine Alge wäre. Das erstaunliche Zusammenleben von Tieren und Pflanzen

C.H.Beck, München 2015. 176 S., € 12,95

Natur fasziniert durch grandiosen Formen- und Strukturreichtum. Die Begeisterung hierfür ist dem Biologen und Biochemiker Ewald Weber deutlich anzumerken. Er lädt seine Leser zu einer unterhaltsamen Tour ein – durch Flora, Fauna und die schier unendliche Vielfalt irdischen Lebens. Anfangs bereitet es Vergnügen, ihm zu folgen, doch zum Ende hin wird das Werk recht unspektakulär und redundant. Dass der Titel so eindeutig auf den Fetzenfisch abhebt, ist etwas irreführend, denn dieses Tier kommt in dem Buch nicht prominenter vor als zahlreiche andere Wesen. Zudem könnten die farbigen Abbildungen den Kapiteln sinnvoller zugeordnet sein.

MAIKE KOMOREK



David Signer (Hg.)

Grenzen erzählen Geschichten – Was Landkarten offenbaren

Neue Zürcher Zeitung, Zürich 2015. 136 S., € 29,90

Wie mit dem Lineal gezogen, merkwürdig ausgebuchtet oder im Nichts endend: Wer sich Landkarten anschaut, entdeckt seltsame Grenzverläufe. Die Autoren nehmen 44 davon in den Blick und berichten kurz und unterhaltsam, wie diese entstanden sind. Dabei schlagen sie einen weiten Bogen vom kolonialen Erbe in Afrika bis zu bizarren Konstrukten direkt vor unserer Haustür. In den Niederlanden etwa gibt es die belgische Enklave Baarle-Hertog und in dieser wiederum niederländische Enklaven. In welchem Staat man wohnt, bestimmt sich dort danach, wo die Vorderseite des Hauses liegt, denn die Grenze geht manchmal mitten durch die Gebäude. Solche Beispiele findet man in dem Buch viele, jeweils mit kurzen, gut geschriebenen und verständlichen Erläuterungen zum geschichtlichen Hintergrund. Das liebevoll aufbereitete Buch lädt zum Stöbern ein und eignet sich gut als Geschenk – nicht nur für Geografen.

TIM HAARMANN



Bernard Lown

Heilkunst – Mut zur Menschlichkeit

Schattauer, Stuttgart 2015. 320 S., € 24,99

»Die Zeit, die fürs Zuhören aufgewendet wird, ist Zeit, die der Heilung dient.« Gemäß dieser Überzeugung plädiert der Kardiologe und Friedensnobelpreisträger Bernard Lown für ein menschlicheres Gesundheitswesen, das den Patienten in den Fokus stellt und ihn nicht als zu reparierende »Maschine« begreift. Obwohl Lown selbst maßgeblich an der Entwicklung des Defibrillators beteiligt war und damit viele moderne Eingriffe erst ermöglicht hat, plädiert er gegen die zunehmende Technisierung der Medizin. Aufwändige diagnostische und therapeutische Maßnahmen seien nicht immer das Beste für den Patienten – wohl aber für den Geldbeutel des Arztes.

Für das vorliegende Werk hat der Autor verschiedene Beiträge seine Blogs zusammengestellt, die zwischen 2008 und 2013 online erschienen sind. Die Texte sind zwar für Fachleute wie Laien lesenswert, bieten allerdings kaum Mehrwert gegenüber den kostenlosen Originalen. Da sie zudem weder chronologisch sortiert noch mit Datumsangaben versehen sind, fällt es schwer, sie in ihren zeitlichen Kontext einzuordnen.

ELENA BERNARD



Gert Mittring

Von Pi nach Pisa – Mit Zahlen die Welt verstehen

Neues vom Rechenweltmeister

Fischer, Frankfurt am Main 2015. 288 S., € 9,99

Es ist ein bisschen wie Tonleitern spielen lernen bei einem Weltklassepianisten. Gert Mittring erklärt uns das Umrechnen von Maßeinheiten, das geschickte Kürzen von Brüchen, das Runden zum Erleichtern des Rechnens und allerlei mehr bis hin zum schriftlichen Addieren im Binärsystem. Alles sehr nützlich und ein überzeugender Beweis dafür, dass man sich auch ohne Taschenrechner in der Welt zurechtfinden kann. Aber es bleibt himmelweit hinter den Fähigkeiten zurück, die den Autor zum zehnfachen Rechenweltmeister gemacht haben (siehe auch SdW 10/2013, S. 100). Nichtsdestoweniger ist die »Verpackung« hübsch: Mittring führt uns auf einer fiktiven Weltreise an verschiedene Orte und weiß zu jedem eine interessante Geschichte zu erzählen.

