

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

NEUE SERIE
IMMUNTHERAPIE
Mit körpereigenen
Waffen gegen
Krebs



JULI 2014

ARCHÄOLOGIE

Wer waren
die Etrusker?

KOSMOLOGIE

Der Dunklen Materie
auf der Spur

AUTISTISCHE KINDER

Chancen auf einen
normalen Alltag

QUANTENFELDTHEORIE

WAS IST
REALITÄT

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



UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Das Magazin für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren: Roboter zum Staunen • Wenn Computer denken • Mensch und Maschine im Duell • Krieg der Maschinen • € 6,50



Das wechselhafte Leben der Sterne • Die Suche nach der zweiten Erde • Milchstraße voller Planeten • Asteroidengürtel: Brocken um ferne Sterne • Planeten mit zwei Sonnen • € 8,90



Gründungsmythen: Brudermord und Fremdherrschaft • Ständekämpfe: Sieg der Verweigerer • Rom und der hellenistische Osten • Karthago: Das antike Reich des Bösen? • € 8,90, ab 27. 6. 2014



Alzheimer: Die Krankheit des Vergessens • Wurzeln der Demenz • HIV: Virusalarm im Gehirn • Parkinson: Zittern in Zahlen • Multiple Sklerose: Attacke aus der Immunabwehr • € 8,90, ab 23. 6. 2014

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

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

Hier QR-Code
per Smartphone
scannen!





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Physik, fundamental

Literatur bildet nicht die Wirklichkeit ab, sie schafft vielmehr eigene Welten. Und die Physik? Man möchte meinen, dass es sich hier anders verhält: Physiker machen Experimente, bilden Hypothesen über Gesetzmäßigkeiten, die reale Naturvorgänge beschreiben, überprüfen diese wiederum und schreiben dadurch ihre Theorien über die Beschaffenheit der Welt weiter. Doch so einfach ist es nicht, wie wir seit der Entwicklung der Quantenmechanik im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts wissen. Damals gelangten Forscher wie Niels Bohr, Erwin Schrödinger und andere weit hinter die Grenzen dessen, was man sprachlich fassen kann. »Die Quantentheorie lässt keine völlig objektive Beschreibung der Natur mehr zu«, urteilte Werner Heisenberg. Man könne Quantenvorgänge nur »in Bildern und Gleichnissen« verstehen.

Diese Zeilen schreibe ich, während ich gerade von einer Tagung komme, die das narratologische Fundament der Physik in den Blick nahm, ebenso wie die wechselseitigen Beziehungen zwischen Dichtung und Naturwissenschaft. Vier Tage lang debattierten Vertreter der »Zwei Kulturen«, die Charles Percy Snow 1959 einander gegenüberstellte, auf der Gründungstagung von Elinas (Erlanger Zentrum für Literatur und Naturwissenschaft) fernab der Grenzen ihrer jeweiligen Fächer. Ins Zentrum der Diskussion rückte immer wieder die Metaphorik der Physik: Schwarzes Loch, Dunkle Materie und Urknall sind nur einige der Begriffe, die aus konkreten Quellbereichen in den unanschaulichen Zielbereich der physikalischen Weltbeschreibung überführt wurden, um eben dort für mehr Verständlichkeit zu sorgen. Die Osnabrücker Philosophin Nikola Kompa bescheinigte in ihrem Vortrag solchen Metaphern neben dieser explanatorischen Funktion auch eine explorative: »Metaphern helfen uns, uns in den Bereich des Noch-nicht-klar-Erkannten oder Noch-nicht-ganz-Verstandenen vorzutasten.«

Im aktuellen Titelthema analysieren wir die am genauesten überprüfte aller wissenschaftlichen Theorien hinsichtlich ihrer Beschreibungskraft für die Wirklichkeit: die Quantenfeldtheorie. Doch so grundlegend diese Vereinigung der Quantenmechanik mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie seit Jahrzehnten für die Physik ist – wir verstehen sie nicht, resümiert unser Autor Meinard Kuhlmann, Sprecher der Arbeitsgemeinschaft »Philosophie der Physik« der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, in seinem Artikel ab Seite 46. Denn die zentralen Begriffe der Theorie – »Teilchen« und »Feld« – seien hoch problematisch, ja sinnlos. Kuhlmann propagiert daher eine Sicht auf die Welt, die Strukturenrealismus heißt. Demnach beschreibt die erfolgreichste Theorie der Physik eine Welt allein der Zusammenhänge – ohne irgendwelche Objekte darin.

Viel Spaß beim Nachsinnen über das, was wirklich ist, wünscht Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Vertrieben unsere Vorfahren einst die Säbelzahnkatzen? **Lars Werdelin**, Experte für fossile Säugetiere am Museum für Naturgeschichte in Stockholm, analysiert die Konkurrenz der großen Raubtiere und der ersten Menschen in Afrika (ab S. 34).



Meinard Kuhlmann vertritt eine Professur für Philosophie an der Universität Bielefeld. Sein Spezialgebiet ist die philosophische Deutung der Quantenfeldtheorie (ab S. 46).



Dass die Etrusker anders waren als Griechen und Römer, wusste man schon in der Antike. **Martin Bentz**, Archäologe der Universität Bonn, entdeckte noch mehr: Sie waren ihrer Zeit voraus (ab S. 70).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Leben nach der Pest • Anstieg des Meeresspiegels • Herumhängende Faultiere • Implantat aus Schweineblasen verbessert Muskelaufbau • Reisanbau macht kooperativer • Planet oder Brauner Zwerg?

11 Bild des Monats

Knochenmark auf den Chip gebracht

12 Forschung aktuell

Volkszählung unter Raubkatzen

Es gibt doch nicht so viele Luchse in den Alpen wie gedacht

Einstein und der Urknall

In einem unveröffentlichten Manuskript stoßen Wissenschaftshistoriker auf Überraschungen

Molekulares Suchbild

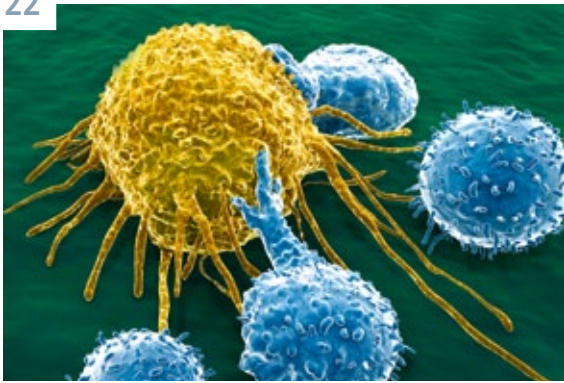
Proteomics-Forscher optimieren die Fahndung nach Biomarkern für Krankheiten

SPRINGER'S EINWÜRFE

Schlechte Zeiten für Tellerwäscher

Historische Daten belegen wachsendes Sozialgefälle

22



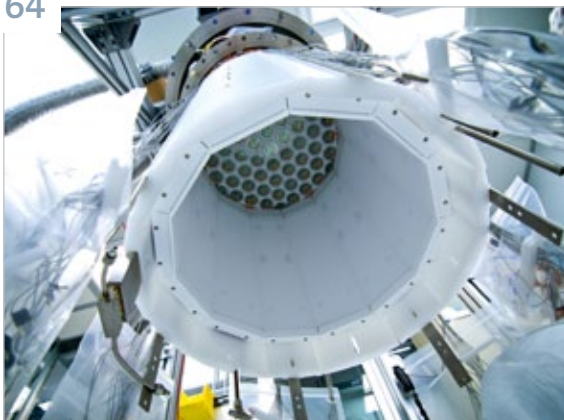
ISTOCKPHOTO / JUAN GÄRTNER

54



RON MILLER

64



CARLOS H. FAHAM

BIOLOGIE & MEDIZIN

► NEUE SERIE: »IMMUNTHERAPIE GEGEN KREBS« TEIL 1

22 Auftragskiller der Körperabwehr

Courtney Humphries

Adoptiver Zelltransfer kann Immunzellen so verändern, dass sie einen Tumor gezielt angreifen.

28 Zelluläre Mobilmachung

Übersichtsgrafik: Auf diese Weise lässt sich das Immunsystem zur Krebsbekämpfung einsetzen.

30 Bakterien gegen Tumoren

Sarah DeWeerd

Die Geschichte der ersten Krebsimmuntherapie.

34 Der wahre König der Tiere

Lars Werdelin

Die frühen Menschen als oberste Raubtiere.

► 40 Hilfe für autistische Kinder

Nicholas Lange und Christopher J. McDougale

Neue Therapien können einen normalen Alltag ermöglichen.

PHYSIK & ASTRONOMIE

54 Leben auf fernen Monden

Lee Billings

Trabanten von Exoplaneten eignen sich vermutlich besser für die Entstehung von Leben als die Planeten selbst.

SCHLICHTING!

60 Welt der Schatten

H. Joachim Schlichting

Wie frühe Naturforscher himmlische Vorgänge erforschten.

► 64 Woraus besteht die Dunkle Materie?

Mario Livio und Joe Silk

Die Antwort finden wir nur, wenn wir die Suche ausweiten.

► TITELTHEMA

QUANTENFELDTHEORIE

46 Was ist real?

Meinard Kuhlmann

Die Welt der klassischen Physik besteht aus Teilchen, die unter dem Einfluss von Kraftfeldern bestimmte Bahnen ziehen. Doch in der Quantenfeldtheorie ist nicht mehr klar, was Teilchen und Felder überhaupt sind. Die fundamentalsten Objekte lassen sich nicht wie Alltagsdinge beschreiben, sondern nur als Bündel von Eigenschaften wie Form und Farbe, Masse und Ladung.

70



SAILKO / CC-BY-SA-3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0/)

88



ISTOCKPHOTO / ALENGO

..... MENSCH & KULTUR

► 70 **Wer waren die Etrusker?**

Martin Bentz

Schon in der Antike galten sie als ein ganz spezielles Volk.

SERIE: »WELT DER SPRACHE« TEIL 3

76 **Sehen, riechen, orientieren**

Thomas Widlok und Niclas Burenhult

Kennen die Eskimo wirklich 100 Wörter für Schnee?

..... ERDE & UMWELT

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

82 **Vielseitige Chemie mit brennbarer Luft**

Roald Hoffmann

Wasserstoff ist immer wieder für Überraschungen gut.

..... TECHNIK & COMPUTER

88 **Individuelles Lernen per Computer**

Seth Fletcher

Algorithmen übernehmen Aufgaben der Lehrer.

94 **Rezensionen**

Giulia Enders: Darm mit Charme • Konrad Vössing: Das Königreich der Vandalen • Pedro G. Ferreira: Die perfekte Theorie • Jürgen Trabant: Globalesisch oder was? • Florian Freistetter: Die Neuentdeckung des Himmels • Josef Schwicrath: Mobbing erfolgreich bewältigen u. a.

103 **Wissenschaft im Rückblick**

Vom Vordenker des Transrapid zum Urahn des Mais

104 **Futur III**

A. Zinos-Amaro und A. Shvartsman: Der letzte Kaffee

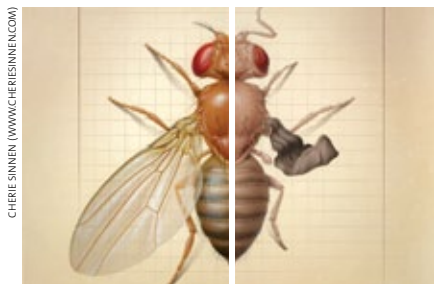
106 **Vorschau**

Titelmotiv: Jen Christiansen
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

Mutation durch verzögerte Selektion

Komplexere biologische Strukturen und Lebewesen können aus zunächst unbedeutenden Fehlentwicklungen entstehen, schrieb Carl Zimmer. (»Evolution ohne Selektion«, Mai 2014, S. 26)

Jens Freund, Heidelberg: Der Titel des Artikels hätte auch einfach »Mutation durch verzögerte Selektion« heißen können; das trifft den Sachverhalt genauso, klingt aber weniger spektakulär. Selbstverständlich häufen sich Mutationen schneller an, wenn zumindest der externe Selektionsdruck ausgeschaltet wird, weil viel mehr mutierte Individuen überleben. Entsprechend wurde beim Kolonisieren von neuen Lebensräumen die Evolution extrem beschleunigt, und zwar vor allem wegen der Reduzierung des Selektionsdrucks. Dadurch ist Evolution möglich, selbst wenn Zwischenstufen massive Nachteile im Wettbewerb darstellen. Das ermöglicht große Änderungen (»Sprünge«), die im Nachhinein kaum nachvollziehbar sind. Es ist sehr gut, darauf hinzuweisen, stellt aber kein neues



Mutationen bei Labor-Taufiegen (rechts) im Vergleich zur Wildform (links).

Gesetz dar oder irgendeine Änderung der Theorien von Darwin. Es gibt weiterhin nur Mutation und Selektion. Es hat nie jemand gesagt, dass der Selektionsdruck immer gleich groß sein muss oder dass höherer Selektionsdruck immer gleich schnellere Evolution oder mehr Komplexität bedeutet.

Alleinstellungsmerkmal der menschlichen Sprachfähigkeit

Die Sprache scheint kein so einzigartiges Merkmal des Menschen zu sein, wie Forscher lange dachten, so die

Linguisten Ina Bornkessel-Schlesewsky und Matthias Schlesewsky. (»Ende der Exklusivität«, Mai 2014, S. 60)

Jürgen Volkheimer, Brauweiler: Ein wesentlicher Unterschied zwischen Mensch und Tier ist jedoch, dass jeder (geistig gesunde) Mensch – also auch die Einwohner von Papua-Neuguinea – in der Lage ist, eine Grammatik (wie die deutsche) zu verstehen und zu erlernen. Dem Schimpanse wird das nie gelingen, und dieser Unterschied muss ja irgendwo im Gehirn repräsentiert sein. Demnach gibt es sehr wohl eine Notwendigkeit, von einem biologisch basierten Alleinstellungsmerkmal der menschlichen Sprachfähigkeit auszugehen, denn mit einer unterschiedlichen »Gedächtniskapazität« allein lässt sich das nicht erklären.

Antwort von Matthias Schlesewsky:

Es gibt mittlerweile genug Evidenz und Konsens innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft, dass es auch jenseits der Menschen Grammatiken gibt. Viele Untersuchungen zu Vogelmelodien etwa bestätigen, dass diese Tiere Fähigkeiten besitzen, die der menschlichen

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Finkeldey (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistenz: Barbara Kuhn
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 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. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Dr. Rainer Kayser, Christine Kemmet, Claudia Krystofiak, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

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 Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation GmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Prof. Dr. Carsten Könneker.

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, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Annette Freistühler, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1322

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-23387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 35 vom 1.1.2014.
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: © 2014 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchoombe, 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.



Grammatik gleichen. Wenn man also die Grammatik als eine Art Regelsystem definiert, welches die Arten der Verknüpfung und die Art der Abhängigkeiten bestimmt, dann muss man – bei genauer Beobachtung – tatsächlich feststellen, dass die tierische Kommunikation über Grammatiken verfügt. Natürlich sind diese oftmals nicht so reichhaltig, wie wir es von natürlichsprachlichen Grammatiken des Menschen kennen. Aber das ist dann wieder ein quantitativer und nicht ein qualitativer Unterschied.

Verhalten im Alltag

Medizin-Nobelpreisträger Harald zur Hausen und Andreas Barner, Chef von Böhlinger Ingelheim, diskutierten darüber, wie Forschungsgelder sinnvoll eingesetzt werden können. (»Wir haben kein besseres Verfahren«, Mai 2014, S. 32)

Peter Kosek, Gütersloh: Die Probleme liegen nicht in fehlenden wissenschaftlichen Erkenntnissen oder Medikamenten, sondern im alltäglichen Verhalten der Menschen. Gemäß Statistischem Bundesamt sind 52 Prozent der Deutschen übergewichtig oder fett, zwischen 30 und 40 Jahren rauchen fast 50 Prozent der Männer und 36 Prozent der Frauen, und 33 Prozent der Männer und 22 Prozent der Frauen trinken zu viel Alkohol. Finanzielle Investitionen in die Motivierung zu gesundheitsbewusstem Leben sind sicher besser angelegt als in der Produktion von Wissenschaftsmüll. Das kostet viel weniger Geld, entlastet die Pflegeversicherung und bringt Lebensfreude.

Cartoon-Knüller

Schon seit Jahren bereichern die Cartoons von »OH« die »Spektrum«-Hefte, so auch im Artikel von Jaron Lanier über die Privatsphäre im Internet. (»Was ist uns unsere Privatsphäre wert?«, Mai 2014, S. 84)

Hans G. Diederich, Darmstadt: Ich blättere jedes neue »Spektrum«-Heft zuerst einmal durch und suche dabei gezielt nach den Cartoons von »OH«.

Die sind immer ausgesprochen erheitend und pfffig, regen zum Nachdenken an und transportieren ihre eigentliche Nachricht (»message«) mit hohem Wirkungsgrad zum Leser. Das letzte Beispiel im Maiheft 2014 empfinde ich als echten Knüller: die Staubgefäßkamera auf S. 91.

Gleich mehrere Aspekte finden hier zueinander: die gesundheitlichen Gefahren durch Nanotechnologie, die Gefahr des Verlusts der Privatsphäre durch flächendeckendes Ausspähen (NSA & Co) unserer Kommunikation; dazu gesellt sich die offenbar bewundernde Neugier eines technikaffinen Zeitgenossen. Das passt genau zum nachdenklichen, ruhigen Ton des Aufsatzes, in dem der Cartoon platziert wurde. Es ließen sich noch mehr mögliche Inspirationsquellen finden.

Diese Komposition ist bemerkenswert. Sie erfreut mich trotz des leicht verfremdeten ernsten Hintergrunds. Möge uns die kreative Schaffenskraft, das feine Gespür von »OH« noch lange erhalten bleiben.

3-D-Druck mit Fehlern

Gute Chancen dafür, dass bald jeder 3-D-Druck im Alltag für sich nutzen könnte, sieht Mathilde Berchon. (»Drucken in drei Dimensionen«, Juni 2014, S. 84)

Bernhard Rau, Dürrlauingen: Auf S. 90 heißt es: »Wer sich den Lernaufwand und die Kosten für professionelle Software wie CATIA, SolidWorks oder Blender ersparen will, findet online kostenlose Einfachprogramme wie SketchUp, Tinkercad oder 123D.«



FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

- Die gemeinte Software ist wohl CATIA (von Dassault Systèmes); eine 3-D-Software namens CATLA ist mir (und auch dem Internet) unbekannt.
- Bei Blender handelt es sich um eine freie und Open-Source-Software, die entgegen der Behauptung im Text keine Kosten verursacht. Auch das STL-Exportmodul für den 3-D-Druck ist kostenlos.

Erratum

»*Wolken – vom lokalen zum globalen Bild*«, Mai 2014, S. 78

Sonnensynchrone Satelliten beobachten alle Regionen der Erde nur einmal am Tag jeweils zur selben Ortszeit und nicht zweimal, wie es im Artikel steht.

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.com

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

GESCHICHTE

Nach der Pest erhöhte sich die Lebenserwartung

Die große Pestpandemie im Mittelalter, der »schwarze Tod«, löschte zwischen 1347 und 1353 ein Drittel der europäischen Bevölkerung aus. Offenbar herrschten in der Zeit danach bessere Lebensbedingungen als vor dem Ausbruch der Seuche, konstatiert nun eine amerikanische Forscherin. Das stimmt mit historischen Berichten über geringere Jugendsterblichkeit nach der Pest überein.

Sharon DeWitte von der University of South Carolina in Columbia (USA) untersuchte insgesamt 600 Skelette von Londoner Friedhöfen. Diese stammten von Menschen, die in den zwei Jahrhunderten vor beziehungsweise nach der Pestwelle gestorben waren. Altersbestimmungen an den Knochen deuten darauf hin, dass die Lebenserwartung nach der großen Pestwelle stieg: Unter den Verstorbenen hatte der Anteil älterer Menschen deutlich zugenommen. Andere Studi-

en hierzu hätten bislang kein eindeutiges Bild geliefert, schreibt die Forscherin – etwa wegen ungenauer Altersdatierungen oder der Beschränkung auf bestimmte Bevölkerungsgruppen.

Historische Quellen zeichnen ein widersprüchliches Bild der Zeit nach der Pest. Verschiedene Dokumente bezeugen jedoch, dass die Kaufkraft der Bevölkerung stieg, wohl vor allem auf Grund fallender Preise. Auch wurden Arbeitskräfte gesucht: Grundherren etwa sahen sich zu einer Abgabensenkung gezwungen, um die Bauern davon abzuhalten, von den Gütern abzuwandern. Es stand mehr landwirtschaftliche Nutzfläche zur Verfügung als für die geschrumpfte Bevölkerung

Skelette von Pestopfern (hier von einem Londoner Friedhof) zeugen von dem Massensterben, das die Krankheit Mitte des 14. Jahrhunderts verursachte.

erforderlich, was unter anderem zu einem Aufschwung der Viehzucht und mehr Fleischkonsum führte.

PLoS One 9, e96513, 2014



TREVOR HURST / MUSEUM OF LONDON

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE



Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Jeden Donnerstag neu! 52-mal im Jahr mehr als 40 Seiten News, Kommentare, Analysen und Bilder aus der Forschung

www.spektrum.de/die-woche

KLIMAWANDEL

Meeresspiegel könnte unerwartet stark steigen

Zwei neue Fachartikel deuten darauf hin, dass der Meeresspiegel im Zuge des Klimawandels stärker steigen könnte als erwartet. In der ersten Publikation berichten Anders Levermann und Matthias Mengel vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung über eine mögliche Kettenreaktion in der Südpolregion. Am Rand des Wilkes-Beckens in der östlichen Antarktis blockiere ein wenige Kilometer breiter »Korken« aus Eis eine dahinterliegende, hunderte Kilometer lange Gletschermasse. Sollte dieser schmelzen, könne die Gletschermasse beschleunigt kalben, wobei sie sich landeinwärts zurückziehen würde. Das Eis, das dabei in den Ozean gelangte, könnte den Meeresspiegel um 3 bis 4 Meter steigen lassen.

Der zweite Artikel beleuchtet das Tauen in Grönland. Dort erstrecken

sich vereiste Fjorde weit ins Innere der Insel hinein. Wie Mathieu Morlighem von der University of California in Irvine und seine Kollegen schreiben, seien diese Täler länger und tiefer als bisher angenommen. Deshalb dringe das wärmer werdende Meerwasser wohl auch weiter als bislang vermutet am Grund der Fjorde ins Inland vor und taue das Eis dabei von unten an – zusätzlich zur Schmelze von oben, die auf die steigenden Lufttemperaturen zurückgeht. Das Abtauen des grönländischen Eisschildes könnte dadurch schneller voranschreiten und stärker zum Anstieg des Meeresspiegels beitragen. Tatsächlich verzeichnen Forscher eine Zunahme der jährlichen Schmelzperiode auf Grönland.

Nat. Clim. Change 4, S. 451–455, 2014

Nat. Geosci. 7, S. 418–422, 2014

Faultiere fürs Herumhängen perfektioniert

Faultiere besitzen Fasern, die ihre inneren Organe festhalten – eine Anpassung an ihre besondere Lebensweise. Die gemächlichen Tiere verbringen viel Zeit damit, kopfunter vom Astwerk zu hängen. Dies würde auf Dauer dazu führen, dass die Eingeweide absinken und auf die Lungen drücken, so dass das Atmen unverhältnismäßig schwer würde. So weit kommt es aber nicht, denn so genannte Zurrfasern halten die Organe an Ort und Stelle und verhindern deren Absacken.

Rory Wilson von der Swansea University und seine Kollegen haben wochenlang die Stoffwechselraten mehrerer Faultiere gemessen. Dies erlaubte ihnen, den Energieaufwand abzuschätzen, den die Tiere in verschiedenen Körperhaltungen leisten müssen. Zuvor hatten sie zwei tote Dreifingerfaultiere (*Bradypus variegatus*) obduziert und dabei deren Zurrfasern untersucht.

Den Messungen zufolge sparen Faultiere durch ihre Eingeweidefasern bis zu 13 Prozent der Energie, die sie beim Kopfunterhängen sonst fürs Atmen aufbringen müssten. Das gilt insbesondere für vollgefressene Tiere, denn bei diesen kann bis zu einem Drittel des Körpergewichts an Urin und Kot auf das Zwerchfell drücken und das Atemholen erschweren. Die deutliche Energieeinsparung mache die Haltefasern zu einer lohnenden Einrichtung, schreiben die Forscher – trotz einiger Nachteile, etwa einer deutlich geringeren Beweglichkeit.

Biol. Lett. 10.1098/rsbl.2014.0172, 2014



Im Abhängen macht ihnen niemand etwas vor: Faultiere verbringen viel Zeit kopfunter.

SUZY ESZTERHAS / THE ROYAL SOCIETY PRESS RELEASE

Implantat aus Schweineblasen lässt Muskeln wieder wachsen

Mediziner um Brian Sicari von der University of Pittsburgh (USA) haben erfolgreich ein neues Implantationsverfahren getestet. Sie setzten Patienten, die viel Muskelmasse verloren hatten, Bestandteile von Schweineblasen an den entsprechenden Körperstellen ein. Bei entsprechendem Begleittraining führte dies dazu, dass drei von fünf Betroffenen die entsprechenden Gliedmaßen bald merklich besser und kraftvoller bewegen konnten.

Die neue Methode folgt einem aktuellen Trend in der Transplantationsforschung. Statt ganzer Organe wollen Mediziner künftig nur noch deren außerzelluläres Gerüst, die »extrazelluläre Matrix«, verpflanzen.

Sie lässt sich etwa aus den Organen von Schweinen gewinnen. Stammzellen des Patienten sollen dann dazu angeregt werden, die Matrix zu besiedeln und sich dort zu den gewünschten Zellarten auszudifferenzieren.

Die Forscher um Sicari wuschen aus Schweineblasen sämtliche Zellen heraus, so dass nur das Organgerüst übrig blieb. Teile davon setzten sie in beschädigtes Muskelgewebe von fünf Verletzungsoffern ein. Die Betroffenen hatten an verschiedenen Körperstellen jeweils zwischen 60 und 90 Prozent der Muskelmasse verloren. Bei allen lag der Verletzungszeitpunkt bereits Monate zurück.

Es folgten mehrere Monate Physiotherapie, um die so behandelten Muskeln zu beanspruchen – eine wichtige Maßnahme beim Wiederaufbau des Gewebes, meinen die Forscher, denn andernfalls könnten unerwünschte Zellen in das verpflanzte Organgerüst einwandern. Am Ende hatten sich Kraft und Einsatzfähigkeit der betroffenen Muskeln bei drei Patienten erheblich verbessert. Bei zwei Teilnehmern blieb der Erfolg aus, wohl wegen chronischer Durchblutungsstörungen auf Grund der Verletzung. Weitere Tests sind nötig, um das Potenzial der Methode genauer auszuloten.

Sci. Trans. Med. 6, 234ra58, 2014

SOZIOLOGIE

Reisanbau macht kooperativer

In (ost-)asiatischen Gesellschaften spielt das Gemeinschaftsdenken eine größere Rolle als in westlichen Zivilisationen, die eher individualistisch geprägt sind. Eine neue These, warum das so ist, haben Thomas Talhelm von der University of Virginia und seine Kollegen aufgestellt. Demnach rühren die kulturellen Unterschiede von der Art des Hauptnahrungsmittels her – beziehungsweise dem Aufwand, es zu produzieren. Laut den Forschern lasse

Weizenanbau die Menschen individualistischer denken, Reisanbau hingegen mache sie kooperativer.

Talhelms Team führte psychologische Tests mit 1162 Han-Chinesen durch. Darin prüften die Forscher kulturelle Neigungen, den Individualismus und die Loyalität der Teilnehmer gegenüber Freunden. Im Norden Chinas dominiert seit Generationen der Weizenanbau, im Süden hingegen der von Nassreis. Religion, Politik und Geschichte jedoch unterscheiden sich zwischen beiden Regionen nur wenig, und auch klimatische und sprachliche Differenzen gibt es zumindest entlang der Weizen-Reis-Grenze kaum – gute Voraussetzungen, um den kulturellen Einfluss der Nahrungsproduktion einzuschätzen.

Es zeigte sich, dass Gesellschaften von Reisproduzenten deutlich stärker miteinander verflochten sind als die von Weizenproduzenten. Das führen die Autoren auf die Erfordernisse des Nassreisanbaus zurück, der etwa doppelt so aufwändig ist wie der Weizenanbau, da er nur mit leistungsfähigen Bewässerungseinrichtungen und kollektiv koordinierten Anpflanzungs- und Ernteaktivitäten gelingt. Deshalb lässt sich die Reisproduktion nur in großen, eng kooperierenden Gruppen bewältigen – im Gegensatz zum Weizenbau, den auch Kleinfamilien leisten können.

Science 344, S. 603–608, 2014



FOTOLIA / DMITRY KALINOVSKY

Der Anbau von Reis ist aufwändiger als der von Weizen – und erzwingt vermutlich engere gesellschaftliche Bindungen.

ASTRONOMIE

Einsamer Planet oder eiskalter Brauner Zwerg?

Manchmal ist es nicht leicht, die Art eines Himmelskörpers zu ermitteln – etwa bei dem neu entdeckten Objekt WISE 0855-0714. Es ist 7,2 Lichtjahre von uns entfernt und damit ein Nachbar des Sonnensystems. Der Astronom Kevin L. Luhman von der Pennsylvania State University (USA) wurde darauf aufmerksam, als er Aufnahmen des Weltraumteleskops Wise untersuchte.

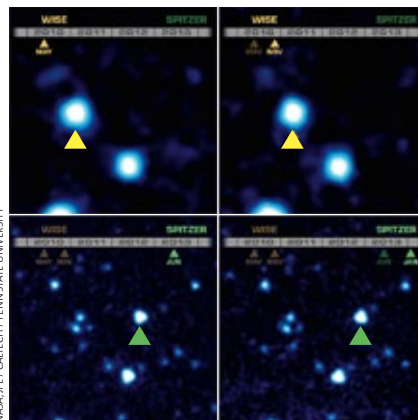
Auf den Bildern ist zu erkennen, dass WISE 0855-0714 im Verlauf mehrerer Monate gegenüber fernen Hintergrundsternen deutlich wandert. Der Himmelskörper hat eine Masse, die

schätzungsweise drei- bis zehnmals so groß ist wie die des Jupiters. Damit könnte er zu den Braunen Zwergen gehören. Diese sind zwar massereicher als planetare Gasriesen, aber zu leicht, um ein dauerhaftes Fusionsfeuer in ihrem Innern aufrechtzuerhalten. Allerdings geht aus den Spektren des

Himmelskörpers hervor, dass auf ihm Temperaturen von –48 bis –13 Grad Celsius herrschen. Damit wäre er der zurzeit kälteste bekannte Braune Zwerg. Deshalb und wegen der geringen Masse erscheint es auch möglich, dass WISE 0855-0714 ein frei wandernder Gasplanet ohne Mutterstern ist.

Laut den Teleskopaufnahmen besitzt der rätselhafte Himmelskörper unter allen bekannten Sternen und Braunen Zwergen die drittschnellste Eigenbewegung am Firmament. Möglicherweise gibt es noch zahlreiche weitere leuchtschwache Objekte im unmittelbaren Umfeld unseres Sonnensystems. Sie zu finden, ist eine der vielen Aufgaben des europäischen Astrometriesatelliten Gaia, der im Sommer dieses Jahres seinen Betrieb aufnehmen soll.

Astrophys. J. 786, L18, 2014



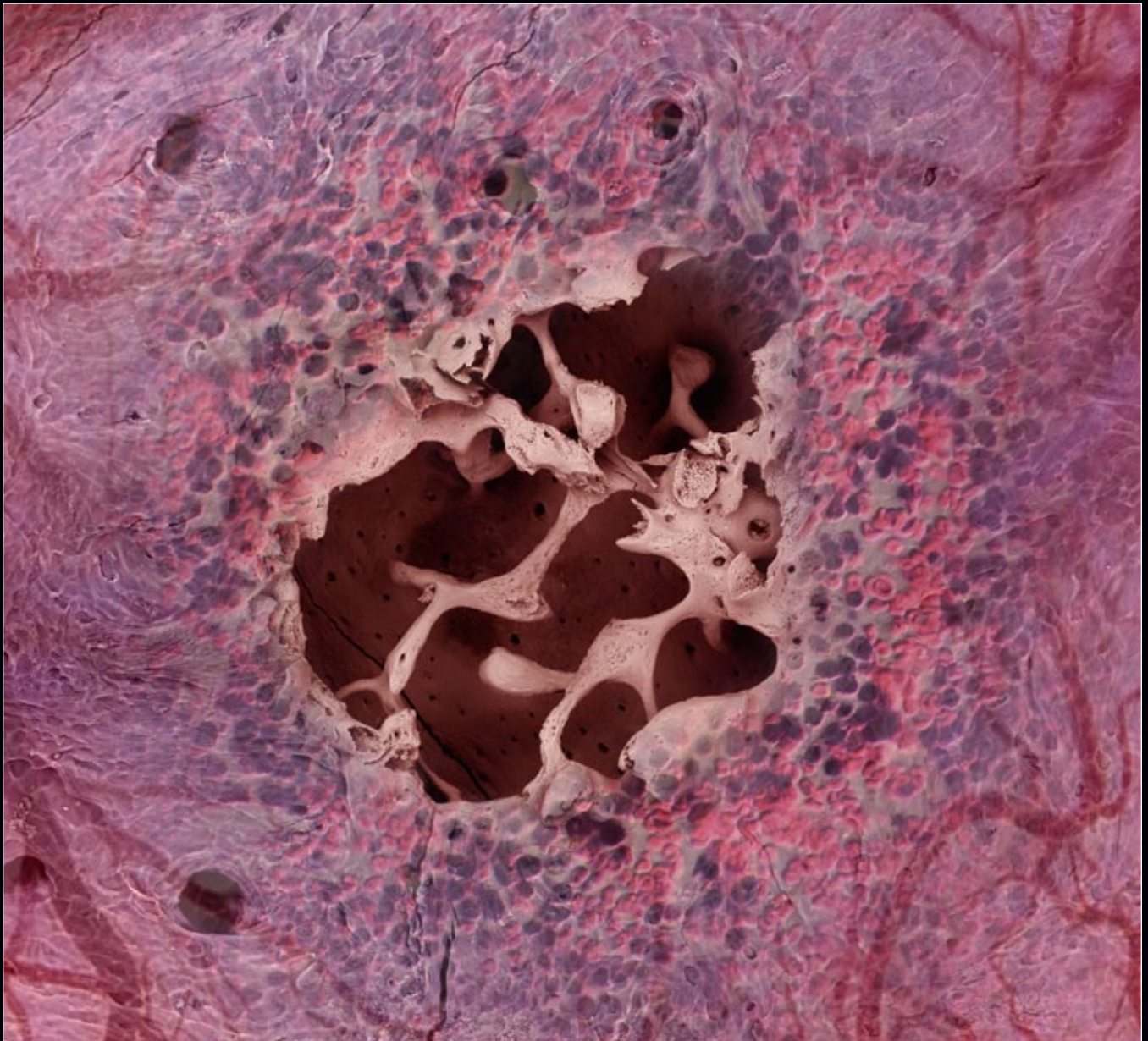
NASA, JPL / CALTECH / PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY

Aufnahmen der Weltraumteleskope Wise (oben) und Spitzer (unten) zeigen, dass der neu entdeckte Himmelskörper (Pfeile) relativ schnell am Nachthimmel wandert.

KNOCHENMARK AUF DEN CHIP GEBRACHT

Bisher lassen sich die Blutbildung mit ihrer Vielfalt an Zellen und andere Funktionen des Knochenmarks nur an lebenden Tieren untersuchen: Zu komplex sind der Aufbau und die Aufgaben des Systems. Nun aber gelang es Forschern an der Harvard University, Knochenmark auf einen Chip zu bringen. Sie hatten die Knochenstrukturen zuvor in Mäusen gezüchtet und dann transplantiert. Versorgt mit Nährstoffen, überlebte das Konstrukt in Kultur mindestens eine Woche, bildete Blutzellen und reagierte vergleichbar wie das natürliche Vorbild auf Bestrahlung und toxische Substanzen. Es bietet damit eine Alternative zu klassischen Tierversuchen.

Nat. Methods 10.1038/nmeth.2938, 2014



POPULATIONSDICHTE

Volkszählung unter Raubkatzen

Schweizer Forscher erproben neue Methoden, um mit Fotofallen die Luchsdichte in den Alpen abzuschätzen. Demnach waren die meisten bisherigen Berechnungen zu optimistisch.

VON KAI ALTHOETMAR

Anfang der 1970er Jahre wurden in der Schweiz die ersten Luchse wieder angesiedelt. Ihr Bestand hat sich seitdem vermehrt und ausgebreitet. Doch noch geben Wildtierökologen keine Entwarnung: Die Populationen sind klein und entsprechend labil. Angaben, wie viele Luchse derzeit durch die Schweizer Berge streifen, beruhen auf recht unsicheren Schätzungen.

Denn es ist knifflig, die scheuen, einzelgängerischen Raubkatzen in freier Wildbahn zu zählen, da sie oft weite Gebiete durchstreifen. Seit etlichen Jahren erleichtern automatische Kamerafallen diese Arbeit. Hierfür müssen sich die Tiere auf den Fotos individuell unterscheiden lassen. Das gefleckte Fell der Luchse macht dies bei entsprechender Positionierung der Apparate relativ leicht möglich – jedes Tier trägt sein eigenes Muster. Am besten werden an einem Platz gleich mehrere Kameras aufgebaut. »Wiederfänge« am selben oder an anderen Orten lassen dann Rückschlüsse auf das räumliche Verhalten dieses Individuums zu. Und aus der Anzahl verschiedener fotografiertes Tiere versucht man die Populationsdichte zu ermitteln.

Aber die übliche Datenauswertung bei dieser Fang-Wiederfang-Methode (englisch: Capture Recapture, CR) ist offenbar nicht wirklich zuverlässig. Zwar stützen sich darauf bislang die meisten Bestandserhebungen an gefleckten Großkatzen wie Luchs, Tiger, Leopard oder Jaguar. Doch nun wiesen Schweizer Biologen der in Muri bei Bern ansässigen Forschungsstelle »KORA – Raubtierökologie und Wildtiermanagement« am Beispiel von Luchsen in den Alpen nach, dass der nach einfacher Zählung

errechnete Tierbestand stark mit der Größe des erfassten Gebiets schwankt (*Integrative Zoology* 8, S. 232–243, 2013). KORA steht dabei für: koordinierte Forschungsprojekte zur Erhaltung und zum Management der Raubtiere in der Schweiz.

Die Forscher um den Raubtierökologen Fridolin Zimmermann hatten Fotofallen über ein ausgedehnteres Untersuchungsgebiet verteilt als wegen des immensen damit verbundenen Aufwands normalerweise üblich. Es lag zwischen dem Genfer und dem Thuner See und umfasste 760 Quadratkilometer. Die Fotojäger stellten an 54 Standorten Kameras auf. 34 davon ertappten Luchse – insgesamt 78 Mal. 19 verschiedene erwachsene Tiere ließen sich identifizieren, von denen 15 mehrmals auftauchten.

Fehleinschätzungen bis zum Dreifachen

Von dem gesamten Gebiet werteten die Wissenschaftler dann verschieden große Abschnitte aus und verglichen die jeweils hochgerechnete Bestandsdichte. Und sie stellten fest: Beschränkten sie sich auf ein eher kleines Areal, gaukelten ihnen die Bilder viel mehr Luchse pro Quadratkilometer vor, als wenn sie eine wesentlich größere Region erfassten.

Die ermittelte Populationsdichte stieg dadurch bis zum Dreifachen. Das Forscherteam erklärt sich dies mit Revierüberlappungen: Ist das Untersuchungsgebiet zu klein, würden überproportional viele umherstreifende Luchse aus Nachbarrevieren auftauchen und die Fotostatistik verzerren. Dieser Effekt verschwindet bei einem

größeren dokumentierten Areal zunehmend. Zimmermann vermutet, dass deswegen viele vorliegende Studien an Großkatzen mit Riesenrevieren auf zu hohe Bestandsdichten kamen. Das könnte etwa für Geparden und Sibirische Tiger gelten, aber auch für Leoparden in beutearmen Gegenden. In Amerika wiesen Forscher dies kürzlich für den Jaguar nach (*Biological Conservation* 159, S. 109–118, 2013).

Mit einer verfeinerten Auswertung, die auf einem erweiterten Verfahren (Spatial Capture Recapture, SCR, genannt) basiert, wurden die Ergebnisse der Schweizer Studie allerdings zuverlässiger. Hierbei erstellten die Forscher zusätzlich grobe Bewegungsprofile von solchen Tieren, die mehrfach und auch an verschiedenen Orten erfasst worden waren. Computerprogramme errechneten das mutmaßliche Revierzentrum jeder Katze sowie anhand einer Wahrscheinlichkeitsverteilung die Populationsdichte. Dieses Berechnungsmodell lieferte so gut wie keine Dichteunterschiede zwischen größeren oder kleineren Arealen. Auch die Anzahl der Kameras zu ändern, wirkte sich nicht aus.

In der Praxis ist es oft kaum möglich, riesige Gebiete mit ausreichend Fotofallen auszustatten und diese zu kontrollieren. Dort, wo sich in der Schweiz bisher Luchse angesiedelt haben, kommen auf 100 Quadratkilometer nur ein bis drei erwachsene Tiere, in Skandinavien wegen knapper Beute noch weniger. Nach den Erfahrungen der KORA-Forscher braucht man für eine aussagekräftige Bestandserhebung von jedem Luchs wenigstens 20 Fotokontakte.

Einer solchen Verfälschung durch Revierüberlappungen versuchen Wild-



FOTO: KORA (WWW.KORACH)

biologen vorzubeugen, indem sie in CR-Modellen eine Pufferzone zum Untersuchungsgebiet addieren. Dafür berechnen sie anhand der registrierten Aufenthaltsorte eines Tiers die größte von ihm zurückgelegte Entfernung zwischen den Messpunkten und vergrößern die hieraus abgeleitete Fläche um 50 oder 100 Prozent. Doch auch hierbei kann ein zu kleines Untersuchungsgebiet geringere Distanzen vortäuschen, als dieser Luchs tatsächlich zurücklegt – weil sein Streifgebiet eben doch noch darüber hinaus reicht.

Einfluss der Landschaftsstruktur

Ein Manko bei den Erhebungen ist, dass Biologen sich zuweilen für die Fotofallen kleine Idealhabitate herauspicken, von denen sie einigermaßen sicher annehmen, dass Luchse dort vor die Kameras laufen. Sie vernachlässigen so aber stärker fragmentierte und vom Menschen veränderte Lebensräume, die diese Raubkatzen seltener aufsuchen – und erhalten dann zu hohe Zahlen für die Durchschnittsdichte. Außerdem wählen auch Raubkatzen erfahrungsgemäß möglichst bequeme

Eine Fotofalle in den Schweizer Bergen zwischen Genfer und Thuner See erwischte diesen Luchs auf nächtlicher Pirsch.

Wege. Deswegen installierte das KORA-Team die Kameras bevorzugt an Forststraßen und Wanderpfaden, und zu ihnen hin trampelten die Mitarbeiter von verschiedenen Seiten her Pfade in den Schnee.

Doch auch die SCR-Modelle haben ihre Schwachstellen, weil sie die Landschaftsstrukturen und damit die bevorzugten Laufwege der Tiere nicht berücksichtigen. Neue Modellierungen von Forschern des Patuxent Wildlife Research Center in Laurel (Maryland) sollen Abhilfe schaffen (*Ecology* 94, S. 287–294, 2013).

Die KORA-Forscher verweisen auf eine weitere Schwierigkeit mancher Studien zu den Populationsdichten: Erstreckt sich eine Datenerhebung über einen zu langen Zeitraum, umfasst sie etwa mehrere Jahreszeiten, verfälschen saisonale Ereignisse die Zahlen – wie Geburten, Todesfälle oder Wanderbewegungen. Deshalb zählten sie die Luchse für ihre Studie nur

während zweier Monate mitten im Winter, als weder Junge geboren wurden noch Halbwüchsige neue Reviere suchten.

Untersuchungsgebiete sollten ihnen zufolge zukünftig wenigstens 20 Reviere abdecken. Erst dann ließen sich Populationszuwächse oder -abnahmen einigermaßen zuverlässig erkennen. Nach der letzten Schätzung von 2011 nach der alten Methode leben in der Schweiz derzeit 158 erwachsene oder halbwüchsige Luchse, davon 107 in den Alpen und 51 im Jura. Die Zahlen würden sich mit den neuen Berechnungsmodellen vermutlich nach unten verschieben. Wichtiger noch wäre für Schutzmaßnahmen allerdings zu wissen, wohin sich der Bestand entwickelt. Dafür bräuchte man laut Zimmermann Vergleichszahlen über mindestens fünf Jahre.

Kai Althoetmar ist Wissenschaftsjournalist in Bad Münstereifel.

KOSMOLOGIE

Als Einstein noch nicht vom Urknall überzeugt war

Überraschend zeigt ein lange unbeachtetes Manuskript, dass Albert Einstein 1931 über Alternativen zur Urknalltheorie nachsann. Viel früher als Steady-State-Kosmologen wie Fred Hoyle, Hermann Bondi und Thomas Gold stellte er sich ein expandierendes Universum vor, in dem unablässig neue Materie entsteht.

VON GEORG WOLSCHIN

Die Theorie vom Urknall ist nicht nur in der wissenschaftlichen Kosmologie, sondern auch in der breiteren Öffentlichkeit weit gehend akzeptiert. Ähnliches gilt für ihre wichtigste Erweiterung, der zufolge das Universum unmittelbar nach seiner Entstehung durch eine ultrakurze, inflationäre Phase gegangen ist. Ein Unbehagen bleibt dennoch: Die Vorstellung einer explosionsartigen, exponentiellen Ausdehnung des Raums (die so genannte Inflation) im Gefolge einer Urknallsingularität (einem mathematischen Punkt ohne Ausdehnung, aber mit unendlich großer Energiedichte) ist zumindest gewöhnungsbedürftig.

Seit Kurzem jedoch behaupten Forscher sogar, experimentelle Belege für die Inflation entdeckt zu haben. Das am Südpol installierte BICEP2-Teleskop hat vielleicht Hinweise auf Gravitationswellen aus der Inflationsphase gefunden (siehe SdW 5/2014, S. 14). Allerdings sind diese Ergebnisse bislang nicht abgesichert; bis zu ihrer unabhängigen Überprüfung ist es noch ein weiter Weg, unter anderem bleibt denkbar, dass Staub in der Galaxis das behauptete kosmo-

logische Resultat nur vortäuscht, wie etwa Hao Liu, Philipp Mertsch und Subir Sarkar, ein Theoretikerteam aus Stanford beziehungsweise Kopenhagen, in einer Onlinepublikation erörterten (arXiv:1404.1899, siehe auch Kasten S. 16). Grundsätzliche Zweifel an der Theorie könnte aber auch dieser Fall nicht auslösen, schließlich würde es sich nur um ein Messproblem handeln.