CHRISTOPH PÖPPE



Hans Konrad Biesalski

Mikronährstoffe als Motor der Evolution

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2015

246 S., € 49,99

EVOLUTION

Wie die Nahrung den Menschen machte

Das Angebot von Vitaminen, Mineralstoffen und Spurenelementen hat die Evolution unserer Vorfahren geprägt.

Als »Mikronährstoffe« bezeichnet man Nahrungsbestandteile, die so gut wie keine Energie liefern, aber trotzdem unverzichtbar sind, weil der Körper ohne sie nicht funktioniert. Vitamine, Mineralien und Spurenelemente gehören dazu. Wenn sie dauerhaft in der Nahrung fehlen, führt das zu chronischen Krankheiten bis hin zum Tod.

Ob ein Organismus gut oder schlecht mit Mikronährstoffen versorgt ist, wirkt sich auf seine reproduktive Fitness aus – auf seine Fähigkeit also, überlebens- und fortpflanzungsfähige Nachkommen hervorzubringen. Da liegt die Frage nahe: Wie beeinflusst das Angebot an solchen Stoffen die Evolution von Lebewesen? Antworten darauf gibt der Ernährungsmediziner Hans Konrad Biesalski in diesem Fachbuch. Dabei stützt er sich auf zahlreiche Forschungsarbeiten älteren und neueren Datums.

Der Autor nimmt die Evolution des Menschen in den Blick, angefangen mit unseren sehr frühen Vorfahren: kleinen Säugetieren im Erdmittelalter, die vermutlich in Baumkronen von Regenwäldern lebten und Insekten fraßen. Später erweiterten sie ihren Speiseplan um Früchte, Blätter und andere pflanzliche Nahrung, bis vor rund 45 Millionen Jahren aus ihnen die ersten Primaten hervorgingen. Biesalski listet den Nährstoffgehalt verschiedener Kerbtiere auf und erörtert, ob unsere Vorfahren ihren

Bedarf durch Insektenverzehr decken konnten.

Interessant sind seine Überlegungen zum trichromatischen Sehen, also dem visuellen Wahrnehmen mit drei Fotopigmenten. Es ist bei unseren Ahnen vor einigen zehn Millionen Jahren aus dem dichromatischen Sehen (mit zwei Fotopigmenten) hervorgegangen. Laut dem Autor könnte es sich evolutionär auch deshalb durchgesetzt haben, weil es sich als nützlich bei der Futtersuche erwies: Trichromaten erkennen reife Früchte besser als Dichromaten.

Ausführlich befasst sich das Buch mit Lebensraum und Ernährung verschiedener Hominini, etwa dem *Sahelanthropus tchadensis*, der vor sechs bis sieben Millionen Jahren lebte. Fossilfunden zufolge hielt er sich in ufernahen Wäldern auf, die von Savanne und Buschland umgeben waren. Dort hatte er Zugriff auf Früchte, Wasserpflanzen, Kleintiere, Fische und größere Tiere. Der Leser erfährt, wie man aus Fossilien herauslesen kann, was bei den Hominini auf dem Speiseplan stand. So sagt die Isotopenzusammensetzung des Zahnschmelzes etwas darüber aus, ob der Besitzer des Zahns eher C₃-Pflanzen verzehrte, die in Wäldern zu finden sind, oder eher C₄-Pflanzen, die in der Savanne gedeihen.

Das aufrechte Stehen und Gehen könnte Biesalski zufolge eine Anpas-

sung an aquatische Nahrung gewesen sein. Fische fangen konnten unsere Vorfahren wohl am besten, indem sie ruhig im Wasser standen und mit den freien Händen zugriffen oder -stießen, sobald sich Beute näherte. Das erforderte ausdauerndes Verharren auf zwei Beinen. Individuen mit dieser Fähigkeit dürften einen Selektionsvorteil gehabt haben, denn Fisch ist quantitativ und qualitativ ein hochwertiges Nahrungsmittel.