Trotzdem lohnt ein Blick auf mögliche Gegenmodelle, und sei es nur, um uns der Entstehungsgeschichte unseres gegenwärtigen Weltbilds noch einmal zu versichern. Überraschenderweise setzt sich ein kürzlich aufgespürtes Manuskript Albert Einsteins – des Schöpfers jener Feldgleichungen, die den gängigen kosmologischen Theorien zu Grunde liegen – tatsächlich mit einer Alternative zum Urknallmodell auseinander. Das handschriftliche und undatierte vierseitige Original trägt den Titel »Zum kosmologischen Problem« und stammt vermutlich aus dem Jahr 1931. Es gehört schon lange zum Bestand des Archivs der Hebräischen Universität in Jerusalem. Bisher sah man es aber irrtümlich als Vorläufer zu Einsteins im selben Jahr

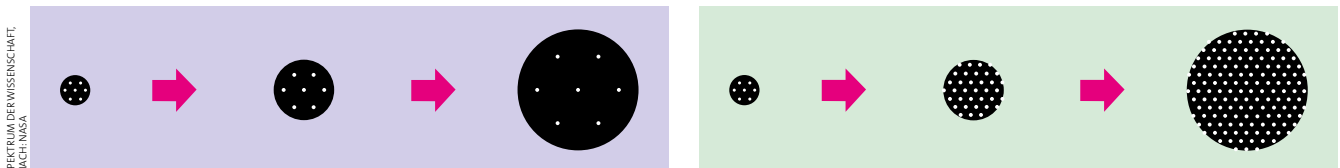
publizierter Arbeit »Zum kosmologischen Problem der allgemeinen Relativitätstheorie« (Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1931, S. 235–237) an – und ignorierte es.

Zeitgleiche Erkenntnis

Nun haben unabhängig voneinander die Physiker Cormac O’Raifeartaigh aus Irland und Harry Nussbaumer aus Zürich seine wissenschaftshistorische Bedeutung erkannt. O’Raifeartaigh hat gemeinsam mit Brendan McCann eine Arbeit im »European Physical Journal« veröffentlicht (H 39, S. 63–85, 2014; dort reichten die Autoren bereits eine weitere Publikation ein), während Nussbauers Onlineveröffentlichung (arXiv:1402.4099) in den »Acta Historica Astronomiae« erscheinen soll.

Vieles weist darauf hin, dass Einstein das Manuskript während seiner Reise zum California Institute of Technology in Pasadena verfasst hatte, wo er mit dem Theoretiker Richard Tolman im Januar und Februar 1931 intensiv über kosmologische Fragen diskutierte. Ende Januar besuchte er auch Edwin Hubble am nahen Mount Wilson Observatory (Foto oben). Zu diesem Zeitpunkt war ihm bereits bewusst, dass sein Universum, das er in den Feldgleichungen von 1917 noch mit Hilfe eines »kosmologischen Glieds« – auch als kosmologische Konstante bekannt – als statisch zu kopieren versucht hatte, nicht der Realität

Am Anfang war der Urknall. In dessen Verlauf entsteht Materie, deren Dichte mit der Expansion des Universums immer weiter abnimmt (unten links). Die Steady-State-Theorie behauptet dagegen, dass überall dort, wo die Materiedichte während der Expansion abnimmt, aus Energie neue Materie entsteht (unten rechts). Sie macht aber keine Angaben darüber, aus welchem Anfangszustand das Universum in diesem Fall hervorgeht.



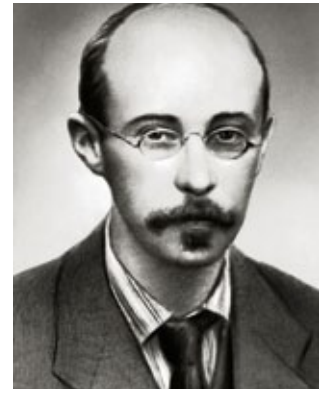
SPERKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH NASA



COURTESY OF THE ARCHIVES, CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



PUBLIC DOMAIN



PUBLIC DOMAIN

Von der Vorstellung eines expandierenden Universums war Albert Einstein (Foto oben, mit Edwin Hubble und Walter Adams, v.l.n.r.) nach Vesto Sliphers (Foto Mitte) Entdeckung der Rotverschiebung von Licht ferner Galaxien und dank der Beobachtungsda-

ten von Hubble spätestens ab 1931 überzeugt. Bereits 1922 hatte der russische Physiker und Mathematiker Alexander Friedman (Foto rechts) gezeigt, dass Einsteins Feldgleichungen dieses auch korrekt zu beschreiben vermögen.

tät entsprach. Das zeigt unter anderem ein Interview, das er der »New York Times« am 2. Januar 1931 gab.

Unsere Vorstellung von einem expandierenden Universum verdankt sich Vesto Sliphers Beobachtungen der so genannten kosmologischen Rotverschiebung des Lichts entfernter Galaxien. Dieses Phänomen, das Slipher zwischen 1912 und 1917 am Lowell Observatory in Arizona untersucht hatte, gilt als Hinweis darauf, dass die elektromagnetischen Wellen einen sich ausdehnenden Raum durchquert haben müssen, bevor sie auf unsere irdischen Detektoren treffen. In den Jahren von 1929 bis 1931 erkannten dann Edwin Hubble und Milton Humason, dass zwischen der Entfernung von Galaxien und ihrer »Fluchtgeschwindigkeit« ein linearer Zusammenhang besteht. Auf dieser empirischen Basis formulierten der russische Physiker George Gamov und andere schließlich das Urknallmodell.

Nach der Entdeckung der Raumexpansion verwarf Einstein das kosmologische Glied wieder: In seinen Feldgleichungen hatte es die Funktion einer antigravitativen Komponente, die der anziehenden Gravitation entgegenwirken und seiner Ansicht nach für die Stabilität des Universums sorgen sollte – nun war es verzichtbar geworden. Mathematisch war die Sache ohnehin längst geklärt. Der russische Physiker

Alexander Friedman hatte als Erster darauf hingewiesen, dass Einsteins statisches Universum instabil war. Und bereits 1922 hatte er in seiner Arbeit »Über die Krümmung des Raumes« gezeigt, dass Einsteins Feldgleichungen auch ein expandierendes Universum beschreiben können. Einstein widersprach zwar, ließ sich später aber doch überzeugen. In einer späteren Diskussion mit George Gamov nannte er das kosmologische Glied dann sogar seinen »biggest blunder«, seine größte Eselei.

Altersloses Universum

Das neu entdeckte Manuskript zeigt nun, dass Einstein dennoch weiter mit dem kosmologischen Glied experimentierte – diesmal, um ein so genanntes Gleichgewichtsmodell (»steady state«) zu entwickeln. Ein Steady-State-Universum expandiert gemäß den beobachteten Rotverschiebungen, seine mittlere Materiedichte bleibt aber unverändert, da im ganzen Raum kontinuierlich neue Materie aus der so genannten Vakuumenergie entsteht. Teilchen, die »ihren« Raumbereich verlassen und so zur Expansion beitragen, werden damit durch neu erzeugte Teilchen ersetzt. Das kosmologische Glied diente Einstein nun nicht mehr dazu, (vermeintlich) ein statisches Universum zu garantieren, sondern stellte stattdessen die zur Teilchenerzeugung notwendige Energie bereit. So hoffte er, sein stati-

ches Modell in eines zu überführen, in dem ein dynamisches Gleichgewicht zwischen Expansion und Materieproduktion herrscht – ein quasi altersloses Universum von unbegrenzter Dauer, das auf großen Skalen stets gleich aussieht.

Als er wenige Tage später einen Rechenfehler im Manuskript korrigierte, wurde ihm allerdings klar: Die von ihm zunächst gefundene Beziehung zwischen der mittleren Dichte des Universums und dem Parameter, der seine Expansion und damit indirekt auch die Teilchenerzeugung bestimmte, war falsch und verlor in der neuen Fassung jegliche physikalische Aussagekraft.

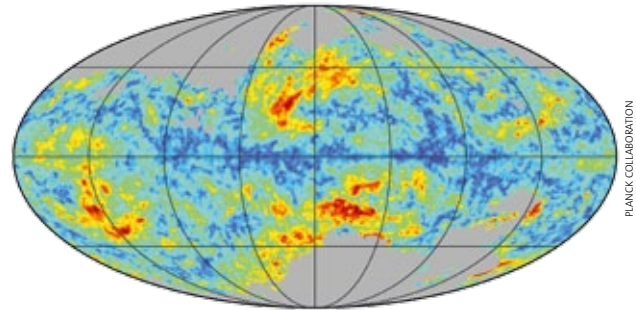
Der erste Anlauf, ein Steady-State-Universum zu beschreiben, war also gescheitert – wohl deshalb blieb das Manuskript unpubliziert. Weil Einstein anschließend keine weiteren Versuche in dieser Richtung unternahm, blieb die Arbeit auch ohne direkten Einfluss auf die Entwicklung der Kosmologie. Erst 17 Jahre später entwarfen dann Fred Hoyle sowie Hermann Bondi und Thomas Gold die ersten detaillierteren Steady-State-Theorien und publizierten sie im Verlauf des Jahres 1948 in den »Monthly Notices of the Royal Astronomical Society«. Insbesondere Hoyle legte die Feldgleichungen ohne kosmologisches Glied zu Grunde, führte aber stattdessen einen neuen Term ein, der die Teilchenerzeugung beschrieb. So vermied er die

Zweifel an BICEP-Daten

Lassen sich im kosmischen Mikrowellenhintergrund Hinweise auf Gravitationswellen aus der Phase der Inflation entdecken, die das Universum unmittelbar nach dem Urknall vermutlich durchlief? Ja, schlossen Forscher jüngst aus Daten des BICEP2-Teleskops am Südpol. Die Meldung ging um die Welt, nachdem die Ergebnisse am 17. März auf einer Pressekonferenz des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und zeitgleich auf dem Onlineserver arXiv vorgestellt worden waren. Schon Tage später wurden aber Zweifel laut (SdW 5/2014, S. 14). Diesen zufolge könnten die Polarisationsmuster im Mikrowellenhintergrund auch von Staub in der Milchstraße oder von Synchrotronstrahlung stammen. Letztere entsteht, wenn schnelle geladene Teilchen aus ihrer geraden Bahn abgelenkt werden.

Am 5. Mai haben neue Daten die Diskussion weiter befeuert (arXiv:1405.0871). Auf Basis von Messungen des Satelliten Planck konnten Forscher eine Karte erstellen, welche die durch Streuung an Staub in der Milchstraße hervorgerufene Polarisation der Strahlung zeigt. Diese Vordergrundstrahlung überlagert die von außerhalb der Milchstraße stammenden Signale, für die sich das BICEP-Team interessiert, und muss daher aus den Messdaten herausgerechnet werden. Zum Pech der BICEP-Forscher erwies sich der Anteil polarisierter Strahlung in den Planck-Daten als unerwartet groß. Für ihre eigenen Berechnungen hatten sie sich noch auf Modelle und vorläufige Daten verlassen, die niedrigere Werte nahelegen. Möglicherweise sind sie also tatsächlich einem Vordergrundeffekt aufgesessen.

Zwei Forscher der University of California, Berkeley, Michael J. Mortonson und Uroš Seljak, kommen in einer Onlinepublikation vom 22. Mai (arXiv:1405.5857) sogar zu dem Schluss, dass sich die BICEP-Ergebnisse auf Basis der neuen Planck-Messungen wohl ohne Bezug auf Gravitationswellen erklären lassen. Allerdings



Der Satellit Planck hat jüngst Messdaten zur Vordergrundstrahlung geliefert, die von Staub in der Galaxis ausgeht und im Rahmen des BICEP-Experiments als Störfaktor gilt. Die Farben stehen für die von blau über gelb nach rot zunehmende Größe ihres polarisierten Anteils. Für die grauen Bereiche ließen sich bisher keine aussagekräftigen Daten ermitteln.

schließen sie nicht aus, dass die Daten nicht vielleicht doch Hinweise auf Gravitationswellen enthalten.

Die entscheidenden Daten fehlen trotzdem noch: Die Planck-Forscher klammern ausgerechnet diejenige Himmelsregion aus, durch die BICEPs Sichtlinie führt. Böser Wille ist dabei nicht im Spiel, vielmehr liegt der Grund darin, dass sich das BICEP-Team gezielt eine Region ausgesucht hatte, in der besonders wenig Vordergrundstrahlung zu erwarten ist – so wenig offenbar, dass ihr Signal bisher im Rauschen der Planck-Instrumente verschwindet.

Übrigens ist die Onlinepublikation noch immer nicht in einem regulären Fachjournal erschienen (Stand 3. Juni). Ob die Arbeit abgelehnt wurde oder ob die Gutachter besondere Sorgfalt walten lassen wollen, bevor sie ihr ihren Segen geben, darüber lässt sich bislang nur spekulieren.

inkonsistenten Resultate, wie sie Einstein erhalten hatte. Tatsächlich erfreute sich das Steady-State-Universum einige Zeit lang einer gewissen Popularität. Es wurde aber weit gehend obsolet, als Arno Penzias und Robert Wilson 1965 die kosmische Hintergrundstrahlung nachwiesen und damit nachhaltig das Urknallmodell stärkten.

1998 kehrte die kosmologische Konstante überraschend wieder in die Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie zurück. Zwei Beobachtergruppen hatten bei der Vermessung ferner Supernovae unabhängig voneinander festgestellt, dass sich die Expansion des Universums seit etwa fünf Milliarden Jahren beschleunigt. Der Abbremsung durch die zwischen den Galaxien

herrschende Schwerkraft scheint also eine antigravitative Kraft entgegenzuwirken. Ergänzende Beobachtungen zum Beispiel ferner Galaxienhaufen und der Fluktuation des Mikrowellenhintergrunds sichern diesen 2011 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichneten Befund inzwischen sehr gut ab.

Die Kosmologen führten darum das Konzept einer Dunklen Energie ein: eine gleichmäßig im All verteilte Energieform, die der Schwerkraft entgegenwirkt. Je nach ihren noch genauer zu bestimmenden Eigenschaften könnte sie sich tatsächlich sehr gut durch Einsteins kosmologische Konstante beschreiben lassen. Allerdings gibt es weiterhin denkbare Alternativen, wie etwa eine zeitlich veränderliche und mit ei-

nem neuen skalaren Feld verknüpfte Dunkle Energie. Einige Forscher gehen zudem davon aus, dass vielleicht die grundlegenden Gravitationsgleichungen verändert werden müssen. Zwar haben sie sich auf kleineren Skalen stets als korrekt erwiesen, aber über kosmologische Distanzen hinweg ist ihre Gültigkeit streng genommen nur eine unüberprüfte, wenn auch plausible Vermutung. Und schließlich dürfen wir nicht vergessen, dass es vor allem darum geht, endlich auch die noch unbekanntem physikalischen Mechanismen hinter den mathematischen Formeln zu entschlüsseln.

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

Molekulares Suchbild

Um bislang unheilbare Krankheiten in den Griff zu bekommen, suchen Forscher nach so genannten Biomarkern. Das gestaltet sich bis heute meist sehr langwierig und schwierig – trotz beachtlicher methodischer Fortschritte.

VON HEIDRUN RHODE

Kränkheiten wie Krebs oder Alzheimer geben uns heute noch viele grundlegende Rätsel auf. Um diese zu lösen, suchen Forscher spezifische, charakteristische Kennzeichen für jede Erkrankung. Dabei handelt es sich etwa um veränderte Gene, Eiweiße oder kleinere Moleküle wie Stoffwechselprodukte. Solche »Biomarker« können nicht nur die Diagnose einer Erkrankung ermöglichen, sondern auch einen Hinweis auf ihre Ursachen beinhalten und damit oft bereits therapeutische Ansatzpunkte sichtbar machen. Doch wie sucht man nach etwas, was man nicht kennt?

Verglichen mit der Jagd auf Biomarker ist die sprichwörtliche Suche nach der Nadel im Heuhaufen ein relativ einfaches Unterfangen. Denn dort weiß man wenigstens, wonach man Ausschau hält. Die Biomarkerforschung gleicht prinzipiell eher den bekannten Fehlersuchbildern: Es gilt zwei riesige »Heuhaufen« zu vergleichen, das heißt Proben von kranken und gesunden Personen auf Unterschiede in ihren Bestandteilen hin zu untersuchen. Dies geschieht heute vor allem mit Hilfe der Massenspektrometrie (Abkürzung MS; siehe Kasten rechts).

Grundsätzlich läuft die Biomarkerforschung in mehreren Etappen ab. Sie beginnt mit der Gewinnung, Vorbereitung und Analyse von Proben. Substanzen, die in dieser »Discovery«-Phase deutliche Unterschiede bei Kranken und Gesunden zeigen, gelten fortan als Biomarkerkandidaten. Da man bis zu diesem Zeitpunkt nach allen Abweichungen fahndet, finden sich auch viele individuelle darunter, die nichts mit der Erkrankung zu tun haben. Deshalb schließen sich nun die Validierung und die klinische Prüfung an. Hier werden

echte krankheitstypische Biomarker schrittweise herausgefiltert, was jeweils eine große Anzahl von Proben erfordert.

Jede Etappe hat dabei ihre eigenen Herausforderungen. Oft sucht man ja Biomarker, weil ein sicheres Diagnostikum noch fehlt. Daher kann es passieren, dass einer der ausgewählten

Patienten vielleicht gar nicht an der vermuteten Krankheit leidet oder zusätzliche Störungen aufweist. Versuchtiermodelle oder Zellkulturen bilden wiederum die komplexe menschliche Erkrankung möglicherweise nicht in allen Facetten ab. Außerdem können sich bereits geringste Ungenauigkeiten bei den Arbeiten fortpflanzen und

Massenspektrometrie – ein Überblick

Die Massenspektrometrie (MS) ist ein Verfahren, mit dem sich Moleküle identifizieren lassen. Dazu wird die zu untersuchende Substanz bei der klassischen MS zunächst in eine Ionisierungskammer eingebracht und dort unter Vakuum möglichst schonend verdampft. Sie tritt durch einen Spalt aus, wo sie auf einen Strahl stark beschleunigter Elektronen trifft. Dieser schlägt aus den gasförmigen Molekülen ein Elektron heraus – positiv geladene Molekülonen entstehen. Für biologische Stoffe benutzt man schonendere Verfahren wie die Elektrosprayionisation. Hierbei wird die Substanz in Lösung gebracht, die dann an einer Kapillare, an der eine Hochspannung anliegt, sehr fein zerstäubt. Dadurch entstehen Tröpfchen, die jeweils nur ein oder wenige zu analysierende Ionen enthalten.

Danach gelangen die Ionen durch den zweiten Spalt in ein starkes elektrisches Feld. Das beschleunigt sie durch einen weiteren dritten Spalt zum eigentlichen Analysator, wo ein magnetisches Feld senkrecht zur Flugbahn die eintretenden Ionen auf einer Kreisbahn ablenkt. In Abhängigkeit von ihrer Masse und elektrischen Ladung (genauer: ihrem Masse-Ladung-Verhältnis m/z) treffen die Teilchen an unterschiedlichen Positionen des Ionendetektors oder nach verschiedenen langen Flugzeiten auf und erzeugen so ein charakteristisches Spektrum. Kennt man die Ladung, lässt sich auch die Masse der Teilchen bestimmen.

In der modernen MS haben sich neue Verfahren der Ionisierung und Massenanalyse durchgesetzt, insbesondere bei der Untersuchung von Biomolekülen wie Peptiden, Proteinen, Oligonukleotiden und Oligosacchariden. Die verfeinerten Methoden haben dazu geführt, dass man heute in der Lage ist, kleinste Substanzmengen zu analysieren – und das bei einem hohen Probendurchsatz, in sehr kurzer Zeit und mit großer Genauigkeit. In komplizierten Fällen sind allerdings zuvor eine sehr zeit- und arbeitsintensive Probenbearbeitung sowie oft wiederkehrende Sortierschritte erforderlich. Denn selbst die leistungsfähigsten Massenspektrometer können die Probenbestandteile nicht gleichzeitig analysieren, sondern nur nacheinander, einzeln oder in kleinen Gruppen. Aber mittlerweile ist die MS in der Lage, Stoffe zu identifizieren und zu messen, die noch niemand zuvor in ähnlichen Proben nachgewiesen hat.

Schlechte Zeiten für Tellerwäscher

Neue Analyse historischer Daten belegt wachsendes Sozialgefälle.

Wir Menschen sind nicht alle gleich, und das ist auch gut so. Nicht jeder wird als Genie geboren, nicht alle können als Fußballstar, Schönheitskönigin oder Millionär reüssieren. Ansehen, Einkommen und Besitz sind höchst inhomogen verteilt. Es gibt Reiche und Arme – aber wer will schon arm bleiben? Ungleichheit, so heißt es darum, schafft produktive Anreize für das Streben nach sozialem Aufstieg; sie hält die Gesellschaft in Schwung und die Wirtschaft in Gang.

Dieses Ideal einer freien Wettbewerbsgesellschaft setzt freilich voraus, dass die Menschen nicht bloß unterschiedlich auf die Welt kommen, sondern auch sozial beweglich bleiben. Der Tellerwäscher muss im Prinzip zum Millionär aufsteigen können, wenn er nur entschlossen genug danach strebt. So steht und fällt das Ideal mit der Antwort auf die Frage: Welche Chancen haben Arme, nicht arm zu bleiben?

Die individuelle Aufstiegschance hängt wiederum eng mit der vorhandenen Verteilung des Reichtums zusammen. Befinden sich fast sämtliche Vermögen im Besitz ganz Weniger, werden sich die Meisten kaum reelle Chancen ausrechnen, jemals durch ihrer Hände – und ihres Kopfes – Arbeit zu Wohlstand zu gelangen. Eine allzu große Diskrepanz bei Einkommen und Reichtum wirkt nicht nur lähmend auf das Wirtschaftsleben ganzer Länder, sondern führt auch, wie derzeit an vielen Punkten der Erde zu beobachten ist, zu sozialen Unruhen bis zum Bürgerkrieg.

Ungleichheit ist offenbar eine brisante Größe, die zwar in Maßen nützt, aber im Übermaß schadet. Also wüsste man gern, wodurch sie beeinflusst ist und wie sie sich wohl mit der Zeit entwickeln wird. Deshalb stoßen die Forschungen zur Einkommensverteilung, die der Wirtschaftswissenschaftler Thomas Piketty von der Paris School of Economics durchführt, weltweit auf großes Interesse. Das US-Wissenschaftsmagazin »Science« hat dem Thema kürzlich sogar einen Heftschwerpunkt gewidmet, in dessen Rahmen der französische Ökonom zusammen mit seinem US-Kollegen Emmanuel Saez von der University of California in Berkeley langfristige Trends der Einkommens- und Reichtumsentwicklung in Europa und den USA analysiert (*Science* 344, S. 838 – 843, 2014).

Piketty erstellt seit einem Jahrzehnt mit einem internationalen Team die »World Top Incomes Database«, nach seinen Worten die umfassendste Datensammlung über die historische Entwicklung der Einkommensungleichheit. Seine heiß diskutierte Folgerung besagt grob vereinfacht: Kapital hat sich mit der Zeit in wenigen Händen konzentriert, weil es tendenziell mehr Gewinn abwarf, überschüssiges Geld zur Bank zu tragen statt damit ein produzierendes Unternehmen zu gründen. Dadurch entstand ein »patrimonialer« – auf erbtem Reichtum beruhender – Kapitalismus. Laut Piketty bildete nur die Periode von 1920 bis 1970 eine Ausnahme: Damals wurde nach den Zerstörungen durch die beiden Weltkriege ungewöhnlich viel frisches Kapital für den Wiederaufbau gebraucht. Doch seither dominieren erneut Konzentrationsprozesse, welche die vorhandene Ungleichheit noch verstärken.

Die Debatte über Pikettys These kreist vor allem um die Frage, ob die Zeit nach den beiden Weltkriegen in der kapitalistischen Entwicklung wirklich nur eine Ausnahme gewesen ist. Wenn Piketty Recht hat – und danach sieht es momentan aus –, gibt es einen quasi naturgegebenen Trend zu immer krasserer Ungleichheit. Dagegen müsste wohl die Politik regulierend eingreifen – etwa so, wie die USA unter Präsident Roosevelt mit dem arbeitnehmerfreundlichen »New Deal« auf die Weltwirtschaftskrise der 1930er Jahre reagierten, indem sie unter anderem den Spitzensteuersatz drastisch anhoben.



Michael Springer

das Endergebnis gravierend verfälschen.

Dies zeigte unsere Arbeitsgruppe am Universitätsklinikum Jena rechnerisch auf: Angenommen, bei der Bearbeitung sind 15 Schritte notwendig – oft sind es sogar sehr viel mehr –, und bei einer der Proben treten bei jedem Schritt zehn Prozent Abweichung auf. Rein mathematisch ist dann auch bei identischem Probenmaterial am Ende eine Abweichung ums Vierfache zu erwarten. Die in der Praxis wahrscheinlichere, stochastische Fehlerverteilung kann immer noch das Endresultat fast ums Zweifache verbiegen, was dann vielleicht fälschlicherweise als Biomarker interpretiert wird (*Analytica Chimica Acta* 776, S. 1–10, 2013). Und in der abschließenden Validierungsphase kann das Sammeln von ausreichend großen Probenzahlen die Forscher vor große Schwierigkeiten stellen, vor allem wenn es sich um seltene Krankheiten handelt.

Stehen wir überhaupt vor dem richtigen Heuhaufen?

Überdies weiß zu Beginn niemand, in welcher Stoffgruppe die geeignetsten Biomarker zu finden sind – ob es sich um Eiweiße, niedermolekulare Stoffwechselprodukte (Metaboliten) oder etwas ganz anderes handelt. Die Probenbearbeitung und massenspektrometrische Analyse unterscheiden sich für Proteine und Metabolite erheblich. Man kann heute noch nicht gleichzeitig und umfassend nach beiden Stoffgruppen suchen.

Unglücklicherweise ist am Anfang der Suche auch unklar, in welcher Probenart sich Biomarker verstecken – also zum Beispiel nur im erkrankten Gewebe oder auch im Blut, im Urin oder im Hirnwasser. Deshalb kann es passieren, dass man den falschen »Heuhaufen« durchkämmt. Sucht man beispielsweise unter den Proteinen, dann müssen diese für die massenspektrometrische Untersuchung in kleine Bruchstücke zerschnitten werden. Das erledigen hochgradig gereinigte Enzyme, wie Proteasen aus der Bauchspeicheldrüse. Da es sich um biologische Substanzen



Roboter zur automatisierten Proteomfraktionierung. Rechts im Bild sieht man eine Vorrichtung, die jeweils 96 Proben gleichzeitig pipettieren kann. Der Rechner steuert die Anlage, speichert und verarbeitet die Daten. Ein weiterer Pipettierroboter (hinter dem Monitor) sucht die interessantesten Fraktionen heraus.

handelt, können Probenbestandteile in der Zwischenzeit auch verderben.

Wegen all diesen Schwierigkeiten haben sich einige Wissenschaftler entschieden, nur noch unter ausgewählten Proteinarten zu suchen – so kommt man schneller voran. Manche schwören auf besonders kleine Proteine und Peptide, andere nur auf Eiweiße, die in sehr geringen Konzentrationen vorkommen, einige auf Glykoproteine oder auf Proteine, die spezielle Ladungen oder bestimmte Modifikationen tragen.

Um das Probenmaterial umfassend und präzise aufarbeiten zu können, erfüllen Forscher neue, möglichst automatisierbare und damit schnelle und genaue Verfahren. So gelingt es unserem Team inzwischen, mit einem Roboter den gesamten Inhalt von vier Plasmaproben gleichzeitig in jeweils nahezu 4500 Subfraktionen zu zerlegen. Von diesen enthält jede nur noch 20 bis 40 verschiedene Proteine mit ähnlichen physikochemischen Eigenschaften, so dass sie mittels MS analysierbar sind (*Nova Science Publishers. In: Automation Systems of the 21st Century, Kapitel 1, S. 1–50, 2013*).

Für die Biomarkerforschung bedarf es eines ausgesprochen langen Atems. Denn von der Probengewinnung bis zur Evaluierung oder klinischen Prüfung können zehn und sehr viel mehr Jahre harter Arbeit vergehen. Bei der nahezu 25-jährigen Suche nach verläss-

lichen Markern für das Prostatakarzinom wurde zum Beispiel erst beim klinischen Einsatz klar: Nicht einzelne Moleküle haben die beste Aussagekraft, wie etwa das seit Langem verwendete prostataspezifische Antigen PSA, sondern Biomarkerkombinationen aus PCA3 (prostate cancer antigen 3) und der Protease T2E (*Clinical Biochemistry, DOI: 10.1016/j.clinbiochem.2013.10.023*).

Alle Etappen kann ein einziges Team deshalb nicht allein abdecken. Somit wird der Staffelstab von der medizinischen Fragestellung und Probengewinnung über die Entwicklung von Analysemethoden bis zur klinischen Prüfung kontinuierlich von einer Arbeitsgruppe zur nächsten weitergereicht. Dazu muss eine vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den die Patienten betreuenden Ärzten ebenso gelingen wie mit Technikern, Informatikern, Testentwicklern, klinischen Chemikern und Sponsoren.

Moderne Proteomik – mit viel Kleinarbeit auf die Überholspur

Auch heute gibt es noch viel Pionierarbeit zu leisten, um das Potenzial dieser Technologien wirklich nutzbar zu machen. So rücken viele gelöst geglaubte Details der Arbeitsabläufe erneut ins Blickfeld und werden grundlegend verbessert, wie der erwähnte Proteaseverdau (*Molecular & Cellular Proteomics 12, S. 2992–3005, 2013*). Dabei haben die Forscher aus neun gängigen Standard-

protokollen und einer Vielzahl von Zusätzen diejenigen herausgesucht, welche die Proteaseaktivität maximieren. Außerdem gelingt es mit neuen Methoden, störende Stoffe effizient aus den Proben zu entfernen.

Bei der Massenspektrometrie gibt es eine Unzahl von Geräteparametern, die eingestellt und aufeinander abgestimmt werden müssen. Sie bestimmen die Geschwindigkeit der Analyse genauso wie die Ausbeute an identifizierbaren Molekülen. Deshalb benötigen Forscher MS-Suchalgorithmen, die an den jeweiligen Geräte- und Probetyp angepasst sind, sowie Anleitungen zur raschen Optimierung (*Journal of Proteome Research 12, S.3071–3086, 2013*).

Mit einem der heute schnellsten, empfindlichsten und in vielen Details verbesserten Massenspektrometer ist es jüngst einem Team der University of Wisconsin-Madison um den Chemiker Joshua Coon gelungen, alle Proteine einer Probe von Hefezellen innerhalb einer Stunde zu identifizieren (*Molecular & Cellular Proteomics 13, S. 339–347, 2014*) – eine Aufgabe, die noch vor einigen Jahren mehrere Monate beanspruchte. Ob dies auch mit menschlichen Probenmaterialien möglich sein wird, bleibt abzuwarten. Medizinische Fragen dazu gibt es jedenfalls genug.

Heidrun Rhode ist Privatdozentin am Universitätsklinikum Jena und leitet dort die Arbeitsgruppe Proteomics am Institut für Biochemie I.

WISSENSCHAFTLER UND NOBELPREISTRÄGER IN IHREM BRIEFKASTEN.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT-Abo mit exklusiven Extras



1. Buch »Barrow's Boys«

Die unglaubliche Geschichte von wagem Heldenmut und bravurösem Scheitern der Expeditionen der Royal Navy in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts.

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!

2. Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM

Die CD-ROM des Jahrgangs 2013 bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) im PDF-Format.



3. Schreibset von Lamy

Druckbleistift und Kugelschreiber mit Etui

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



SICHERN SIE SICH ALLE VORTEILE IM ABO ...

... und verpassen Sie keine Ausgabe des großen Wissensmagazins.

VORTEILSABO

ABOPLUS+ – EXKLUSIVE VORTEILE FÜR ABONNENTEN!

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10 % günstiger und portofrei ins Haus. Sie können jederzeit wieder kündigen

+ WUNSCH-GESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten

+ EXKLUSIVE ABOPLUS+-VORTEILE:

2 IN 1:

Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern auch Zugriff auf die digitale Ausgabe im PDF-Format

KOSTENLOSER ARCHIVZUGANG

zum kompletten Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit weit über 9000 Artikeln

VERGÜNSTIGUNGEN:

Rabatte bei unseren Sonderheften sowie mit dem Mitgliedsausweis bei zahlreichen Museen, wissenschaftlichen Institutionen und Filmtheatern

EXTRAS:

ausgewählte Hefte zum kostenlosen Download



**MEHR UNTER:
WWW.SPEKTRUM.DE/ABOPLUS**

Auftragkiller der Körperabwehr

Immunzellen lassen sich genetisch so verändern, dass sie Tumoren im Körper eines Krebspatienten angreifen. Dieses bislang wenig beachtete Verfahren rückt zunehmend in den Blick der Pharmaforschung.

Von Courtney Humphries

Noch vor wenigen Jahren erntete Michel Sadelain vor allem Skepsis, wenn er vor Kollegen darüber sprach, dass man die Krebsmedizin um den adoptiven Zelltransfer (ACT) erweitern könne. Sein Vorschlag, einem Krebspatienten Immunzellen zu entnehmen, diese genetisch so zu verändern, dass sie den Tumor des Erkrankten attackieren, und anschließend dem Patienten zurückzugeben, stieß auf große Zweifel. »Ich kann Ihnen gar nicht sagen, vor wie vielen leeren Sälen ich über diese Methode referiert habe«, erzählt Sadelain, Direktor am Center for Cell Engineering am Memorial Sloan Kettering Cancer Center in New York.

Der adoptive Zelltransfer erlaubt den Medizinern, sich die Schlagkraft des Immunsystems zu Nutze zu machen, indem sie die körpereigenen T-Zellen (T-Lymphozyten) für ihre Zwecke einsetzen. T-Zellen wandern durch den Organismus und »halten Ausschau« nach potenziell gefährlichen Objekten, etwa eingedrungenen Krankheitserregern oder pathologisch veränderten Körperzellen. Das tun sie

mit Hilfe von Erkennungsmolekülen, so genannten Rezeptoren. Bakterien oder Krebszellen tragen auf ihrer Oberfläche häufig andere Proteine als gesunde Körperzellen – »Antigene« heißen solche fremden Oberflächenproteine in der Fachsprache. Trifft nun eine T-Zelle auf ein Bakterium oder eine Krebszelle, deren Antigen zu ihrem Rezeptor passt, dann wird sie aktiv und startet eine Attacke gegen den Schädling.

Krebszellen besitzen vielfach stark veränderte Oberflächenproteine und geben damit eigentlich ideale Angriffsziele für T-Zellen ab. Doch leider sind Tumoren in der Lage, sich gegenüber der Immunabwehr abzuschirmen. Das Ziel des adoptiven Zelltransfers besteht deshalb darin, die T-Zellen durch gezielte Eingriffe derart »scharf« zu machen, dass sie den Schutzschild des Tumors durchbrechen können. Sadelain nennt die so modifizierten T-Zellen »lebende Arzneistoffe«.

In den zurückliegenden Jahren hat es eine Reihe von Pilotstudien zum adoptiven Zelltransfer gegeben, die viel versprechende Resultate erbracht haben. Seither wächst die Zahl der Mediziner, die sich für diesen Behandlungsansatz interessieren, und sie haben dutzende klinische Studien gestartet, um seine Möglichkeiten ausloten. Es gibt Berichte über Patienten mit aggressiven Krebserkrankungen, deren Tumoren binnen Tagen oder Wochen verschwanden, nachdem sie dem Verfahren unterzogen worden waren. Allerdings ist die Zahl der insgesamt damit behandelten Krebskranken noch sehr klein. Trotzdem: Angesichts der Tatsache, dass Krebsmediziner es vielfach schon als Durchbruch feiern, wenn ein Therapieverfahren die durchschnittliche Überlebenszeit der Patienten um einige Wochen oder Monate verlängert, erregt die komplette Rückbildung von Tumoren erhebliches Aufsehen, auch wenn sie nur bei wenigen Betroffenen zu beobachten ist.

Sadelain spricht nun nicht mehr vor leeren Sitzreihen. Plötzlich, so berichtet er, schlägt der adoptive Zelltransfer sowohl Wissenschaftler als auch Vertreter von Pharmaunternehmen in ihren Bann. Ganz so, als handle es sich um

DIE NEUE SERIE IM ÜBERBLICK

IMMUNTHERAPIE GEGEN KREBS

- | | | |
|--------|--|----------------|
| Teil 1 | ▶ Auftragkiller der Körperabwehr
<i>Courtney Humphries</i> | Juli 2014 |
| | Zelluläre Mobilmachung | |
| | Bakterien gegen Tumoren
<i>Sarah DeWeerd</i> | |
| Teil 2 | ▶ Immunsystem im Turbogang
<i>Karen Weintraub</i> | August 2014 |
| | Interview mit Krebsforscher Thierry Boon
<i>Emmanuelle Vaniet</i> | |
| Teil 3 | ▶ Krebszellen unter der Lupe
<i>Katherine Bourzac</i> | September 2014 |
| | Impfimplantate gegen Krebs
<i>Elie Dolgin</i> | |



ein komplett neues Verfahren – und nicht um ein Konzept, das Forscher schon seit 20 Jahren kontinuierlich weiterentwickeln.

Noch stehen einer breiteren Anwendung mehrere Hürden im Weg. Eine große Herausforderung liegt darin, die Aktivität der Immunzellen so zu kontrollieren, dass sie Krebszellen vernichten, ohne gesundes Gewebe anzugreifen. Das ist nicht einfach, denn oft sind vermeintlich tumorspezifische Antigene auch auf normalen Körperzellen zu finden. Unklar erscheint zudem, wie es gelingen kann, den adoptiven Zelltransfer in ein wirtschaftlich tragbares Behandlungsverfahren zu überführen. Lebende Immunzellen aus dem Patienten zu entnehmen und zu kultivieren, erfordert weit mehr Zeit und Wissen, als ein fertiges Medikament zu verabreichen – und entsprechend höhere Kosten. Das ist vor allem

AUF EINEN BLICK

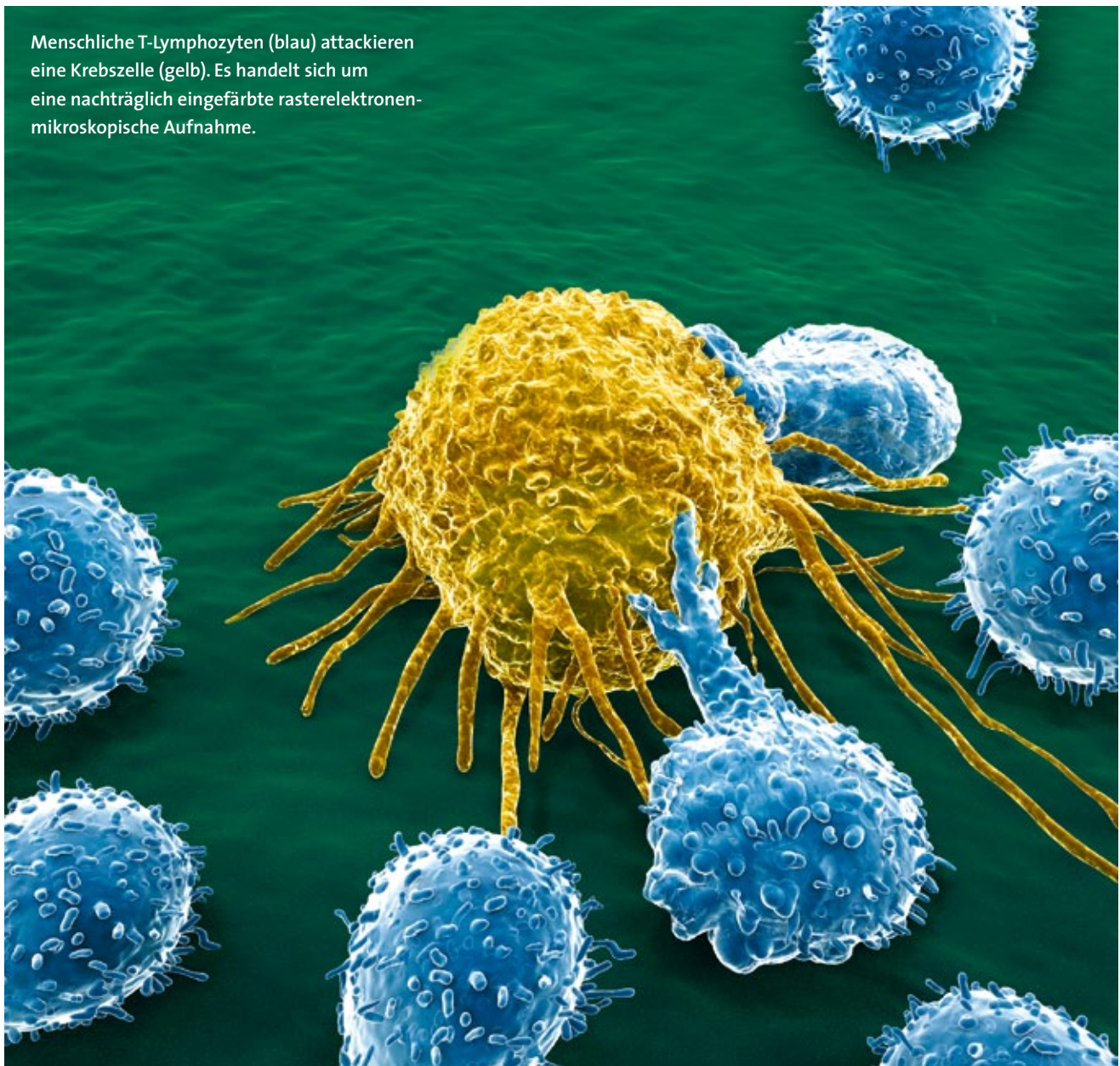
MIT DEN WAFFEN DES KÖRPERS

1 Beim **adoptiven Zelltransfer** entnehmen Mediziner einem Krebspatienten Immunzellen, vervielfältigen sie, verändern sie manchmal auch und geben sie dem Patienten anschließend zurück. Das Ziel lautet, die Zellen so zu selektieren und gegebenenfalls zu modifizieren, dass sie den Tumor des Patienten angreifen.

2 Noch vor wenigen Jahren wurde das Verfahren kaum im klinischen Alltag eingesetzt, da es sehr komplex ist und die Gefahr tödlicher **Nebenwirkungen** birgt.

3 Seit einigen Jahren berichten Mediziner jedoch vermehrt über Erfolge mit diesem Verfahren, weshalb sich auch Pharmaunternehmen zunehmend dafür interessieren. Jetzt laufen die ersten größeren **klinischen Studien** an.

Menschliche T-Lymphozyten (blau) attackieren eine Krebszelle (gelb). Es handelt sich um eine nachträglich eingefärbte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme.



STOCKPHOTO / JUAN GÄRTNER

deshalb problematisch, weil – wie bei jedem neuen klinischen Verfahren – umfangreiche Studien mit Beteiligung zahlreicher Kliniken nötig sind, um die Wirksamkeit des adoptiven Zelltransfers anhand großer Patientengruppen zu belegen. Doch um solch groß angelegte Untersuchungen durchzuführen, muss man erst die Möglichkeiten schaffen, Zellen in ausreichender Menge zu manipulieren, zu kultivieren und zu vertreiben. Die damit verbundenen hohen Investitionen werden die Unternehmen erst tätigen, wenn sie darauf hoffen können, entsprechende Therapieverfahren langfristig profitabel zu vermarkten.

Befürworter des adoptiven Zelltransfers betonen, das Verfahren biete die Chance, lebensbedrohliche Tumoren auszumerzen – und diese Aussicht sei es wert, sich den Herausforderungen zu stellen. Sie verweisen auf jüngere Erfolgsmeldungen, die eine überraschende Effizienz der Methode belegen.

Bisher existieren drei grundlegende Strategien beim adoptiven Zelltransfer (siehe Infografik rechts), wobei die einfachste davon am weitesten entwickelt ist. Das einen Tumor umgebende Gewebe enthält mit hoher Wahrscheinlichkeit Immunzellen, deren Aktivität gegen den Tumor gerichtet ist. Mediziner entnehmen deshalb eine Probe dieses Gewebes und versuchen, daraus entsprechende T-Zellen zu isolieren. Gelingt das, kultivieren sie die Zellen anschließend im Labor, bis diese sich hinreichend vermehrt haben. Sodann geben die Mediziner dem Patienten die kultivierten T-Zellen in den Körper zurück, und zwar gemeinsam mit dem T-Zell-Wachstumsfaktor Interleukin-2 (IL-2), der die weitere Vermehrung der Immunzellen fördern soll.

Allerdings verfügt das körpereigene Abwehrsystem über hemmende Mechanismen, die Immunreaktionen unter Kontrolle halten. Sie verhindern oft, dass die rückübertragenen Immunzellen den Tumor wirksam angreifen. Daher müssen die Patienten zusätzlich noch Medikamente oder Strahlenbehandlungen erhalten, die das Immunsystem und seine Hemmmechanismen schwächen, so dass die rücküber-

tragenen T-Zellen Fuß fassen und sich im Organismus verbreiten können.

Fachleute bezeichnen dieses Verfahren als Therapie mit tumorinfiltrierenden Lymphozyten (TIL). Es ist bisher erst bei einer einzigen Krebsart erfolgreich angewendet worden: dem metastasierten Melanom. Bei dieser Krebsart wandern die T-Zellen in den Tumor ein, was es relativ leicht macht, sie aus tumornahen Gewebeproben zu extrahieren. In den zurückliegenden 25 Jahren haben Wissenschaftler um Steven Rosenberg gezeigt, dass die TIL-Therapie Melanome zurückdrängen und bei einem beträchtlichen Teil der Patienten sogar vollständig und lang anhaltend ausmerzen kann. Rosenberg forscht über Immuntherapien und leitet die chirurgische Abteilung am National Cancer Institute in Bethesda (Maryland, USA).

Auch gegen die Tochtertumoren wirksam

T-Zellen, deren Aktivität sich gegen einen bestimmten Tumor richtet, können offenbar auch dessen Tochtergeschwulste (Metastasen) vernichten, wie Rosenbergs Studien belegen. Bei etlichen Melanompatienten, die sich mit der TIL-Therapie nachhaltig erfolgreich behandeln ließen, hatten die Tumoren bereits stark gestreut, weshalb andere Behandlungsmethoden keine Wirkung mehr zeigten.