Den Körperbau der Pygmäen interpretiert Biesalski als Anpassung an eine chronische Mangelernährung, ebenso wie die Verzweigung des *Homo floresiensis*. Den massigen Neandertaler mit seinem großen Gehirn dagegen betrachtet der Autor als mögliche Adaption an ein Nährstoffüberangebot.

Inhaltlich ist das Buch aufschlussreich, die eng gesetzten Textwüsten trüben allerdings die Lesefreude. Für optische Auflockerung sorgen Tabellen, Texteingänge und seltene Grafiken. Ansprechende Bilder fehlen. Eine luftigere und übersichtlichere Gestaltung wäre möglich gewesen, hätte man die zahlreichen Redundanzen eingekürzt. Stellenweise häufen sich Fehler in Satzbau und Interpunktion.

»Mikronährstoffe als Motor der Evolution« kann interessierten Lesern als ergiebiges Nachschlagewerk und Recherchehilfe nutzen. Man sollte sich jedoch auf mitunter zähe Lektüre einstellen.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen

Streitpunkt Emergenz

Der Neurowissenschaftler Tony Prescott versucht in einem internationalen Forscherverbund, künstliches Bewusstsein zu erschaffen (»Roboter mit Ego«, August 2015, S. 80).

Wolfgang Schaufler, Bad Mergentheim: Sicher wird eine zukünftige Version des iCub ihrem Schöpfer noch wesentlich perfekter ein fühlendes Wesen vorgaukeln können. Zu einem echten Gefühl gehört jedoch ein Subjekt, das dieses Gefühl erlebt.

Wie kann solch ein Erleben in einer komplexen Anordnung physischer Substanzen »emergieren«? Eine neu auftauchende Eigenschaft im System muss durch die Eigenschaften der Teilsysteme erklärt werden können (wie zum Beispiel die Eigenschaft eines Schwingkreises aus den Eigenschaften von Kondensator und Spule). Mein Erleben ist aber nach den heute bekannten Gesetzen der Physik nicht aus den Bausteinen des Gehirns ableitbar. Was auch immer Hirnforscher herausfinden werden – es wäre auch ohne Erleben denkbar. Gefühle sind nicht ob-

jektiv nachweisbar, weder bei uns Menschen noch bei Robotern.

Viele Menschen mit Meditationspraxis berichten von der Erfahrung ihres Subjekts in einem Zustand ohne Gedanken als pure Existenz außerhalb von Zeit und Raum. Auf diesem Fundament können sich höhere Bewusstseinszustände entwickeln, in die Wach-, Schlaf- und Traumzustand integriert sind. Ohne diese Bewusstseinsforscher, die den Weg nach innen erkunden (Erste-Person-Perspektive), werden die psychischen Phänomene kaum erklärt werden können. Jene Wissenschaftler, welche sich auf die Objekte draußen beschränken (Dritte-Person-Perspektive), würden diesen helfen, echte Erfahrungen von Trugbildern zu trennen. Vielleicht gelänge in einem gemeinsamen Projekt die Lösung des Rätsels Bewusstsein.

Helge Albert, Königs Wusterhausen: Prescott vermutet, dass das Bewusstsein eine »emergente Eigenschaft eines geeignet konfigurierten Satzes von Selbstprozessen und kein gesondertes Element« sei. Mit anderen Worten entsteht Selbstbewusstsein als höchste



ACNESE, ABRUCCI & D'UJIO FARINA / ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA (IIT)

Der humanoide Roboter iCub lernt unter anderem durch Nachahmen.

Form der Intelligenz bei einem hinreichend komplexen und komplizierten, sich in seinen einzelnen Modulen selbst organisierenden System. Selbstprozesse sind zum Beispiel das Zeitempfinden: Vergangenheit, Jetzt und Zukunft. Der Selbstprozess Kommunikation beginnt mit Gestik und führt über sehr differenziert gefühlsausdrückende Mi-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahke, Dr. Gerd Trageser;
E-Mail: redaktion@spektrum.com

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Felicitas Mokler, Dr. Michael Springer
Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,
Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Assistenz des Chefredakteurs: Hanna Hillert

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

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,
Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,
E-Mail: service@spektrum.com

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Claudia Hecker, Dr. Ingrid Horn, Andrea Jungbauer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Uschi Loos.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,
c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80,
70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366,
E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-;
im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten
(gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland:
€ 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement
(Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.
Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank
Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF
Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und
Biomedizin in Deutschland (VBIO) und von Mensa e.V. erhalten
SdW zum Vorzugspreis.

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

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 36 vom 1.1. 2015.

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche 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: © 2015 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2711

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven
Inchcombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice
President and Associate Publisher, Marketing and Business
Development: Michael Voss



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



mik bis hin zur Sprache. Beim Menschen lässt sich die Komplexität und Kompliziertheit der Selbstprozesse am Beispiel Kind verstehen. Ein Kind zeigt Bewusstsein erst, wenn es diese Selbstprozesse aufgebaut und erlernt hat. Mit vielleicht anderthalb bis zwei Jahren beginnt sich dann das Selbstbewusstsein herauszubilden. Wenn später beispielsweise bei Demenz einzelne Selbstprozesse wieder zunehmend eingeschränkt werden, verliert der erkrankte Mensch allmählich das Selbstbewusstsein.

Ich glaube daher fest daran, dass ein Computer im Sinn eines komplexen, komplizierten Informationsverarbeitungssystems prinzipiell ein Bewusstsein entwickeln kann. Noch ist das menschliche Gehirn mit seiner Fähigkeit der Selbstorganisation, mit seiner massiv parallelen Verarbeitung und mit seiner Informationsbreite dem heutigen Computer um Größenordnungen voraus. Die Synapse arbeitet nicht binär wie der heutige Computer, sondern feuert über eine Bandbreite beginnend von null bis zum Maximum. Aber es sollte nur eine Frage der Zeit sein, bis die sich rasch entwickelnden Informationsverarbeitungssysteme in die Ebene der Bewusstseinsbildung aufgeschwungen haben.

Starke Krümmung

Studien mit Schülern erhellen, warum Myopie bei ihnen immer mehr um sich greift (»Kurzsichtigkeit – die neue Pandemie«, September 2015, Forschung aktuell, S. 18).

Holger Casselmann, Odenthal: Der Artikel greift möglicherweise etwas zu »kurz«. Er beginnt mit der These, dass bei Kurzsichtigkeit der Augapfel zu lang ist. Deshalb liegt der Fokus bei Sicht in die Ferne vor der Netzhaut und nicht auf ihr.

Als Kurzsichtiger weiß ich aber aus eigener Erfahrung, dass nach jeder neuen verschriebenen Brille die Dioptrienzahl im Betrag – also die Kurzsichtigkeit – zugenommen hat. Das passiert auch vielen anderen Personen im Alter zwischen 25 und etwa 45, was Brillen-

träger und Optiker bestätigen können. Bei mir hatte sich in diesem Zeitraum die Dioptrie von etwa $-3,0$ auf $-5,5$ verändert. Eine Erklärung durch weiteres Längenwachstum des Augapfels erscheint mir in diesem Alter absurd.

Eine andere, meines Erachtens viel schlüssigere Erklärung wäre, dass die Linse eine zu starke und irreversible Krümmung ausbildet. Dies würde nicht nur den vorgelagerten Fokus bei Fernblick erklären, sondern auch die Ursache: Viel Lesen, das heißt ständiger Blick im Nahbereich, erfordert eine starke Krümmung (Verdickung) der Linse, ebenso Nahsicht unter schlechten Lichtverhältnissen, weil sich die Pupille weiter öffnet und die Schärfentiefe abnimmt. Die Linse muss dies auch durch entsprechende, noch präzisere Krümmung ausgleichen. Sie ist mit zunehmendem Alter immer weniger in der Lage abzuflachen, was erst scharfe Fernsicht ermöglicht.

Das Auge stellt sich also über die Krümmung der Linse immer mehr auf den häufig »benutzten« Nahbereich ein. Dass diese, bei der es sich ja um ein bewegliches und flexibles Organ handelt, die Ursache für die Kurzsichtigkeit ist, erscheint doch glaubwürdiger als die durch nichts begründete Annahme, der Augapfel würde auf etwas schlechtere Lichtverhältnisse und häufige NahEinstellung des Auges mit Längenwachstum antworten.