So wie die TIL-Therapie derzeit zugeschnitten ist, weist sie allerdings noch zwei wesentliche Nachteile auf. Zum einen müssen die Patienten 4 bis 6 Wochen warten, bis sich ihre Immunzellen unter Kulturbedingungen so weit vermehrt haben, dass die Therapie beginnen kann. Zum anderen erfordert das Verfahren, spezielle Zentren zur Zellzüchtung einzurichten – mit Personal, das darin geschult ist, Zellen zu kultivieren. Forscher arbeiten zurzeit daran, die Vermehrung der Immunzellen zu beschleunigen, so dass sie nur noch Tage statt Wochen in Anspruch nimmt. Zudem hat ein Team um Cassian Yee, Tumormimmunologe am University of Texas MD Anderson Cancer Center (Houston, USA), eine Methode entwickelt, um T-Zellen mit Anti-Tumor-Aktivität aus dem

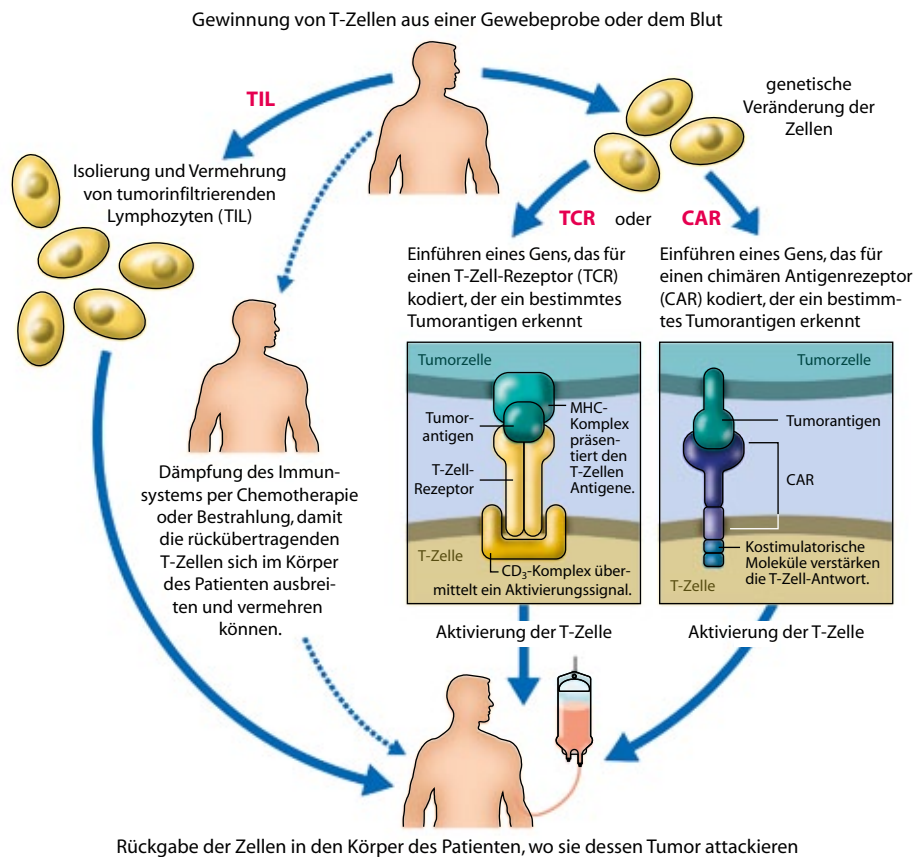
In den klinischen Alltag

Zurzeit bieten nur wenige Behandlungszentren adoptive Zelltherapien gegen Krebs an. Pharmaunternehmen arbeiten daran, diese Therapien für den breiteren Einsatz verfügbar zu machen.

Unternehmen	Therapieform	Partnerschaften und Studien
Adaptimmune	T-Zell-Rezeptor-Therapie (TCR)	Sponsert 9 Pilot- und Phase-I-Studien an verschiedenen Behandlungszentren in den USA
Novartis	Therapie mit chimären Antigenrezeptoren (CAR)	Lizenzierungsvertrag mit der University of Pennsylvania, um Krebsimmuntherapien zu entwickeln. Organisiert weltweit klinische Studien über eine T-Zell-Therapie gegen die akute lymphoblastische Leukämie, das so genannte CTL019-Programm
Lion Biotechnologies	Therapie mit tumorinfiltrierenden Lymphozyten (TIL)	Lizenzierungsvertrag mit dem National Cancer Institute in den USA, um eine TIL-Therapie zu entwickeln, mit der sich das fortgeschrittene metastasierte Melanom behandeln lässt
Kite Pharma	TCR, CAR	Zusammenarbeit mit dem National Cancer Institute, um entsprechende Therapieverfahren zu entwickeln und zu vermarkten

Angriff der T-Zellen

Beim adoptiven Zelltransfer (ACT) attackieren Mediziner den Tumor mit Hilfe von tumorinfiltrierenden Lymphozyten (TIL) oder genetisch veränderten T-Zellen. Letztere werden entweder so modifiziert, dass sie auf ihrer Oberfläche einen bestimmten T-Zell-Rezeptor tragen (dann spricht man von TCR-Therapie), oder so, dass sie ein spezielles antikörperähnliches Molekül ausprägen, einen so genannten chimären Antigenrezeptor (CAR). Beide Methoden führen dazu, dass die T-Zellen aktiv werden, wenn sie auf ein bestimmtes Tumorantigen treffen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE, NACH: NATURE 504, S. 513-515, 2013

Blut zu gewinnen. Das ermöglicht es vielleicht, auch solche Tumoren mit der TIL-Therapie zu behandeln, bei denen die Entnahme von Gewebeproben sehr schwer fällt oder bei denen sich die Immunzellen nicht in der Umgebung der Geschwulst anreichern.

Maßgeschneiderte Killerzellen

Die Erfolge der TIL-Therapie bei der Behandlung des metastasierten Melanoms lassen sich zurzeit nicht auf andere Krebsarten übertragen, weil es dort deutlich schwieriger ist, T-Zellen mit Anti-Tumor-Aktivität zu gewinnen. Forscher arbeiten daher an einem weiteren Verfahren des adoptiven Zelltransfers. Sie wollen (unspezifische) T-Zellen genetisch so verändern, dass diese die Fähigkeit erlangen, den Tumor zu attackieren. Diese Strategie hat erstens den Vorteil, dem Patienten keine tumorspezifischen T-Zellen entnehmen zu müssen, und zweitens, dass man den Immunzellen mittels des genetischen Eingriffs ganz bestimmte Eigenschaften verleihen kann.

Hierbei verfolgen die Forscher mehrere Ansätze. Bei der T-Zell-Rezeptor-Therapie (TCR-Therapie) bringen sie Gene in die Immunzellen ein, die für bestimmte Rezeptormoleküle kodieren. Haben die Zellen diese Rezeptoren dann hergestellt, erkennen sie die dazu passenden Tumorantigene. Durch gezieltes Optimieren des eingepflanzten Genmate-

rials lassen sich die Bindungseigenschaften der Rezeptoren gegebenenfalls verbessern.

Um Zellen für die TCR-Therapie herzustellen, gewinnen die Ärzte zunächst T-Zellen aus dem Blut des Patienten und schleusen in diese dann das gewünschte Genmaterial mit Hilfe veränderter Viruspartikel ein. Dabei lassen sich die Zellen in vielfältiger Weise verändern – etwa so, dass sie sich im Körper besser vermehren und länger dort verweilen oder dass sie Signalmoleküle ausschütten, die andere Zellen zum Angriff auf den Tumor veranlassen. In bisherigen Anwendungen der TCR-Therapie gelang es bei einigen Patienten, die Tumorgöße zu verringern, und zwar beim metastasierten Melanom, bei Dickdarmkrebs und bei Sarkomen der Gelenkschleimhaut. Doch es gibt ein Problem bei diesem Behandlungsansatz: Die Rezeptoren, deren genetische Blaupause man in die T-Zellen einbringt, müssen auf das Immunsystem des Patienten abgestimmt sein.

Eine flexiblere Strategie, die Therapie mit chimären Antigenrezeptoren (CAR), umgeht jene Schwierigkeit. Dabei verwenden die Mediziner ein Gen, das für ein künstliches, antikörperähnliches Protein kodiert. Es bindet zwar ebenfalls an Antigene auf den Tumorzellen, muss aber nicht dem Immunsubtyp des Patienten entsprechen.

Chimäre Antigenrezeptoren bestehen aus drei Teilen: einem Antikörper, der an ein häufiges Tumorantigen bindet;

einem Rezeptorfragment, das die T-Zelle aktiviert; und unterstützenden Substanzen, so genannten kostimulatorischen Molekülen, zur besseren Vermehrung und längeren Verweildauer der T-Zellen im Körper. Wird ein CAR-Gen in eine T-Zelle eingebaut und abgelesen, funktioniert das entstehende Molekülkonstrukt wie ein Schalter: Sobald es an ein passendes Tumorantigen koppelt, versetzt es die Zelle in den Angriffsmodus.

Obwohl schon in den späten 1980er Jahren konzipiert, haben CAR-Therapien erst in neuerer Zeit zu positiven Ergebnissen im Rahmen kleinerer klinischer Studien geführt. Bisher zielen sie allesamt auf das CD19-Protein ab, das Blutkrebszellen sowie entartete Zellen des Lymphgewebes auf ihrer Oberfläche tragen. CD19 findet sich allerdings auch auf gesunden weißen Blutkörperchen. Das bedeutet, die genetisch veränderten T-Zellen bei der CAR-Therapie greifen mitunter auch normale weiße Blutkörperchen an, doch deren Verlust lässt sich medizinisch kompensieren.

Letzte Rettung bei hochaggressivem Blutkrebs

Vor drei Jahren berichtete ein Team um Carl June vom Abramson Family Cancer Research Institute in Philadelphia (USA) über die erfolgreiche Anwendung einer CAR-Therapie, die auf CD19 abzielte. Drei Leukämiepatienten waren zuvor erfolglos mit Chemotherapien behandelt worden; nach der CAR-Therapie hingegen bildeten sich ihre Krankheitssymptome zurück und verschwanden bei zwei Patienten sogar ganz. In einer anderen Studie aus dem Jahr 2013, an der Michel Sadelain beteiligt war, wendeten Forscher ebenfalls eine gegen CD19 gerichtete CAR-Therapie bei Leukämiepatienten an. Diesmal verschwanden bei drei von fünf Betroffenen die Krebszellen vollständig. Das ist insbesondere deshalb spektakulär, weil die Betroffenen an akuter lymphatischer Leukämie (ALL) gelitten hatten, einer äußerst aggressiven Erkrankung, und es bei ihnen auch schon mehrfach zu Rückfällen nach Chemotherapie gekommen war. Forscher untersuchen nun, ob CAR-Therapien auch gegen solide Tumoren wirken.

Nun, da kleinere klinische Studien gezeigt haben, dass man bestimmte Krebserkrankungen wirksam mit genetisch veränderten T-Zellen behandeln kann, geht es um die Optimierung dieser Ansätze. Wie Sadelain betont, zeigen die Studien, dass die konkrete Ausgestaltung der Therapie – etwa die Art der stimulatorischen Moleküle – großen Einfluss auf den klinischen Erfolg hat. Zumindest bei CAR-Therapien bestimmen diese Randfaktoren maßgeblich darüber, gegen welche Krebsart die Behandlung wirkt. Es gilt daher, sowohl bei TCR- als auch bei CAR-Therapien die optimalen Angriffsziele sowie die bestmögliche Zusammenstellung von kostimulatorischen Molekülen zu finden.

Ganz wichtig ist es, den Angriff der veränderten Immunzellen so zu lenken, dass er sich nicht gegen gesundes Körpergewebe richtet. Hierfür müssen die Forscher Antigene auf den Tumorzellen identifizieren, die hinreichend spezifische



**Unser Dossier
»Neue Strategien
gegen Krebs«**
berichtet über Präventionsmaßnahmen, Virotherapien, das Krebsgenomprojekt, Ansätze gegen Tumorstammzellen sowie Krebsimpfungen.

Ziele abgeben. Das könnte schwieriger werden als erwartet. Viele Tumorantigene finden sich auch in normalem Gewebe. Der Rezeptor HER2 beispielsweise, auf den der therapeutische Antikörper Trastuzumab (Handelsname Herceptin) abzielt, kommt auch auf Herzmuskelzellen vor. Vor dem Einsatz einer adoptiven Zelltherapie muss also für sämtliche Körpergewebe geklärt werden, ob sie das entsprechende Antigen ausprägen, und wenn ja, in welchem Ausmaß.

Neuere Arbeiten haben gezeigt, was passieren kann, wenn T-Zellen unerwartet normale Körperzellen attackieren. In einer klinischen Studie behandelten Forscher vom National Cancer Institute neun Krebspatienten mit einer TCR-Therapie, die auf ein Tumorantigen namens MAGE-A3 gerichtet war. Zwei der Patienten fielen ins Koma und starben. Es stellte sich heraus, dass die genetisch veränderten T-Zellen nicht nur auf MAGE-A3 losgegangen waren, sondern auch auf ein weiteres Antigen aus der MAGE-A-Familie, das – wie die Forscher erst später feststellten – in geringen Mengen im Hirngewebe vorkommt. Ein anderer TCR-Therapieansatz, der ebenfalls auf MAGE-A3 zielte, führte bei zwei Patienten zu tödlichem Herzversagen. Hier hatten die veränderten Immunzellen das Protein Titin attackiert, das in Herzmuskelzellen zu finden ist. Das Unternehmen Adaptimmune, das seinen Sitz nahe dem britischen Oxford hat und maßgeblich an der Entwicklung dieses Therapieverfahrens beteiligt war, hat seine Sicherheitstests stark ausgeweitet, um solche katastrophalen Nebenwirkungen künftig zu verhindern.

Einer der größten Vorteile des adoptiven Zelltransfers ist der rasche Wirkungseintritt: Die Behandlungseffekte zeigen sich binnen Tagen oder Wochen, viel schneller als bei anderen Immuntherapien. Allerdings kann eine Behandlung, die solch durchschlagende Wirkungen zeitigt, auch gefährlich werden. Unlängst verstarb eine Darmkrebspatientin während einer CAR-Therapie an unkontrollierbaren Immunreaktionen, die Mediziner als »Zytokinsturm« bezeichnen. Die rasche Zerstörung von Tumorgewebe kann auch zum so genannten Tumorlyse-Syndrom führen. Es tritt auf, wenn sich Bestandteile abgestorbener Tumorzellen massenhaft über den Kreislauf im Körper verteilen. »Unser Organismus ist nicht darauf ausgelegt, Tumoren mit einer Masse von 3 bis 8 Pfund in kürzester Zeit abzubauen«, sagt Bruce Levine, Direktor an der Einrichtung für klinische Zell- und Impfstoff-

produktion der University of Pennsylvania. Doch genau dies geschehe, wenn adoptive Zelltherapien innerhalb weniger Tage zur Zerstörung großer Tumoren führten.

Sowohl TCR- als auch CAR-Therapien durchlaufen zurzeit klinische Studien, in denen ihre Wirkung gegen verschiedene Krebsarten getestet wird. Das sind Eierstock- und Bauchspeicheldrüsenkrebs, Glioblastome (Hirntumoren) und Mesotheliome (Brust-, Bauchfell- und Herzbeutel Tumoren). Die Ergebnisse dieser Studien werden zeigen, ob sich die genannten Therapieansätze für einen breiteren Einsatz eignen. Hier sind noch viele Fragen offen, etwa, weshalb manche Patienten stärker vom adoptiven Zelltransfer profitieren als andere. Einer der Gründe hierfür ist sicher die Variabilität der Immunzellen. Die T-Zellen mancher Patienten sind möglicherweise in ihrer Funktionalität stärker beeinträchtigt oder vermehren sich schlechter als die Zellen anderer Betroffener. Es erscheint daher dringend nötig, Biomarkermoleküle zu finden, anhand derer man funktionsfähige Immunzellen erkennen kann. Diese Marker könnten dazu dienen, den Erfolg der Therapie vorher abzuschätzen, nur die »besten« Immunzellen für die Therapie auszuwählen oder den Behandlungsfortschritt zu überwachen.

Die momentan verfügbaren adoptiven Zelltherapien sind Spezialverfahren, die weltweit nur an wenigen universitären Behandlungszentren praktiziert werden. Bislang wurden sie fast ausschließlich in kleinen Pilotstudien getestet – an Patienten, deren Tumorerkrankungen weit fortgeschritten waren und die auf Chemotherapien nicht mehr ansprachen. Doch nun laufen die ersten größeren Studien an. Da es mehreren Forscherteams in den zurückliegenden Jahren gelang, den klinischen Nutzen dieser Therapieverfahren zu bestätigen, erfährt die adoptive Zelltherapie zunehmend Aufmerksamkeit seitens der Pharmaindustrie (siehe Kasten S. 24). Wenn man freilich Patienten in großem Stil mit genetisch veränderten Zellen behandeln will, braucht man kostengünstigere, schnellere und stärker automatisierte Verfahren, um Immunzellen zu modifizieren und zu kultivieren.

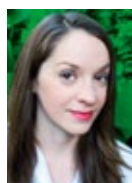
Was ist die beste Strategie?

Derzeit zielen die Pharmaunternehmen mit ihren adoptiven Zelltherapien auf häufige Tumorantigene wie CD19 und MAGE-A3. Nicht alle Forscher halten dies für den richtigen Ansatz. Rosenberg etwa glaubt, die besten Erfolgsaussichten habe eine vollständig personalisierte Therapie, bei der man die Immunzellen so verändert, dass sie auf Krebsantigene abzielen, die sich nur auf den Tumorzellen des jeweiligen Patienten finden und nirgendwo sonst. Eine solche Behandlung, erläutert Rosenberg, setze eine umfassende genetische Analyse der Tumorzellen voraus, um deren spezifische Mutationen und Antigene zu finden. Dieser Ansatz sei zwar sehr aufwändig, doch »wir sollten erst einmal eine funktionierende Heilungsmethode finden, auch wenn sie sehr kompliziert ist, und uns später darum kümmern, sie breiter anwendbar zu machen«.

Vor gut zwei Jahren stellten zwei US-Organisationen – das gemeinnützige Cancer Research Institute in New York sowie die Entertainment Industry Foundation in Los Angeles – zusammen sechs Millionen Dollar zur Verfügung, um die Möglichkeiten des adoptiven Zelltransfers auszutesten. Mit dem Geld sollen renommierte Krebsforscher herausfinden, ob sich die Therapie mit einem anderen Behandlungsansatz kombinieren lässt, der ebenfalls große Hoffnungen unter Medizinern weckt: dem Einsatz von Immun-Checkpoint-Inhibitoren. Das sind Arzneistoffe, die körpereigene Abwehrreaktionen gegen Tumorzellen intensivieren, indem sie immunhemmende Signale unterdrücken (siehe »Immunsystem im Turbogang« in der kommenden SdW-Ausgabe). Diese beiden Therapiemethoden sollten sich in ihrer Wirkung gegen den Krebs gegenseitig verstärken, was vorläufige Studienergebnisse zu bestätigen scheinen.

Trotz ungeklärter Fragen halten viele Forscher und Ärzte den adoptiven Zelltransfer für einen viel versprechenden Behandlungsansatz. Sie lässt sich sehr gut auf die individuellen Gegebenheiten des jeweiligen Patienten abstimmen und flexibel an methodische Fortschritte anpassen. »Das ist nicht bloß der nächste kleinmolekulare Arzneistoff oder die nächste Antikörpertherapie«, meint Sadelain, »das ist ein grundlegend neues Verfahren.«

DIE AUTORIN



Courtney Humphries ist Wissenschaftsjournalistin in Boston, Massachusetts.

QUELLEN

Brentjens, R.J. et al.: CD19-Targeted T Cells Rapidly Induce Molecular Remissions in Adults with Chemotherapy-Refractory Acute Lymphoblastic Leukemia. In: Science Translational Medicine 5/2013, 177ra38

Kalos, M. et al.: T Cells with Chimeric Antigen Receptors Have Potent Antitumor Effects and can Establish Memory in Patients with Advanced Leukemia. In: Science Translational Medicine 10/2011, 95ra73

Robbins, P.F. et al.: Tumor Regression in Patients with Metastatic Synovial Cell Sarcoma and Melanoma Using Genetically Engineered Lymphocytes Reactive with NY-ESO-1. In: Journal of Clinical Oncology 29, S. 917–924, 2011

Rosenberg, S.A.: Cell Transfer Immunotherapy for Metastatic Solid Cancer – what Clinicians Need to Know. In: Nature Reviews Clinical Oncology 8, S. 577–585, 2011

WEBLINKS

Diesen Artikel, weitere Literatur und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286303

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 504, S. S13–S15, 19./26. Dezember 2013

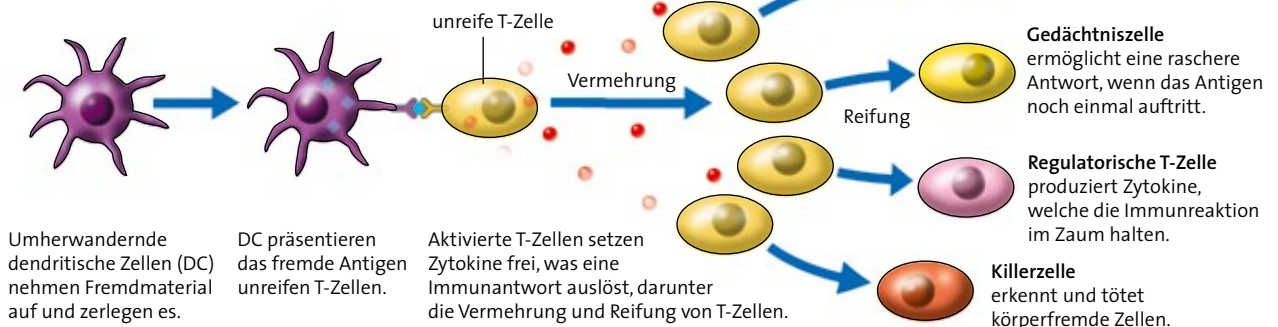
SCHWERPUNKT KREBSIMMUNTHERAPIE (II)

ZELLULÄRE MOBILMACHUNG

Forscher verstehen die Biologie des Immunsystems sowie von Tumoren immer besser. Mit diesen Erkenntnissen erkunden sie neue Wege, um Krebs mit körpereigenen Waffen zu schlagen.

Natürliche Immunantwort

Zu Beginn der spezifischen Immunantwort des Körpers präsentieren spezialisierte Zellen in den Lymphknoten unreife Immunzellen Bruchstücke körperfremden Materials, so genannte Antigene.



Therapeutische Vorgehensweisen

Die derzeitigen Krebsimmuntherapien gehören zu einem der folgenden drei Grundtypen:

Unspezifische Immuntherapien

Zytokine und weitere Stoffe, die eine allgemeine Immunantwort hervorrufen, eignen sich auch als Hilfsstoffe (Adjuvantien) für andere Therapien, etwa Impfungen.

Künstlich hergestellte Zytokine fördern die Vermehrung von Immunzellen.

Immunzelle

Immunzellen attackieren die Krebszellen und töten sie.

Krebszelle

Monoklonale Antikörper

Diese Proteine heften sich an spezifische Antigene an der Oberfläche von Krebszellen.

mögliche Anwendungen:

Medikamente zu den Zielzellen bringen

Medikament

Krebszelle

Zellen für Zerstörung markieren

biochemischen Signalweg blockieren, um Wachstum oder Vermehrung zu stoppen

Antigen

Krebszelle

Impfstoffe

Impfstoffe lassen sich aus Krebszellen, Zellteilen oder Antigenen herstellen.

einer der derzeit getesteten Ansätze:

DC eines Patienten werden ihm zusammen mit einem krebspezifischen Antigen wieder gespritzt.

Antigen

DC

Die DC präsentieren das Antigen anderen Immunzellen.