Verschärftes Problem

Durch den Klimawandel gelangen Erreger in Zonen der Erde, die dort bisher unbekannt waren und die Ökosysteme durcheinanderwirbeln, so der Umweltexperte Christopher Solomon (»Die Arktis als neuer Seuchenherd«, Juli 2015, S. 68).

Hans-Joachim Bätza, Bonn: Im Artikel wird ausgeführt, dass, »da sich die Tollwut dort nur in Gegenden mit Polarfüchsen dauerhaft hält, könnten ... die Fälle zurückgehen, wenn nun der Rotfuchs weiter nach Norden wandert und den Polarfuchs verdrängt«. Diese Aussage suggeriert, dass der Rotfuchs für

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

Tollwut nicht empfänglich ist und sich das Problem Tollwut durch die Auswanderung des Rotfuchses nach Norden erledigt. Aber auch für die arktische Tollwutvariante, die normalerweise nur beim Polarfuchs vorkommt, ist der Rotfuchs empfänglich, so dass sich das Problem mitnichten erledigt, sondern im Gegenteil verschärft darstellt.

Erratum

»Die Wiege des Indoeuropäischen«, September 2015, S. 16

Die Andronovo-Kultur beziehungsweise Andonowo-Kultur wurde fälschlicherweise Andonowo-Kultur bezeichnet. Ortrud Winkler aus München hat uns darauf aufmerksam gemacht.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

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

SCHLECHTE EINSCHALTQUOTEN FÜR KLEOPÄTRA

VON TIAN LI

»He, Geschichtsfreak, wie ist die neue Folge von ›Rom?‹ Mein Mitbewohner Scott spaziert ins Wohnzimmer, lässt sich neben mir auf die Couch fallen, beugt sich herüber und beäugelt meinen Laptop.

»Das ist erst der Rohschnitt«, antworte ich, »aber ich finde, die Serie hält ihr Niveau.«

Ich bin privilegiert. Dank meiner Sprach- und Geschichtskenntnisse darf ich die Episoden schon gut 24 Stunden vor Ausstrahlung der geschnittenen und vor allem synchronisierten Fassung ansehen. Oder besser gesagt: Ich durfte. Schade, aber alles hat einmal ein Ende, in der Vergangenheit wie in der Gegenwart.

Scott zuckt die Achseln. Anscheinend verliert er das Interesse an meiner Lieblingsserie. Anfangs schauten wir uns die Originalversionen gemeinsam an, während ich sie ihm simultan übersetzte. Er brüstete sich sogar vor seiner neuen Freundin, er könne die lateinischen Dialoge komplett verstehen – bis ich ihm erklärte, dass die Personen manchmal Griechisch sprechen.

Doch in den letzten Wochen ließ seine Begeisterung spürbar nach. Er wartet jetzt lieber auf die Synchronfassung. Und vor einer Woche ertappte ich ihn, wie er sich die uralte Serie gleichen Namens aus dem Jahr 2005 ansah.

»Deine letzte Folge hat mir nicht gefallen«, erklärt Scott und bestätigt da-

mit meine Befürchtung. »Vor allem der Anblick von Kleopatra hat mich schockiert. Ich meine, wie kann so eine Frau erst Julius Cäsar und dann auch noch Mark Anton den Kopf verdrehen? Sei ehrlich, diese Kleopatra kann weder Elizabeth Taylor noch Vivien Leigh das Wasser reichen.«

Ich seufzte. Das Gleiche habe ich von anderen gehört, und die Umfragen deuten ebenfalls in diese Richtung. Manche Zuschauer sind zwar beeindruckt von ihrer Klugheit oder fasziniert von ihren prächtigen Kleidern und Juwelen, aber fast alle haben sich die »schönste Frau der Antike« ganz anders vorgestellt. Ihre berühmte Nase ist nach heutigem Geschmack einfach viel zu lang.

Jedenfalls sind die Einschaltquoten abgestürzt, und die Episode der vorigen Woche schlägt an Unbeliebtheit alle Rekorde.

»Schon gut, du musst Kleopatra nie mehr sehen«, sage ich und versuche, mir die Enttäuschung nicht anmerken zu lassen. »Die Serie wurde abgesetzt.«

Scott macht erstaunte Augen. »Das ist nicht dein Ernst! Warum?« Wahrscheinlich heuchelt er sein Bedauern nur mir zuliebe, aber ich bin ihm trotzdem dankbar. »Wegen der schlechten Quote«, antworte ich achselzuckend. »Zu wenige Zuschauer.«

Gewiss wäre ›Rom‹ im 3-D-Format besser angekommen als in 2-D – aber was will man machen? Es ist nicht so

einfach, über 2200 Jahre hinweg ein klares Signal zu bekommen.

Wie ich weiß, ist das nicht der einzige Grund. Der Sender hatte erwartet, Gladiatorenkämpfe und die Bilder geschundener Sklaven würden die Einschaltquoten hochtreiben, viele Zuschauer fanden solche Szenen jedoch zu ausufernd und zu blutig – ganz einfach abstoßend. Es gab sogar Beschwerden wegen Cäsar: Man hätte gern mehr über seine Jugend und sein Privatleben erfahren, etwas über Cäsars andere Seite. Aber so funktioniert das wirkliche Leben eben nicht – es ist, wie es ist.

»Zu dumm«, murmelt Scott. »Ich dachte, es gibt eine zweite Staffel.«

Ich blicke ihn überrascht an: »Du redest ja wie ein Fan.«

Scott lächelt. »Nun, die Serie mag ein bisschen schräg sein, aber wenigstens erzählt sie die Wahrheit – und verschafft uns damit die Chance, ein paar historische Rätsel zu lösen. Ich wollte den wahren Grund erfahren, warum Kleopatra den Antonius in der Schlacht bei Actium im Stich lässt. Erinner dich an ›Die Tudors‹, da haben wir die zweite Staffel im Grund nur gesehen, weil wir erleben wollten, aus welchem fadenscheinigen Gründen eigentlich Anne Boleyn geköpft wurde.«

Ich grinse. Es stimmt, dass Boleyns unglückliches Ende die Einschaltquoten gerettet hat. Voyeurismus und Empörung sorgen immer für die Quote.

»Aber willst du wirklich die Wahrheit?« frage ich. »Machen wir uns nichts vor, die Wirklichkeit ist oft sehr verschieden von unseren Vorstellungen – siehe Kleopatra.«

Scott nickt. »Vielleicht hast du Recht.«

Was für eine Schande: Diese historischen Dokumentationen sind mehr als bloße Unterhaltung. Sie enthüllen Wahrheiten, die lange hinter dem Schleier der Vergangenheit verborgen lagen. Ich bin überzeugt, eines Tages wird man sie zu schätzen wissen.

Plötzlich fällt Scott etwas ein: »He, du hast dir doch eben eine neue Originalfolge angesehen! Wenigstens die geht doch auf Sendung, oder nicht?«

Ich schüttele den Kopf. »Abgesetzt ist abgesetzt.« Ich überlege. »Vielleicht lässt sich das Projekt so doch noch retten?«

Scott schaut mich fragend an.

»Die Produktionskosten sind ja echt niedrig: keine Honorare für Schauspieler, keine Kosten für Kostüme oder Bauten. Bloß die Temporaltechnik kostet ein bisschen was. Der Sender könnte weitere Folgen einfach unbearbeitet online stellen – wir würden Cäsar, Antonius und Octavian weiter sehen. So findest du vielleicht doch noch heraus, was während der Schlacht bei Actium wirklich geschah.«

Scott strahlt. »Du meinst, wir können doch noch eine Staffel kriegen?«

»Möglich wär's. Aber die Online-episoden werden nur Rohschnitte sein. Ohne Synchronstimmen.«

»Kannst du mir die Dialoge übersetzen?« Scott schaut wieder so begeistert drein wie bei der ersten Folge.

»Noch besser! Ich werde alles live untertiteln«, grinse ich.

Das ist das Wenigste, was ich für Scott und seine Mitmenschen tun kann. Die unzähligen Sprachen, die ich kenne, sind in seiner Epoche ohne Bedeutung – für diese Leute bin ich nur ein Nerd mit Vorliebe für die Vergangenheit. Aber wenn ich das beim Sender durchkriege, werden zumindest ein paar Zuschauer schlauer. Und natürlich der gute Scott.