Helfer-T-Zelle

unreife T-Zelle

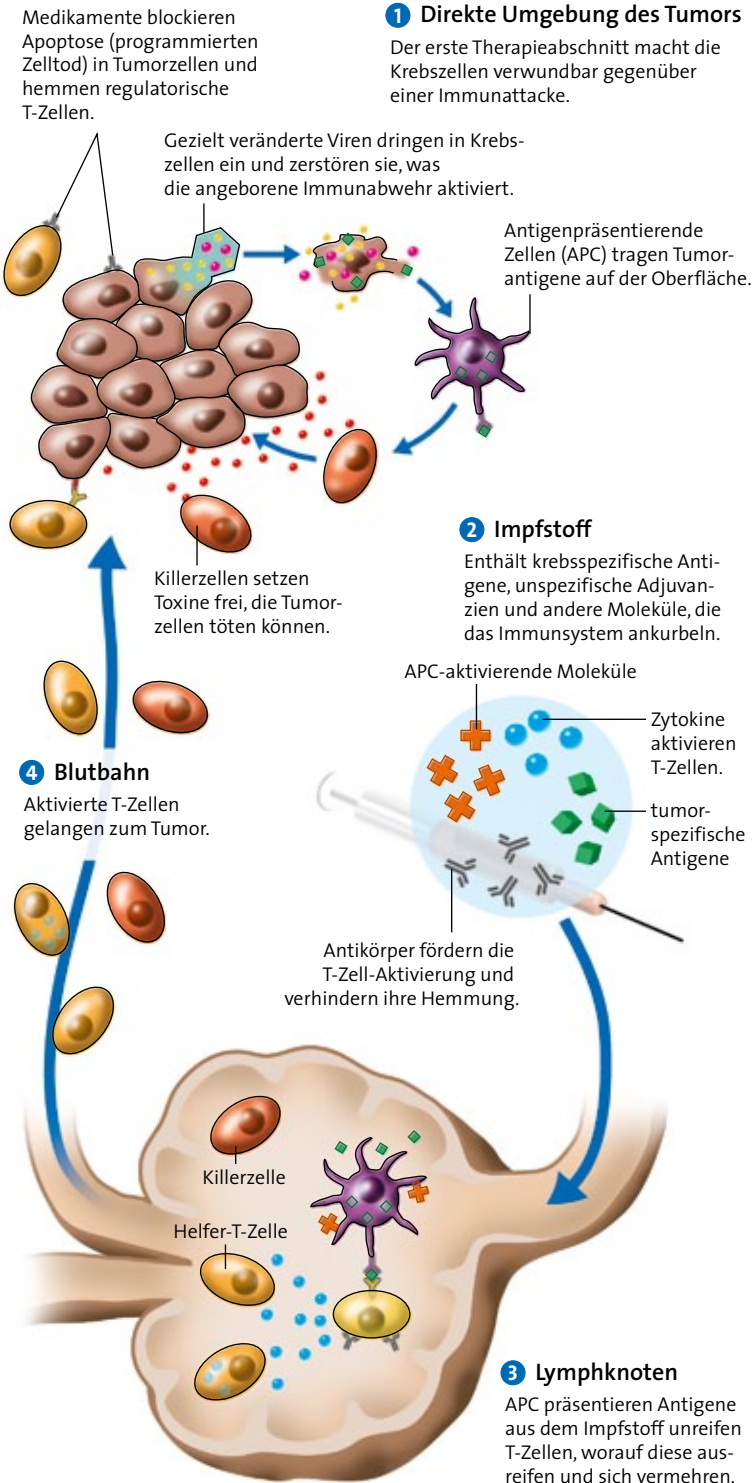
Aktivierte T-Zellen erkennen Tumoren, reifen und vermehren sich.

Killerzelle

Krebszelle

Suche nach Synergien

Einzelne Immuntherapien für sich genommen waren bisher nur mäßig effektiv. Daher suchen Forscher geeignete Kombinationen von Behandlungen, die ihre Wirksamkeit gegenseitig verstärken. Das Schema zeigt das Konzept eines zukünftigen idealen Ansatzes, der bereits funktionierende Therapien mit Substanzen kombiniert, die sich noch in klinischen Studien befinden oder sogar nur theoretisch existieren.



DER LANGE WEG ZUR IMMUNTHERAPIE

1891 Als der Chirurg William Coley liest, dass der Tumor eines Patienten nach einer Bakterieninfektion verschwand, beginnt er, Krebspatienten Bakterien zu spritzen (siehe Artikel ab S. 30).

1909 Der Biologe Paul Ehrlich vermutet, dass Immunzellen den Körper nach Krebszellen absuchen, um deren Wachstum zu verhindern.

1953 Mäuse mit Tumoren zeigen auch noch nach deren Entfernung eine Immunreaktion gegen Krebszellen, was auf die Existenz tumorspezifischer Antigene hindeutet.

1957 Entdeckung von Interferon, einem immunstimulierenden Zytokin, das später in unspezifischer Krebsimmuntherapie eingesetzt wird

1959 Bacillus Calmette-Guérin (BCG), ein Tuberkuloseimpfstoff, hemmt Tumorstilnwachstum bei Mäusen.

1973 Ralph Steinman und Zanvil A. Cohn beschreiben die dendritischen Zellen, die als antigen-präsentierende Zellen im Immunsystem dienen.

1983 Entdeckung der T-Zell-Rezeptoren, die von anderen Immunzellen präsentierte Antigene erkennen und daraufhin die Immunantwort verstärken

1986 Die ersten humanisierten Antikörper werden von der US-Arzneimittelbehörde FDA zugelassen.

1997 Der erste monoklonale Antikörper gegen Krebs, Trastuzumab, wird von der FDA für die Behandlung des Non-Hodgkin-Lymphoms zugelassen.

2008 Der erste therapeutische Krebsimpfstoff, Oncophage, wird in Russland zur Behandlung von Nierenkrebs eingesetzt.

2010 Die FDA genehmigt den Krebsimpfstoff Provenge gegen Prostatakrebs.

Diese Grafik im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1286304

Bakterien gegen Tumoren

Vor mehr als einem Jahrhundert entdeckte der Arzt William Coley einen Weg, das menschliche Immunsystem für den Kampf gegen Krebs einzuspannen. Jetzt wollen Forscher an damalige Erfolge anknüpfen.

Von Sarah DeWeerd

An einem Herbsttag im Oktober 2005 stieg Donald MacAdam die Treppen hinab in die Archive der Yale University in New Haven, USA, wo er über 100 Jahre alten Krankenakten brütete und zwischendurch immer wieder handschriftliche Notizen machte. Währenddessen versuchten seine Mitarbeiter im Labor des kanadischen Unternehmens MBVax Bioscience gerade, einen alten Bakterienstamm aus einem Patienten, der 1924 an Scharlach gestorben war, zu kultivieren, und experimentierten dabei auch mit Techniken aus angestaubten Lehrbüchern. Unter anderem züchteten sie die Mikroben auf Rinderhackfleisch, wie es im 19. Jahrhundert durchaus gängig war.

Wozu der Blick in die Vergangenheit? Die Forscher arbeiteten daran, eine durchschlagende Krebstherapie zu entwickeln. Hierfür versuchten sie ein therapeutisches Verfahren zu rekonstruieren, das ein junger amerikanischer Arzt namens William Coley gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt hatte – und mittlerweile weit gehend in Vergessenheit geraten war.

Coley hatte Bakterien benutzt, um das Leben seiner Krebspatienten zu verlängern. Im Jahr 1890 starb eine seiner ersten Patientinnen an einem Sarkom, einem Tumor des Stützgewebes. Tief erschüttert durchforstete der Arzt die medizinische Literatur, um irgendein Behandlungsverfah-

ren gegen Krebs zu finden. Er stieß auf einen Bericht über einen Patienten, dessen Sarkom nach einer bakteriellen Infektion der Haut verschwunden war. Coley gelang es, den Mann ausfindig zu machen, und stellte fest, dass der Patient – sieben Jahre nach der Infektion – immer noch tumorfrei war.

Und offenbar handelte sich nicht um einen Einzelfall. Schon bald fand der Arzt weitere Dokumente, die teils Jahrhunderte zurückreichten und über spontane Rückbildungen von Tumoren nach einer Infektion berichteten. Daraus leitete er die Vermutung ab, die Konfrontation mit Krankheitserregern könne das Immunsystem von Krebspatienten dazu anregen, den Tumor zu bekämpfen. Er isolierte jene Keime, mit denen sich der von ihm aufgesuchte Mann angesteckt hatte, bevor sein Sarkom verschwand. Es handelte sich um das Bakterium *Streptococcus pyogenes*, eine kugelförmige Mikrobe, die Infektionen des Rachenraums und der Haut verursacht. Damit infizierte Coley einen seiner eigenen Sarkompatienten – mit durchschlagendem Erfolg: Binnen Wochen bildeten sich die Symptome von dessen Krebserkrankung in dramatischer Weise zurück.

Besser als heutige Therapien

In den folgenden 40 Jahren behandelte Coley hunderte weitere Patienten mit Bakterienpräparaten, wobei er ständig daran arbeitete, die Therapie zu verbessern. Bald ging er dazu über, durch Hitze abgetötete Bakterien statt lebender zu verwenden, um die Risiken der Behandlung zu verringern. Auch versuchte er, die Wirksamkeit der Therapie zu erhöhen, indem er seine Patienten mit zwei unterschiedlichen Bakterienspezies infizierte.

Der damit erzielte klinische Erfolg ist selbst nach heutigen Maßstäben beachtlich. Etwa jeden vierten Sarkompatienten, den Coley behandelte, konnte er heilen. Zudem therapierte er etliche Menschen mit anderen bösartigen Tumoren, von denen einige ebenfalls genesen. Im Jahr 1999 verglichen Forscher die dokumentierten Daten von 128 Patienten Coleys mit denen von 1675 Krebskranken, die moderne Therapien durchlaufen hatten. Das verblüffende Ergebnis: Der Arzt erzielte mit seiner Behandlung eine mittlere (genauer: mediane) Überlebenszeit der Betroffenen von 8,9 Jahren, ver-



Ein historisches Bakterienpräparat (links), daneben die moderne Version.

MIT FRIEDLICHEN VON DON MACADAM



CANCER RESEARCH INSTITUTE / PUBLIC DOMAIN

Der amerikanische Onkologe William Coley (Mitte) entwickelte vor 100 Jahren die erste immunologische Tumorthherapie.

glichen mit 7,0 Jahren bei heutigen Patienten. Die Hälfte von Coleys Sarkompatienten hatte nach der Behandlung noch mindestens zehn Jahre gelebt; unter heutigen Patienten sind es nicht einmal 40 Prozent. Auch bei Betroffenen mit Nieren- und Eierstockkrebs verbesserte Coley die 10-Jahres-Überlebensraten.

Trotzdem geriet sein immuntherapeutischer Ansatz bald aus dem Blick der Mediziner. Um die Mitte des 20. Jahrhunderts herum entwickelten sich stattdessen Strahlen- und Chemotherapie zu den gängigen Behandlungen bei Krebs. Das hatte gute Gründe: Während sich die modernen Verfahren relativ leicht standardisieren lassen, musste Coley seine Methode noch sorgfältig auf jeden einzelnen Patienten abstimmen. Zudem schien die Bakterienkur bei anderen Krebsarten nicht so gut zu wirken wie bei Sarkomen. Es war unbekannt, auf welchem Mechanismus die Therapie basierte, und obendrein scheiterten mehrere Ärzte daran, Coleys klinische Erfolge zu reproduzieren.

Vielleicht erleben wir aber schon bald eine Renaissance seines Therapieansatzes. Denn heute verstehen die Forscher viel besser als damals, wie das Immunsystem funktioniert. Auch der Zusammenhang zwischen Infektionen und Tumorrückbildungen ist gründlicher untersucht, ebenso wie einige Details von Coleys Arbeiten, die früher unbeachtet blieben.

Während seines langjährigen Wirkens als Arzt arbeitete Coley mit zahlreichen Bakteriologen zusammen, woraus mehr als 20 verschiedene Versionen seines Bakterienpräparats hervorgingen. »Einer Bakteriologin namens Martha Tracy gelang die Herstellung jener Variante, mit der die größten klinischen Erfolge erzielt wurden«, schildert Stephen Hopton Cann von MBVax. Um daran anzuknüpfen, versuchen die MBVax-Forscher, das Präparat mit modernen Labortechniken nachzubilden. Ihre Version des Medikaments besteht aus abgetöteten Bakterien der Sorte *Streptococcus pyogenes*, die bereits Coley verwendet hatte, sowie *Serratia marcescens*, leuchtend roten, stäbchenförmigen Bakterien, die einen Farbstoff namens Prodigiosin mit immunstimulierenden Eigenschaften enthalten (siehe Bilder S. 33).

Bisher hat MBVax noch keine kontrollierten Studien mit dem Präparat durchgeführt. Dennoch erhielten zwischen 2007 und 2012 etwa 70 Patienten mit fortgeschrittenen Krebserkrankungen die Mixtur. Die Betroffenen litten an Melanomen, Lymphomen oder bösartigen Tumoren in der Prostata, der Brust oder den Eierstöcken. Nach Angaben des Unternehmens schrumpften die Geschwulste bei etwa 70 Prozent der Patienten und verschwanden bei 20 Prozent vollständig.

Andere Teams forschen über ähnliche Bakterienpräparate. 2012 testeten deutsche Wissenschaftler eine Mischung aus wärmebehandelten *Streptococcus pyogenes* und *Serratia marcescens* in einer klinischen Phase-I-Studie mit zwölf Krebspatienten. Sie verzeichneten bei den Betroffenen eine vermehrte Ausschüttung von Zytokinen – Botenstoffen, welche die Immunreaktion verstärken. Bei einem Patienten bildete sich der Tumor sogar zurück, obwohl die Studie gar nicht auf dieses Ziel hin ausgelegt gewesen war.

Doch sprechen offenbar nicht alle Patienten auf die Therapie an. Die Gründe dafür möchten die Wissenschaftler bei MBVax als Nächstes herausfinden. Bevor sie eine klinische Studie durchführen können, um diese Frage zu beantworten, muss das Unternehmen allerdings erst einmal eine mehrere Millionen Dollar teure Produktionsanlage errichten, die amerikanischen und europäischen Vorgaben für die Medikamentenherstellung genügt.

AUF EINEN BLICK

SPIEL MIT DEN KEIMEN

1 Vor gut 100 Jahren entwickelte der Arzt William Coley am New York Cancer Hospital eine Krebstherapie, die aus heutiger Sicht ungewöhnlich anmutet: Er behandelte seine Patienten mit **Bakterienpräparaten**.

2 Coley erzielte damit beachtliche Erfolge, so konnte er etwa jeden vierten **Sarkompatienten** heilen. In mancher Hinsicht war sein Behandlungsansatz heutigen Krebstherapien überlegen.

3 Forscher versuchen derzeit, Coleys **Bakterienkur** nachzuahmen und weiterzuentwickeln – und melden erste Erfolge dabei. Zudem klären sie den **Wirkmechanismus** immer weiter auf.

Zahlreiche weitere Hürden stehen einer Rückkehr von Coleys Immuntherapie im Weg. »Es ist sehr schwierig, von den zuständigen Behörden die Zulassung für einen Bakterienextrakt zu erhalten«, erläutert Uwe Hobohm, Biologe und Bioinformatiker an der Technischen Hochschule Mittelhessen in Gießen, der sich ebenfalls dafür einsetzt, Coleys Therapieverfahren neu zu beleben. Die Zulassungsbehörden bevorzugen Einzelsubstanzen mit definiertem Wirkmechanismus an Stelle von Bakterienpräparaten mit vielfältigen aktiven und inaktiven Molekülen sowie einer großen möglichen Bandbreite an Mechanismen.

Hobohm hält es daher für besser, die Wirkungen der Bakteriengemische erst genau aufzuklären und dann Medikamente zu entwickeln, die wie Coleys Präparate bakterielle Wirkstoffe enthalten, jedoch in gereinigter und standardisierter Form, um ihre Zulassung zu erleichtern. Er vermutet, dass der klinische Erfolg von Coleys Bakterienkur auf eine bestimmte Gruppe von Molekülen zurückzuführen ist, nämlich jene, die sich an »pattern-recognition receptors« (PRR, zu Deutsch: Mustererkennungsrezeptoren) heften. Bakterien produzieren eine Vielzahl solcher PRR-Liganden, darunter Lipopolysaccharide, bestimmte Proteine und DNA. Diese Moleküle aktivieren die so genannten dendritischen Zellen, welche die frühen Phasen einer Immunreaktion einleiten, indem sie anderen Zellen der Körperabwehr Bestandteile von Krankheitserregern präsentieren.

Früher vermuteten viele Forscher, das Immunsystem greife Tumoren häufig deshalb nicht an, weil es sie nicht als »fremd« erkenne. Doch Hobohm hält dies nur für die halbe Wahrheit. Eine dendritische Zelle, postuliert er, müsse erst auf einen PRR-Liganden treffen, bevor sie andere Immunzellen (vor allem T-Lymphozyten) voll aktivieren könne. Da jedoch Krebszellen keine PRR-Liganden erzeugen, gelinge es den dendritischen Zellen nicht, eine wirksame Immun-

reaktion gegen den Tumor in Gang zu setzen. »Zwar attackiert die Körperabwehr den Tumor für gewöhnlich, doch meist zu schwach«, meint Hobohm. »Den dendritischen Zellen fehlen einfach PRR-Liganden, um die Abwehrmaschinerie hinreichend anzukurbeln.«

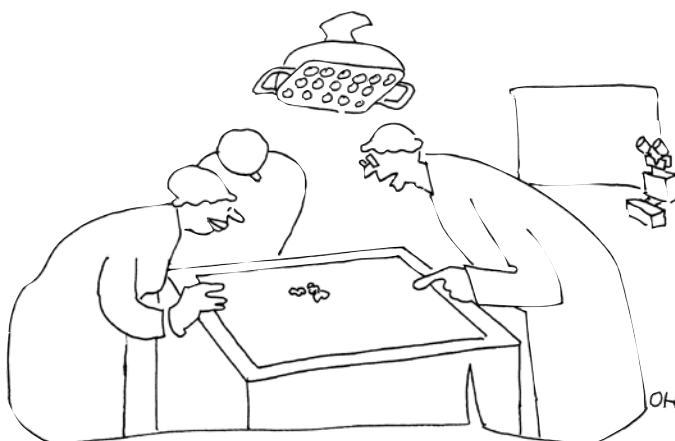
Dauerbombardement mit bakteriellen Substanzen

Hobohm prüfte diese Hypothese, indem er Mäusen mit künstlich erzeugten Tumoren eine Mischung kommerziell erhältlicher PRR-Liganden aus Bakterien spritzte. Zuvor hatten andere Forscher in ähnlichen Experimenten nur einzelne PRR-Liganden verabreicht oder, falls sie mehrere Liganden kombinierten, nur wenige Dosen der Mixtur gegeben. Coley dagegen gab die Bakterienpräparate über mehrere Wochen und teils über Monate hinweg, und zwar mindestens ein- bis zweimal wöchentlich. In Anlehnung an Coleys Methoden spritzte Hobohm über einen Zeitraum von drei Wochen hinweg insgesamt zehnmal eine Mischung aus drei verschiedenen PRR-Liganden. Hinterher waren vier von fünf Mäusen tumorfrei.

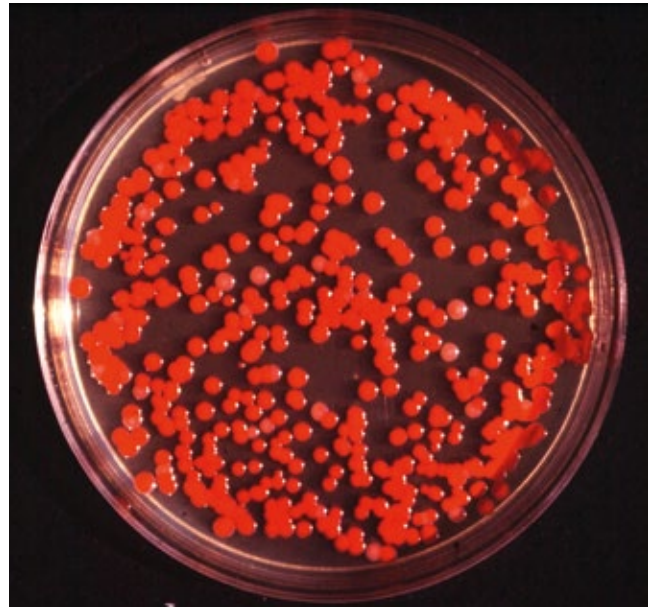
Eine der in der Studie verwendeten Substanzen, Mistel-Lektin, nutzen europäische Mediziner schon länger zur unterstützenden Therapie von Krebserkrankungen. Erst vor Kurzem stellte sich heraus, dass es sich um einen PRR-Liganden handelt. Laut Hobohm ähnelt die Struktur des Moleküls verblüffend der eines Giftstoffs, den das Bakterium *Shigella dysenteriae* erzeugt. Vermutlich löst Mistel-Lektin also – ebenso wie das bakterielle Gift – eine Immunreaktion aus. Auch der Wirkstoff Imiquimod, den Ärzte gegen einen bestimmten Hautkrebstyp, das Basaliom, einsetzen, dürfte ein PRR-Ligand sein. Hobohm vermutet, die Wirksamkeit beider Substanzen ließe sich durch kombiniertes Verabreichen zusammen mit anderen PRR-Liganden steigern.

Therapien auf der Basis von PRR-Liganden erzeugen allerdings häufig Fieber bei den Behandelten, ganz ähnlich wie die Bakterien, aus denen die Stoffe ursprünglich stammen. Da Fieber in der Regel eine Infektion anzeigt, gilt es in Studien zur Medikamentenentwicklung als unerwünschte Nebenwirkung. Tatsächlich starben einige von Coleys Patienten an Infektionen, als der Arzt anfänglich noch lebende Bakterien einsetzte. Andererseits überlebten solche Patienten, die nach dem Verabreichen seiner Präparate hohes Fieber entwickelt hatten, insgesamt länger als jene, bei denen keine oder nur eine geringe Temperaturerhöhung zu verzeichnen gewesen war.

Laut unveröffentlichten Daten erkrankten Empfänger des MBVax-Präparats seltener an Infektionen als andere Krebspatienten, und zwar trotz therapiebedingten Fiebers. Demzufolge scheint das Präparat nicht zu schaden. Doch die Vorbehalte gegenüber erhöhter Körpertemperatur erschweren es manchen Wissenschaftlern,



WIR MÜSSEN SO WAS WIE EINEN VORZEICHENFEHLER GEMACHT HABEN: NACH UNSERER BEHANDLUNG WURDEN NUR DIE KÖRPERZELLEN ATTACKIERT – DIE KREBSZELLEN ABER NICHT!



Bakterielle Infektionen mit *Streptococcus pyogenes* (links) und *Serratia marcescens* (rechts, eine Kolonie auf Agar-Nährboden) können Tumorerkrankungen zurückdrängen.

Geldmittel für ihre Studien zu erhalten, wie Stephen Hoption Cann erläuternd hinzufügt.

Andere Forscher stellen in Frage, ob Fieber für den Heilungserfolg notwendig ist. »Brauchen wir die Temperaturerhöhung wirklich, oder ist sie nur eine Begleiterscheinung der Therapie?«, fragt Simon Sutcliffe von der Firma Qu Biologics in Vancouver, Kanada. Sein Unternehmen verfolgt einen anderen, ebenfalls von Coley inspirierten Ansatz und erzielt damit bereits viel versprechende Behandlungserfolge bei Krebspatienten im fortgeschrittenen Erkrankungsstadium – ohne Fieber zu verursachen.

Für jedes Organ der richtige Keim

Hal Gunn, der Gründer und Direktor von Qu Biologics, entdeckte in Coleys Daten einen Zusammenhang, der anderen zuvor entgangen war. Coleys Therapie wirkte immer dann am besten, wenn die Tumoren in denjenigen Geweben saßen, die am anfälligsten gegenüber dem Bakterium *Streptococcus pyogenes* sind. Jede krankheitserregende Mikrobe infiziert nämlich bevorzugt bestimmte Organe oder Körperregionen. »In mir keimte der Verdacht, die Wirkung der Bakterienkur könne auf einer gewebespezifischen Immunreaktion beruhen«, erinnert sich Gunn. Qu Biologics hat seitdem eine Reihe von Immuntherapeutika entwickelt, und zwar jeweils aus Bakterienspezies mit einer bestimmten Organpräferenz: *Escherichia coli* für den Darm, *Klebsiella pneumoniae* für die Lunge und so weiter. Gunn bezeichnet sie als »site-specific immunomodulators« (SSI; deutsch: ortsspezifische Immunmodulatoren).