Ihm zuzusehen, wie er mehr über das antike Rom erfährt – das allein garantiert gute Unterhaltung. Für mein anderes Publikum! Das wird die Einschaltquoten meiner Show ›Abenteuer eines Geschichtsfreaks‹ mal wieder nach oben schießen lassen. Das ist auch bitter nötig, denn ich muss die nächste Rate für meinen Zeitgleiter zahlen, sobald ich wieder in meine eigene Epoche zurückkehre.

Allerdings muss ich Scott überreden, sich ein neues Hemd zuzulegen. Nachlässige Kleidung gilt in meiner Heimat gegenwart als unhöflich. Aber das kriegen ich hin. Auch wenn mein temporärer Mitbewohner es nie erfahren wird: Ich mache aus ihm einen Fernsehstar! 📺

DIE AUTORIN

Tian Li lebt in China. 2012 absolvierte sie ein Masterstudium in Biologie an der Tsinghua-Universität in Peking. Sie liebt Detektivromane und Sciencefiction.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 521, S. 118, 7. Mai 2015

Auf der Suche nach der Theorie von Allem

Einstein wollte mit einer »allgemeinen Feldtheorie« die Gravitation mit den anderen Naturkräften vereinen – vergeblich. Eine neue Generation von Forschern hofft nun zu vollbringen, woran der große Physiker scheiterte.



FOTOLIA / PIRIS

Haben wir einen zweiten Hörsinn?

Laut aktuellen Untersuchungen verfügt der Mensch über Reste eines urtümlichen Hörsinns, den Fische, Frösche und Krokodile nutzen. Er ist im Gleichgewichtsorgan angesiedelt und spricht vor allem auf Bassrhythmen an, weshalb uns diese buchstäblich in die Beine fahren.

Programmierte Bürger und automatisierte Gesellschaft

Die digitale Revolution ist in vollem Gang. Wie wird sie unsere Welt verändern? Ein Team internationaler Experten warnt vor der möglichen Zerstörung unserer demokratischen Gesellschaft durch die »sanfte Diktatur« allmächtiger Algorithmen – und benennt, was zu tun ist.



TIM BOWER

In den Fängen des Fettgens

Fruchtzucker macht hungrig und dick! In Zellen wird er in Harnsäure umgesetzt, und die können wir nicht abbauen. So kommt der Teufelskreis der Zivilisationskrankheiten in Gang.



JEFF WILSON

Die Geburt einer Rakete

Die USA arbeiten an einem neuen Raketenprojekt für die bemannte Raumfahrt und den Frachttransport mit größeren Reichweiten. Wie ausgereift ist das Space Launch System bereits – und wird es den Menschen auch einmal zum Mars bringen?

NEWSLETTER

Möchten Sie immer über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.de/newsletter

Zu Weihnachten direkt auf den Bildschirm – unsere digitalen Geschenkabonnements



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie

12 AUSGABEN IM JAHR;
€ 60,- (ERMÄSSIGT € 48,-)



Das Magazin für Astronomie und Weltraumforschung

12 AUSGABEN IM JAHR;
€ 60,- (ERMÄSSIGT € 48,-)



Das Magazin für Psychologie, Hirnforschung und Medizin

12 AUSGABEN IM JAHR;
€ 60,- (ERMÄSSIGT € 48,-)



Das wöchentliche Wissensmagazin

52 AUSGABEN IM JAHR;
€ 48,- (ERMÄSSIGT € 36,-)

+ EIN GESCHENK FÜR SIE



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743, Fax: 06221 9126-751, E-Mail: service@spektrum.de
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogstraße 3-5, 69126 Heidelberg

www.spektrum.de/geschenk

Wie kostbar ist Energie für uns?



Wir alle verbrauchen Energie. Aber die wenigsten denken weiter darüber nach.

Machen Sie mit beim Creator Space™ und entwickeln Sie zu unserem 150-jährigen Jubiläum gemeinsam mit uns Lösungen, um auch in Zukunft eine zuverlässige Energieversorgung gewährleisten zu können. Denn nur gemeinsam finden wir neue Wege für intelligente Energie.

Jetzt registrieren: creator-space.basf.com

150 Jahre

BASF

We create chemistry