Gunn und seine Kollegen vermuten, dass die SSI das Immunsystem auf die Bekämpfung von Krebszellen einstellen,

indem sie am Ort des Tumors eine Infektion nachahmen. Insbesondere beeinflussten SSI-Moleküle wohl die Aktivität von Makrophagen: Immunzellen, die sich an frühen Phasen der Abwehrreaktion beteiligen. Die SSI, so Gunn, programmieren Makrophagen derart um, dass diese verstärkt dazu übergehen, abnorme Zellen zu zerstören.

Mehr als 250 Patienten mit fortgeschrittenen Tumoren wurden bereits mit SSI-Präparaten von Qu Biologics behandelt. Zwar liegt bisher keine randomisierte Vergleichsstudie vor, doch eine unabhängige Auswertung der Daten ergab, dass die SSI-Therapie die mediane Überlebenszeit von Patientinnen mit fortgeschrittenem Brustkrebs um 20 Monate verlängert hatte. Bei anderen Tumoren in einem späten Stadium betrug der Vorteil rund zwölf Monate. Qu Biologics plant für 2014 eine klinische Studie mit Lungenkrebspatienten.

Die Befürworter von Coleys Therapieansatz halten die Zeit für gekommen, die historischen Therapieerfolge endlich mit handfesten Untersuchungen zu belegen. »Nur klinische Studien können beweisen, dass diese Form der Immuntherapie den Krebspatienten tatsächlich nützt«, sagt Stephen Hoption Cann. »Und erst dann werden Therapien nach Coleys Vorbild auf dauerhaftes Interesse stoßen.«

DIE AUTORIN



Sarah DeWeerd ist freie Wissenschaftsjournalistin in Seattle, Washington, USA.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286305

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 504, S. 54–55, 19./26. Dezember 2013

Der wahre König der Tiere

Afrika kannte vor dem Auftritt der Gattung *Homo* viel mehr große Raubtiere als heute. Hielten die einstigen Herrscher der Savanne die neue Konkurrenz nicht aus?

Von Lars Werdelin

Die Serengeti in Ostafrika gilt als Urbild unberührter Wildnis – eine weite, hier und da mit Akazien durchsetzte Savanne mit riesigen Herden grasender Zebras und Gnus, dazwischen Elefanten und Giraffen. Typischerweise gehören zur Szenerie Löwen und Hyänen, die satt gefressen unter Bäumen dösen oder auf die nächste Mahlzeit lauern. Nach unserer Vorstellung sehen die heutigen ostafrikanischen Nationalparks kaum anders aus als vor zwei Millionen Jahren, als dort schon Menschen lebten: die ersten Arten der Gattung *Homo*. Unsere afrikanischen Vorfahren, so glaubte man bislang, haben diese Ökosysteme praktisch nicht verändert.

Nach meinen Fossilstudien gab es jedoch in Ostafrika zu Zeiten, bevor die Gattung *Homo* erschien, deutlich mehr Arten von großen Raubtieren als später, und vor allem deckten sie ein viel breiteres ökologisches Spektrum ab als die wenigen heutigen. Bemerkenswert ist dabei, dass der Schwund der Großraubtiere und ihrer Diversität offenbar gerade in dem Zeitraum einsetzte, als die frühen Menschen mehr Fleisch zu verzehren begannen und damit in Konkurrenz zu ihnen traten – vor etwas über zwei Millionen Jahren. Die Analysen der Befunde zeigen meines Erachtens: Lange bevor *Homo sapiens* vor wenigen hunderttausend Jahren auf der Bildfläche erschien, haben frühere Menschen ein Aussterben in beträchtlichem Maß in Gang gebracht.

Diese starken Umwälzungen müssen sich damals schon auf die übrige Tier- wie auf die Pflanzenwelt ausgewirkt haben. Sollte meine Vermutung richtig sein, dann hätte unsere Gattung von Anfang an Ökosysteme radikal verändert. Schon die vergleichsweise sehr kleinen Populationen der Frühmenschen prägten demnach ihre Umwelt.

Ausgestorbene Raubtiere faszinieren mich, seit ich als Teenager die spannenden Bücher des finnischen Paläontologen Björn Kurtén (1924–1988) las. Genauer müsste ich sagen: solche der Säugetierordnung Carnivora. Ich verstand, dass Fleischfresser notwendig sind, um den Bestand der Pflanzenfresser zu regulieren. Deren Populationen würden sonst explodieren. Erst viel später als Forscher begriff ich besser, wie



Ein Löwe bei der Jagd auf Afrikanische Büffel.

sich die Beziehungen zwischen Menschen und Großraubtieren über Jahrtausende entwickelt hatten.

In meinem Berufsleben habe ich 20 Jahre lang tausende Raubtierfossilien aus dem östlichen und südlichen Afrika untersucht. Ich möchte wissen, woraus die heutige Artenzusammensetzung Fleisch fressender Säugetiere hervorging, und habe mich zu dem Zweck auf die letzten sieben Millionen Jahre konzentriert. Bei diesen Forschungen arbeite ich meistens mit der Paläontologin Margaret E. Lewis vom Richard Stockton College in Galloway (New Jersey) zusammen. Sie ist Expertin für das Raubtierskelett vom Hals abwärts, während ich mich besonders mit Schädel und Zähnen auskenne.

Unsere umfangreichen Daten zeigen viel genauer als bisher möglich die Vielfalt an Raubtieren, die in Afrika zu ver-

schiedenen Zeiten während der letzten sieben Millionen Jahre existierte – und somit auch in allen bekannten Phasen der menschlichen Evolution. Immer klarer zeichnete sich im Verlauf dieser Studien ab, welche Carnivorenarten wann lebten und wieder verschwanden. Bemerkenswerterweise erlitten speziell die großen Fleisch fressenden Säugetiere massive Einbußen, als frühe Menschen zu einem vermehrten Fleischkonsum übergingen. Die Verluste betrafen Arten, die mehr als gut 20 Kilogramm wogen. Spezies ab diesem Gewicht wagen sich an Beutetiere heran, die so groß wie oder größer sind als sie selbst.

Die Fossilfundstätten vermitteln gewissermaßen Momentaufnahmen von der unterschiedlichen Zusammensetzung der afrikanischen Raubtierfauna zu verschiedenen Zeiten in den letzten sieben Jahrtausenden. Zu Anfang dieser

ISTOCKPHOTO / AOSTHUIZEN



Spanne lebten völlig andere Arten als heute. Der Fundort Lothagam am Westufer des Turkana-sees im Norden Kenias liefert 7,5 bis 5 Millionen Jahre alte Fossilien von Säbelzahn-tigern, seltsamen langbeinigen Hyänen, riesigen »Bären-hunden« aus der ausgestorbenen Raubtierfamilie der Am-phyconidae und von einem leopardengroßen Marder (Musteliden). Es gab zudem kleinere Fleischfresser, darunter Verwandte der heutigen Zibetkatten und Mungos.

Raubtierwelt vor Erscheinen des Menschen

Vor vier Millionen Jahren war ein uns bereits vertrautes Tier hinzugekommen: eine Hyäne. Am Fundort Kanapoi nicht weit von Lothagam war sie damals das häufigste Raub-tier. Von dieser Art stammt die heutige Schabrackenhyäne des südlichen Afrikas ab. Bei Kanapoi lebten einst außerdem noch Säbelzahnkatzen und Vertreter anderer jetzt ausgestor-bener Carnivorenlinien. Noch bekannter muten die Raub-tierfossilien von Laetoli in der tansanischen Serengeti an, die 4,4 bis 3,6 Millionen Jahre alt sind. Laetoli ist vor allem wegen der Fußspuren berühmt, die mehrere aufrecht gehende *Aus-tralopithecus*-Vormenschen dort vor wohl 3,6 Millionen Jah-ren zurückließen. Neben Säbelzahnkatzen finden sich schon Überreste modern aussehender Katzen, außerdem frühe Tüpfelhyänen, mehrere Hundarten, eine Riesenzibetkatze und eine Vielzahl kleinerer Raubtiere. Noch jünger ist Hadar in Äthiopien, von wo das 3,2 Millionen Jahre alte Skelett von »Lucy« stammt. Paläontologen fanden dort eine Fülle an Fos-silien von Säbelzahnkatzen, Hyänen und Hunden (Kaniden), außerdem Riesenotter, zu denen es keine moderne Entspre-chung gibt.

Sämtliche – auch andere – Fundstätten von vor 4 bis vor 2,5 Millionen Jahren ähneln sich im Wesentlichen. Abhängig von der Umwelt unterschied sich die jeweilige Artenzusam-mensetzung zwar etwas, aber letztlich handelte es sich um die gleichen Typen. Beispielsweise gab es immer Hyänen, nur teils verschiedene Arten. Und vor allem: Nichts deutet darauf hin, dass es den großen Raubtieren in Gegenwart der damals lebenden Homininen, die noch zu den Vormenschen zählen, in irgendeiner Hinsicht schlechter ergangen wäre als ohne sie.

Die meisten Arten großer Carnivoren lebten vor rund 3,5 Millionen Jahren, danach nahm ihre Anzahl während etwa eineinhalb Millionen Jahren allmählich ab. Dies lag vor allem

AUF EINEN BLICK

RAUBTIERRIVALE MENSCH

1 Vor drei Millionen Jahren gab es Afrika viel mehr Arten an gro-ßen Raubsäufern – **Carnivora** – als heute. Auch wiesen sie eine wesentlich weitere Bandbreite **ökologischer Funktionen** auf.

2 Ihr Niedergang setzte vor gut zwei Millionen Jahren ein. Ungefähr zu jener Zeit fingen **frühe Vertreter der Gattung Homo** an, zunehmend mehr Fleisch zu verzehren.

3 Womöglich waren viele Großraubtiere der **Konkurrenz durch den Menschen** nicht gewachsen. Ihr Verschwinden dürfte in der Tier- und Pflanzenwelt beträchtliche Veränderungen nach sich gezogen haben.

daran, dass weniger neue Spezies aufkamen, denn die Aus-sterberate blieb gleich. Noch behielten die großen Raubsäu-ger im großen Ganzen die Herrschaft. Unsere kleinen, langsa-men und recht wehrlosen Vorfahren stellten für sie einfach nur Nahrung dar. Doch irgendwann wendete sich das Blatt.

An unter zwei Millionen Jahre alten Fundplätzen ist un-verkennbar, dass sich die Raubtierzusammensetzung veränd-erte. Die Entstehungsrate neuer Arten war gleich bleibend gering – aber die Aussterberate nahm zu. Insbesondere nach der Zeit vor 1,5 Millionen Jahren fiel die Anzahl großer Raub-tierspezies steil ab. Und zwar verschwanden nun nicht nur einzelne Arten, sondern gleich ganze Artengruppen wie die Säbelzahnkatzen. Stattdessen machten sich moderne Arten zunehmend breit, darunter die Löwen, Leoparden und Scha-kale des heutigen Afrikas. Vor rund 300 000 Jahren waren sämtliche archaischen Linien der Carnivoren in Ostafrika verschwunden. An ihrer Stelle bestimmten nun die jetzigen Raubtiergemeinschaften das Bild.

Plötzlicher, steiler Niedergang

Die umfangreichen Datenanalysen bestätigten unsere frü-here Annahme, dass es in Afrika in der Vergangenheit mehr und verschiedenartigere Großraubtiere gegeben haben musste als heutzutage. Allerdings hatten wir nicht mit dem steilen Niedergang vor 1,5 Millionen Jahren gerechnet. Erst dieser Befund weckte bei uns den Verdacht, frühe Vertreter der Gattung *Homo* könnten daran schuld gewesen sein.

In den ersten Millionen Jahren ihrer Existenz wiesen die Homininen bei lediglich Schimpansengröße noch ein relativ kleines Gehirn auf und fraßen hauptsächlich Pflanzen. Vor 1,5 Millionen Jahren waren dann allerdings längst ganz and-ere Homininen aufgetreten: größere und klügere, mit Stein-werkzeugen ausgerüstete Wesen. Dieser *Homo erectus* – oder jetzt von vielen *Homo ergaster* – genannte frühe Mensch war der erste Primat, der uns im Körperbau stark ähnlich sah. Zu-gleich stellte er offensichtlich die erste Menschenart dar, die sich zunehmend auf den Verzehr von Fleisch verlegte. Im-mer größere Anteile seiner Kost stammten von großen Pflan-zenfressern. Darum fragten wir uns: Machten diese Men-

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Unser
Online-Dossier
zum Thema
»Der Ursprung
des Menschen« finden Sie unter



[www.spektrum.de/
menschwerdung](http://www.spektrum.de/menschwerdung)

schen wegen ihres Proteinhungers etwa den Großraubtieren bei deren Nahrungsbeschaffung Konkurrenz? Und gerieten die dadurch ins Hintertreffen?

So ganz schien der Zeitablauf allerdings nicht zu passen. Denn *Homo erectus* war schon vor fast 1,9 Millionen Jahren aufgetaucht, also um einiges früher. Nun sind reine Artenzahlen allerdings ein ungenaues Maß, wenn man die Entwicklung einer Säugetierordnung wie die der Raubtiere verfolgen möchte. Es kann sein, dass eine Teilgruppe zurückgeht, während eine andere zunimmt. Zahlen allein würden das überdecken. Wären zum Beispiel zwei Arten von Säbelzahnkatzen ausgestorben und dafür ein Löwe und ein Leopard hinzugekommen, bliebe zwar die Gesamtanzahl gleich, doch die Raubtiergemeinschaft wäre nun eine ganz andere. Denn Löwe und Leopard können ein breiteres Beutespektrum nutzen als Säbelzahnkatzen.

Darum war mir wichtig, mehr über die Diversität und den ökologischen Stellenwert der einzelnen Raubtierarten herauszufinden. Zwischen den heutigen Spezies variiert der Fleischanteil in ihrer Nahrung beträchtlich. Die Katzen, also etwa Löwen, vertilgen überwiegend Fleisch und werden darum als hyperkarnivor bezeichnet. Andere Gruppen, darunter die Hundarten, nehmen gern auch alles mögliche andere zu sich. Sie sind omnivor – Allesfresser. Und die hypokarnivoren Waschbären beispielsweise fressen hauptsächlich Obst und Gemüse und nur wenig Fleisch.

Wie stark unterschieden sich die Raubtiere in einer ökologischen Gemeinschaft?

Ich knüpfte an Untersuchungen von Gina D. Wesley-Hunt an, die jetzt am Montgomery College in Rockville arbeitet und nach ihrer Promotion bei mir geforscht hatte. Sie befasste sich mit der Evolution der nordamerikanischen Carnivoren während der letzten 60 Millionen Jahre. Unter anderem bestimmte sie Merkmale – also Anpassungen – für die Funktion der Kiefer und Zähne. Damit konnte sie messen, wie stark sich die einzelnen Raubtierarten einer ökologischen Gemeinschaft voneinander unterscheiden: in dem, was sie fraßen, und somit in ihrer ökologischen Rolle. Nach diesem Schema sortierte ich Fossilien von 78 afrikanischen Carnivorenarten aus den letzten 3,5 Millionen Jahren – 29 große und 49 kleine Spezies. Dann schaute ich, inwiefern sich die Nischenverteilung innerhalb einzelner ökologischer Gemeinschaften über die Zeit verändert hatte, also wie viele Arten im Ökosystem jeweils bestimmte Funktionen abdeckten.

Die Daten unterwarf ich einer statistischen Analyse, so dass ich zweidimensionale Diagramme – »Morphoräume« – erstellen konnte, in dem jede Art als ein Punkt erscheint (siehe Kasten S. 38). Dieser Punkt markiert die Ausprägung einiger prägnanter ökologischer Eigenschaften der Spezies im Zusammenhang mit ihrer Ernährungsweise: in dem Fall den Fleischanteil der Nahrung sowie ein bezeichnendes anatomische Merkmal vom Gebiss. Insgesamt lassen sich so die Morphoräume verschiedener Zeitabschnitte abbilden und die jeweilige Verteilung der Arten darin vergleichen. Denn jede



dieser Darstellungen repräsentiert die Vielfalt der Raubtierformen und ihrer daraus abgeleiteten ökologischen Funktionen in einer gegebenen Phase. Die Bilder vermitteln also einen Eindruck davon, wie sich die ökologische Relevanz der Raubtiergemeinschaften im Ganzen wandelte, wenn man ihr Artenspektrum betrachtet.

Was dabei herauskam, war bestürzend: Die heutigen Großraubtiere Ostafrikas besetzen kaum 1,5 Prozent des Morphoraums, den ihre Verwandten in dem Abschnitt vor über 3 Millionen Jahren einnahmen, als ihre Artenvielfalt am größten war. Das bedeutet, die Carnivora haben beinahe 99 Prozent ihres einstigen Funktionsreichtums verloren. Sie erfüllen also wesentlich weniger ökologische Rollen als früher. Wie unsere Erhebung auch zeigte, hatte der Rückgang der Funktionsvielfalt schon vor 2 bis vor 1,5 Millionen Jahren eingesetzt. Die Verarmung des Artenspektrums muss folglich bereits vor über zwei Millionen Jahren begonnen haben. Das wiederum fiel mit der Entstehung von *Homo erectus* zusammen.

Unsere Erhebung erfasste nur die ostafrikanischen Raubtiere. Da heute auf dem ganzen Kontinent im Wesentlichen die gleichen großen Fleischfresser vorkommen, ist zu vermuten, dass der drastische Rückgang ihres Artenspektrums und ihrer ökologischen Funktionen ganz Afrika betrifft.

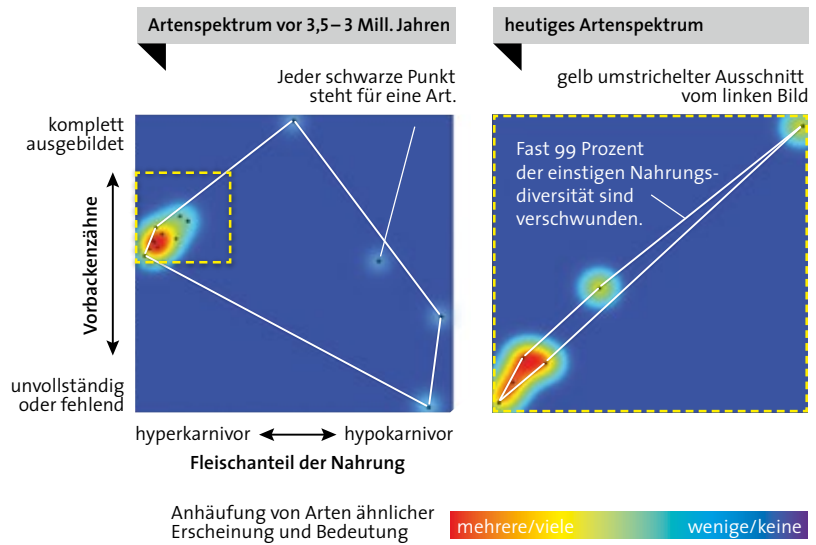
Allerdings ist die Konkurrenz des Menschen hierfür nicht die einzige mögliche Erklärung. Bislang wurden viele Umschwünge der afrikanischen Tierwelt in den letzten Millionen Jahren mit Klimaveränderungen in Verbindung gebracht. Betrachtet man die Artenzahlen vor dem Hintergrund klimatischer Ereignisse, so spricht hierfür auf den ersten Blick tatsächlich viel. Jedoch zeigen Forschungen an modernen Carnivorenspezies, dass sich eine Klimaverschiebung heutzutage allenfalls geringfügig auf den Funktionsreichtum ihrer Artengemeinschaften auswirkt. Denn gegenüber einem Wandel der Wetterbedingungen und den damit verbundenen Umweltveränderungen sind diese Fleischfresser im Allgemeinen ziemlich unempfindlich – völlig anders als die Pflanzen fressenden Säugetiere, die von der Verbreitung ihrer Nahrungspflanzen abhängig und darum von Klimaveränderungen unmittelbar betroffen sind. Weiterhin

Ökologisch nur noch ein Schatten von einst

Fossilien aus den letzten sieben Jahrtausenden zeigen: In Afrika lebten früher viel mehr Arten großer räuberischer Säugetiere (Carnivora) als heute, und deren Ernährungsweise war wesentlich breiter gefächert. Ihr Spektrum reichte von hypokarnivoren Arten, die vorwiegend Pflanzen fraßen, bis hin zu hyperkarnivoren, die fast nur Fleisch vertilgten. Heute existieren lediglich noch einige wenige reine Fleischfresser. Der Niedergang der Großraubtiere setzte vor etwa zwei Millionen Jahren ein. Das fällt in die Zeit, als *Homo erectus* auftrat – der erste Mensch, der nennenswerte Mengen Fleisch verzehrte. Machte er den Raubtiergemeinschaften schon damals ihre Existenz streitig?

ANZEICHEN FÜR VERSCHWUNDENE VIelfALT

Die beiden Grafiken zeigen den »Morphoraum« des Artenspektrums großer Carnivoren von zwei verschiedenen Zeitabschnitten; links Höhepunkt der Artenzahl, rechts heute. Die weiß eingezeichneten Polygone umschließen den von der Raubtier-



gemeinschaft jeweils eingenommenen ökologischen Raum. Die heutigen Arten passen sämtlich in das links gelb umrandete Feld. Neben dem Typ der Karnivorie liefert die Ausprägung der Vorbackenzähne ein gutes Maß für die Ernährungsweise.

spricht gegen das Klimaargument, dass in Afrika die kleinen Raubsäuger keine solchen schweren Einbußen erlitten. Sowohl ihr Artenreichtum als auch ihre ökologische Vielfalt blieben über die letzten 3,5 Millionen Jahre die meiste Zeit groß und nahmen insgesamt vielleicht sogar etwas zu.

Trotzdem müsste man erst einmal abklären, ob Menschen im frühen Pleistozän überhaupt schon ernstliche Nahrungskonkurrenten der Großraubtiere gewesen sein konnten. Welchen Stellenwert hatte Fleischnahrung für sie zu dieser Zeit? Archäologen sind sich bei der Antwort nicht einig. Zwar glauben sie alle, dass der frühe *Homo* vor 2 bis vor 1,5 Millionen Jahren immer mehr tierisches Protein verzehrte, vielleicht auch von Fischen und Meeresfrüchten. Aber nur ein Teil der Forscher denkt, dass Fleischnahrung und das Erjagen von Tieren schon damals für die Homininen unverzichtbar wurden. Andere meinen, dies sei noch eher Nebensache gewesen. Nach ihrer Ansicht verschafften sich jene Menschen höchstens ab und zu durch Aufspüren von Aas, das Raubtiere zurückließen, ein paar Zusatzproteine.

Der Anthropologe Henry Bunn von der University of Wisconsin in Madison stellt sich die Entwicklung hin zu mehr Fleischkonsum in drei Stufen vor. Der von ihm postulierte Ablauf würde zeitlich gut zu der Idee passen, dass die Homininen den Großraubtieren schließlich ernstlich Konkurrenz machten und dadurch eine Anzahl von ihnen zum Aussterben brachten. Auf der ersten Stufe hätten sich die Homi-

ninen nur gelegentlich Fleisch verschafft, das sie mit vorgefundenen scharfkantigen Steinen oder sogar schon mit einfachem, selbst hergestelltem Steinwerkzeug von Knochen absäbelten. Diese Phase legt Bunn in die Zeit vor ungefähr 2,6 bis vor 2,5 Millionen Jahren, für die er Schnittspuren auf Knochen fand.

Auf der zweiten postulierten Stufe wurde das Zerlegen von Tieren schon mehr zur Routine. Die Homininen lernten jetzt, Knochen aufzubrechen und das Knochenmark zu gewinnen. Außerdem nahmen sie fleischreiche Teile von Kadavern zu ihren Lagern mit. Fleisch verschafften sie sich nun regelmäßig von Aas und möglicherweise mitunter auch, indem sie selbst Tiere erlegten. Dieses Stadium könnte nach Bunn vor 2,3 bis vor 1,9 Millionen Jahren erlangt worden sein.

Auf der dritten Stufe – laut Bunn vor 1,8 bis vor 1,6 Millionen Jahren – verwerteten die Homininen aufgestöberte Kadaver gründlich. Jetzt hatten sie öfter Zugang zu kompletten toten Tieren, denn sie verstanden sich sowohl besser darauf, Raubtiere von einem Riss zu vertreiben, als auch selbst zu jagen. Zwar besaßen sie bei Weitem nicht solch gefährliche Zähne und Krallen wie die großen Carnivoren und nicht deren Körperkräfte, aber das machten sie mit ihrer schnell wachsenden Intelligenz wett, wobei Kooperation ihnen zusätzlich Stärke verlieh. Hinzu kam, dass die frühen Menschen Allesfresser waren und darum wildarme Phasen viel besser überstanden als insbesondere die reinen Fleisch-

fresser, zu denen die Säbelzahnkatzen gehörten. Gerade in Zeiten, wenn die Raubtiere hungerten, fanden die Homininen immer noch etwas Essbares. Dann waren sie gegenüber der Konkurrenz am meisten im Vorteil. Übrigens leben sämtliche derzeitigen afrikanischen Großraubtiere hyperkarnivor, was wohl auch daher rührt, dass bereits früher der größte Teil ihrer Arten in diese Fraktion gehörte (siehe Kasten links, linke Grafik).

Wie jede neue Hypothese enthält auch unsere eine Reihe noch nicht geklärter Aspekte. An erster Stelle steht die Frage, wie gut die zeitlichen Entwicklungen zusammenpassten, vor allem, wann genau sie sich anbahnten: Wann begann es mit den Großraubtieren bergabzugehen, und wann wurden die Menschen zu einer maßgeblichen Konkurrenz? Für stichhaltige Schlussfolgerungen hinsichtlich Ursachen und Wirkungen ist das Bild noch zu verschwommen. Außerdem wissen wir nicht, ob die Homininen damals ausreichend zahlreich waren, um einen solchen verheerenden Einfluss auszuüben. Unsicher ist zudem ihre Geschicklichkeit und Durchsetzungsfähigkeit als Konkurrenten.

Massive ökologische Folgen

Um festzumachen, wann der Niedergang der großen Raubtiere einsetzte, bräuchten wir mehr Fossilien aus der Phase von vor 2,5 bis vor 2 Millionen Jahren – oder zumindest verfeinerte Analysemethoden für das vorhandene Material. An der Entwicklung solcher Verfahren arbeite ich zurzeit. Definitiv kann ich jetzt schon sagen: Vor 1,8 Millionen Jahren hatte der Schwund dieser Carnivoren bereits angefangen. Nach den derzeit besten Analysen sieht es außerdem so aus, dass der Rückgang vor gut zwei Millionen Jahren begann. Ob sich dies mit Zeitmarken und Ereignissen der Homininenevolution in Einklang bringen lässt, ist dagegen bisher nicht geklärt. Die von Henry Bunn aufgestellte Zeittafel zur Fleischbeschaffung bei Homininen verträgt sich zwar völlig mit dem hier vorgestellten Szenario – sie erfährt aber auch Kritik, denn einige Forscher sind der Ansicht, dass die ersten beiden postulierten Stufen beträchtlich später waren als von Bunn angenommen.

Wie zahlreich die Homininen zur fraglichen Zeit waren und wie konkurrenzfähig gegenüber den Raubtieren, werden wir vielleicht nie wissen. Die Vorstellungen dazu sind bisher vorwiegend Ansichtssache. Dass ihre Populationsdichte gering war, steht fest – es fragt sich aber, wie gering. Möglicherweise lassen sich beide Faktoren, die Populationsdichte und die Konkurrenzstärke, mit Simulationen untersuchen. Man müsste dann verschiedene plausible Werte eingeben und ausprobieren, ob ein vernünftiges Szenario herauskommt. Genaue Zahlen und harte Belege zu den beiden Bereichen dürfen wir nicht erwarten – was nicht bedeutet, dass meine Hypothese falsch ist.

Von meinen Kritikern erhoffe ich mir gute Ideen für neue Überprüfungen dieser Zusammenhänge. Erwähnen sollte ich auch, dass ich den Aufbau von Ökosystemen, das heißt

die Einflussnahme zwischen den Ebenen der Nahrungskette, in dem Fall in umgekehrter Richtung betrachte als meist üblich. Gewöhnlich schauen Forscher »von unten nach oben«: Sie untersuchen, wie sich Klimafaktoren auf die Pflanzen auswirken, wie die Pflanzen die sie fressenden Tiere beeinflussen und so weiter bis hin zu den Raubtieren an der Spitze. Bei meinem Ansatz richtet sich der Blick »von oben nach unten«. Mich interessiert, was es für die untergeordneten Ebenen der Nahrungskette bis hin zu den Pflanzen bedeutet, wenn Topkarnivoren ausfallen oder sich ihre Artengemeinschaft verändert.

Wie stark große Raubtiere ein Ökosystem manipulieren können, zeigte sich eindrucksvoll, als im Yellowstone-Nationalpark in den USA wieder Wölfe angesiedelt wurden. Die Vegetation veränderte sich deutlich. Insbesondere dezimierten die Wölfe die Wapitis (amerikanische Rothirsche), wodurch der Weidedruck auf junge Bäume überall dort abnahm, wo die Hirsche am liebsten fressen (siehe SdW 8/2004, S. 24 und SdW 9/2013, S. 92).

Als in Afrika ein früher *Homo* in die ökologische Nische der Raubtiere vordrang, könnte er eine Kaskade ökologischer Umbrüche in Gang gesetzt haben, deren Dramatik die Vorgänge von Yellowstone weit übertraf. Wölfe gehörten früher zur nordamerikanischen Landschaft, und die übrige Tierwelt war an ihre Anwesenheit noch einigermaßen angepasst. Doch die Menschengattung erschien als etwas völlig Neues. Vorstellbar wäre, dass sich die deutlichsten Spuren vom Untergang so vieler Großraubtiere gar nicht an den menschlichen Überresten oder denen der Raubtiere selbst finden, sondern bei den Pflanzen fressenden Arten und den Pflanzen. ~

DER AUTOR



Lars Werdelin ist leitender Kurator für fossile Säugetiere am Schwedischen Museum für Naturgeschichte in Stockholm.

QUELLEN

Lewis, M. E., Werdelin, L.: Patterns of Change in the Plio-Pleistocene Carnivorans of Eastern Africa: Implications for Hominin Evolution. In: Bobe, R. et al. (Hg.): Hominin Environments in the East African Pliocene: An Assessment of the Faunal Evidence. Dordrecht, Springer 2007, S. 77–105

Werdelin, L., Lewis, M. E.: Temporal Change in Functional Richness and Evenness in the Eastern African Plio-Pleistocene Carnivoran Guild. In: PLoS One 8, S. 1–11, März 2013

WEBLINKS

Dieser Artikel und ein Link bei Scientific American zu einer zusätzlichen Grafik zur Frage des Klimaeinflusses: www.spektrum.de/artikel/1286306

Hilfe für autistische Kinder

Autismus und ähnliche Störungen stellen bislang ein medizinisches Rätsel ohne Aussicht auf Heilung dar. Doch einige Therapien haben sich inzwischen bewährt – und weitere befinden sich in Erprobung.

Von Nicholas Lange und Christopher J. McDougle

Jayden war 14 Monate alt, als seine Eltern Adrianna und Jermaine Hannon zum ersten Mal das Gefühl hatten, mit ihm könnte etwas nicht stimmen. Ihr Sohn beschäftigte sich fast ausschließlich mit Spielzeugautos, wobei er unablässig ihre Räder drehte – in einem Alter, in dem Kinder meist rasch von einer Tätigkeit zur anderen wechseln. Zudem reihte Jayden Autos, Zeitschriften oder Bausteine in möglichst geraden Linien aneinander, anstatt sie wie Gleichaltrige zu stapeln.

Seit seinem ersten Geburtstag hatte Jayden Sprechversuche unternommen; mit 16 Monaten wurden sie zunehmend seltener. Auch sah er andere Familienmitglieder kaum noch an, wenn sie ihn riefen. Als versehentlich ein großer Topf direkt neben dem Jungen zu Boden fiel, reagierte dieser überhaupt nicht. Der Kinderarzt versicherte Adrianna, sie brauche sich nicht wegen Jaydens Verhalten zu sorgen, da sich gerade Jungen in Schüben entwickeln und auch oft erst später sprechen lernen als Mädchen. Er riet lediglich zu einem Hörtest, der aber keinerlei Auffälligkeiten erkennen ließ.

Im Alter von 18 Monaten musste Jayden wegen 40 Grad hohen Fiebers in die Notaufnahme. Die Ursache dafür blieb trotz einer umfassenden medizinischen Untersuchung unklar. Letztendlich sank seine Körpertemperatur zwar wieder ab, doch seitdem sprach Jayden kein einziges Wort mehr. Er reagierte auch nicht mehr auf seinen Namen und nahm nur

noch zur Mutter Blickkontakt auf. Wollte er etwas haben, ergriff er Adriannas oder Jermaines Hand und brachte sie wortlos zum gewünschten Objekt. Räder von Spielzeugautos faszinierten ihn weiterhin; er rollte sie pausenlos hin und her. Ebenso fesselte ihn ein Micky-Maus-Video, das er auf dem iPad ständig abspielte.

Schließlich entschlossen sich Jaydens Eltern, ihn in eine Klinik zu bringen, die sich auf Störungen aus dem Autismusspektrum spezialisiert hat. Betroffene Kinder zeichnen sich durch dauerhafte Defizite in ihrer sozialen Kommunikation und Interaktion aus sowie durch einen Hang zu repetitiven Verhaltensweisen, wie etwa Vor- und Zurückschaukeln oder das ständige Wiederholen von bestimmten Lauten.

Nachdem ein Psychologe der Klinik Jaydens Verhalten über mehrere Stunden hinweg beobachtet hatte, bestätigte er den Verdacht der Eltern: Der Junge leidet tatsächlich an Autismus. Wie Adrianna und Jermaine müssen tausende Eltern jedes Jahr erfahren, dass ihr Kind von einer solchen Störung betroffen ist. Und immer noch stellt die Erkrankung ein Rätsel dar, das die diagnostischen und therapeutischen Fähigkeiten der Ärzte herausfordert.

Seit der amerikanische Psychiater Leo Kanner (1896–1981) 1943 erstmals den Begriff »frühkindlicher Autismus« prägte, suchen Wissenschaftler nach etwas objektiv Messbarem, das auf die Erkrankungsursache hinweist – sei es ein Molekül, ein Gen, elektrische Aktivität in neuronalen Schaltkreisen oder ein charakteristischer Unterschied in der Gehirngröße. Sie hoffen, dass ein solcher biologischer Anhaltspunkt die Diagnose erleichtern und die Entwicklung besserer Therapien ermöglichen könnte. Bisher haben sich zwar einige Medikamente als wirksam gegen die Angstzustände, Depressionen und Wutanfälle erwiesen, die autistische Kinder häufig zeigen. Doch keines der Mittel kuriert die grundlegenden Symptome: die sozialen und sprachlichen Probleme sowie die repetitiven Bewegungen.

Dabei wäre eine solche Therapie dringend nötig. Je nach Untersuchung leidet bis zu einem Prozent der Bevölkerung oder sogar noch mehr unter einer Störung aus dem Autismusspektrum. Immerhin verbreiteten sich in den letzten Jahren einige nicht medikamentöse Behandlungsformen, die Kindern wie Jayden entscheidend helfen. Sie schulen die

AUF EINEN BLICK

EIN NORMALES LEBEN ERMÖGLICHEN

1 Zeigt sich ein Kind mit rund zwei Jahren als unfähig zur Interaktion mit Eltern, Geschwistern und Gleichaltrigen, deutet dies auf eine Störung aus dem **Autismusspektrum** hin.

2 Inzwischen haben sich einige **Verhaltenstherapien** bewährt, die – früh genug begonnen – die kommunikativen und sozialen Fähigkeiten der Betroffenen verbessern und im optimalen Fall einen regulären Schulbesuch sowie normale Beziehungen zu Freunden und Familie ermöglichen.

3 Ein besseres Verständnis der Biologie des Autismus würde darüber hinaus die Entwicklung neuer **Diagnosemethoden** sowie von Medikamenten erlauben, welche die Verhaltenstherapien unterstützen könnten.

Mit 22 Monaten wurde der kleine Jayden – hier mit seiner Mutter Adrianna Hannon – als autistisch diagnostiziert.





TIMOTHY ARCHIBALD

Mutter und Kind spielen an der University of California in Davis, wo Jayden im Rahmen einer Therapie seine Kommunikationsfähigkeiten verbessert.

Betroffenen, sich sozial angemessen zu verhalten – beispielsweise der Mutter ins Gesicht zu sehen, wenn sie spricht. Sofern früh genug begonnen, können diese Therapien ihnen den Besuch einer konventionellen Grund- und weiterführenden Schule statt einer Spezialeinrichtung ermöglichen und eröffnen die Perspektive auf ein normales Leben mit Beruf und eigener Familie. In Zukunft könnten noch zwei weitere Standbeine einer effektiven Autismustherapie hinzukommen: neue Technologien, die eine eindeutige Diagnose vor dem zweiten Lebensjahr erlauben, sowie Medikamente zum Ausgleich biochemischer Ungleichgewichte, die der Erkrankung zu Grunde liegen.

Soziale Reize besser wahrnehmen

Jüngste Forschungen zeigten auf, dass bestimmte Verhaltenstherapien soziale oder sprachliche Fähigkeiten verbessern und es jungen Autisten ermöglichen, sich wie Gleichaltrige zu verhalten – etwa mit anderen zu spielen. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für intensive Einzeltherapien, die entsprechend geschulte Fachkräfte in Zusammenarbeit mit den Eltern durchführen. Das »Early Start Denver Model« (ESDM) zum Beispiel nutzt Erkenntnisse der Entwicklungspsychologie und der angewandten Verhaltensanalyse, um kognitive, sprachliche und soziale Fähigkeiten zu verbessern. Bei dieser Interventionsmethode schult der Therapeut die Wahrnehmung sozialer Hinweisreize: Autistische Kinder sollen schon früh darauf trainiert werden, Gesichtsausdrücke, Gesten und gesprochene Wörter besser zu erkennen.

Während gesunde Kinder eher auf ein Gesicht als auf einen Bauklotz reagieren, sprechen Autisten normalerweise stärker auf ein Objekt als auf die Blicke eines Elternteils an. Daher versucht ein ESDM-Therapeut, die Aufmerksamkeit des Patienten auf Gesichter und Stimmen zu lenken. Er zeigt beispielsweise ein Spielzeug und gibt ihm einen interessant klingenden Namen. Sobald das Kind hinsieht, beginnt er es in ein Spiel damit einzubinden. Auf diese Weise soll es zunehmend Gefallen an zwischenmenschlicher Interaktion finden. Gleichzeitig bringt der Therapeut ihm soziale und kommunikative Fähigkeiten bei.

Inzwischen belegen auch wissenschaftliche Studien die Wirksamkeit von ESDM. Geraldine Dawson von der Duke University und Sally J. Rogers von der University of California in Davis erbrachten den bislang stärksten Nachweis, dass diese frühzeitige Intervention bei Autismus hilft. Nach zwei Jahren intensivem Training, das ihre jungen Probanden im Alter zwischen 18 und 30 Monaten begannen, schenkten die Kinder Gesichtern mehr Aufmerksamkeit als Autisten, die an anderen Verhaltenstherapieprogrammen teilgenommen hatten. Auch bei kognitiven Tests schnitten sie nach der ESDM-Therapie besser ab: Ihr Entwicklungsquotient – sozusagen der IQ für Kleinkinder – stieg durchschnittlich um 10,6 Punkte mehr an als der Wert jener, die nicht gemäß ESDM behandelt wurden. Die Therapie milderte zudem soziale Defizite und repetitive Verhaltensweisen.

Mit bildgebenden Verfahren lassen sich auch positive Veränderungen im Gehirn zeigen. Areale, die an der Gesichtswahrnehmung beteiligt sind, waren nach der ESDM-Behandlung nicht nur aktiver als nach einem anderen Therapieprogramm, sondern weisen sogar ähnliche Muster auf wie bei gesunden Vierjährigen. Als die Forscher die elektrische Aktivität des Gehirns mittels Elektroenzephalogramm (EEG) untersuchten, registrierten sie gegenüber den Vergleichsprobanden verstärkte so genannte Thetawellen im Hippocampus. Normalerweise zeigen Kinder einen solchen Anstieg bei Aufgaben, die fokussierte Aufmerksamkeit und Kurzzeitgedächtnis fordern.

Alphawellen hingegen, die meist bei entspannter Ruhe auftreten, waren in verschiedenen Hirnregionen einschließlich des Hippocampus vergleichsweise schwach ausgeprägt. Das könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Gehirn der Kinder zunehmend auf menschliche Gesichter reagierte. Treten nach einem äußeren Ereignis sowohl erhöhte Theta als auch verminderte Alphaaktivität auf, spiegelt das laut früherer Studien verstärktes neuronales Feuern in der Großhirnrinde wider, und zwar speziell im präfrontalen und anterioren zingulären Kortex, die an der Gesichtswahrnehmung beteiligt sind. Damit könnten die Befunde den Forschern zufolge den Leistungsanstieg in den kognitiven Tests erklären.

Um diese Verbesserungen zu erreichen, arbeiteten die ESDM-Therapeuten zwei Jahre lang fünf Tage die Woche je zwei mal zwei Stunden mit den Kleinen – das sind über 2000 Stunden intensive Therapie. Ein Medikament, das diesen Prozess ersetzt oder zumindest beschleunigt, wäre eine gro-

ße Hilfe für die Betroffenen und ihre Familien. Daher suchen Forscher nach Mitteln, die typische Symptome wie beeinträchtigte soziale Kommunikation, Hyperaktivität und Unaufmerksamkeit sowie repetitive, ritualisierte Bewegungen und Schlafstörungen mildern.

Der wohl geeignetste Kandidat für ein solches Medikament ist das Gehirnhormon Oxytozin – auch bekannt als »Kuschel-« oder »Vertrauenshormon«. Es spielt bei der Schwangerschaft eine zentrale Rolle, da es den mütterlichen Körper auf die Geburt vorbereitet. Mit steigender Oxytozinkonzentration schwellen die Brüste an und füllen sich mit Milch; später löst das Hormon die Wehen aus. Innerhalb der letzten 25 Jahre stellte sich heraus, dass Oxytozin auch bei Männern vorkommt und unter anderem die Eltern-Kind-Bindung fördert sowie Vertrauen zwischen Freunden festigt.

Ist der Fremde mir freundlich gesinnt?

Oxytozin gilt als potenzielles Autismusmedikament, denn laut Experimenten ermöglicht bereits eine einzige intravenös oder per Nasenspray verabreichte Dosis autistischen Kindern etwas, was sie ohne das Hormon nicht können: eine fremde Person als freundlich oder feindselig einschätzen. Genetischen Studien zufolge scheint Oxytozin auch soziales Verhalten zu fördern. So sind Mäuse mit ausgeschaltetem Gen für den Rezeptor CD38, der an der Regulation der Oxytozinausschüttung beteiligt ist, Artgenossen gegenüber weniger zutraulich und erkennen diese wohl nicht so gut wieder. Zudem deuten einige Untersuchungen von autistischen Patienten auf Abweichungen bei den Bindungsstellen (Rezeptoren) für Oxytozin sowie auf verringerte Konzentrationen des Hormons hin.

Jetzt ist der Weg frei für breiter angelegte Untersuchungen: Die Nationalen Gesundheitsinstitute der USA (NIH) finanzieren derzeit mit 12,6 Millionen Dollar eine Studie zur intranasalen Verabreichung von Oxytozin (Study of Oxytocin in Autism to Improve Reciprocal Social Behaviors, SOARS-B). Nach dem Zufallsprinzip werden die Probanden für einige Jahre einer Behandlungs- und einer Kontrollgruppe zugeordnet. Danach gilt es zu entscheiden, ob Oxytozin ein fester Bestandteil der Autismustherapie wird. Der Effektivitätsnachweis ist unter anderem auch deshalb wichtig, weil viele Eltern ihren autistischen Kindern bereits heute Oxytozin verabreichen. Manche Ärzte verschreiben es, obwohl die bisherigen Befunde nicht ausreichend gesichert sind. Sollte die Studie die Wirksamkeit bestätigen, könnte das Hormon die ESDM-Behandlung unterstützen, indem es den Kindern erleichtert, auf die Zuwendung des Therapeuten zu reagieren.

Letztlich müssen Forscher aber noch besser verstehen, was hinter den geistigen und körperlichen Symptomen von Autismus steckt, um effektivere Therapien entwickeln zu können. Die genetischen Hintergründe sind jedoch zum Großteil noch unbekannt. Denn es stellt eine gewaltige Herausforderung dar, die Mutationen zu bestimmen, welche der Störung zu Grunde liegen. Laut einigen Studien könnten Veränderungen in 400 bis 800 Genen die Neigung zu Autismus

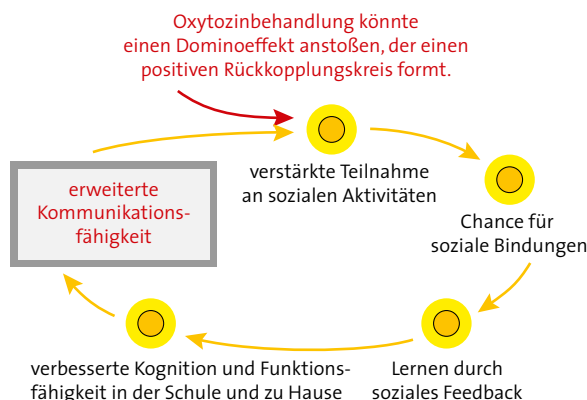
verstärken. Offenbar spielen so genannte Kopienzahlvariationen hier eine wichtige Rolle; dabei liegen längere DNA-Abschnitte mit möglicherweise mehreren Genen in unterschiedlich vielen, identischen Ausfertigungen vor.

Ein neues Forschungsergebnis deutet nun darauf hin, dass die komplexe Genetik des Autismus doch etwas übersichtlicher sein könnte als ursprünglich angenommen. Die Studie hatte das Erbgut von 55 Patienten aus 9 Familien im US-Bundesstaat Utah untersucht und insgesamt 153 Kopienzahlvariationen gefunden, die bei gesunden Kindern nicht vorkamen, sowie 185 Kopienzahlvariationen, die laut früheren Publikationen mit Autismus zusammenhängen. Anschließend suchten die Genetiker nach diesen Auffälligkeiten bei 1544 autistischen Kinder aus dem Autism Genetic Resource Exchange (AGRE) Genregister und dem Children's Hospital of Philadelphia sowie bei 5762 gesunden Kontrollpersonen, die alle nicht untereinander oder mit den Probanden aus Utah verwandt waren. Mit molekularbiologischen Methoden grenzten die Forscher die Zahl der wahrscheinlich an Autismus beteiligten Kopienzahlvariationen schließlich auf 46 ein, womit sie einen Großteil der bis dahin mit der Erkrankung in Verbindung gebrachten genetischen Faktoren wieder aussortiert hatten. In der Regel tragen wohl jeweils mehrere verschiedene Gene zur Ausprägung der Symptome bei. Viele dieser DNA-Sequenzen könnten »de novo«-Mutationen enthalten, also Veränderungen der Erbinformation, die im jeweiligen Individuum erstmals aufgetreten sind.

Sicherlich gibt es kein einziges universelles Gen, das die Störung bei allen Patienten verursacht. In manchen Fällen

»Kuschelhormon« als Autismusmedikament

Da das Hormon Oxytozin die Interaktion zwischen Menschen fördert, hilft es vielleicht auch gegen die sozialen Defizite von Autisten. Es könnte sie Beziehungen eingehen lassen und dadurch eine Kettenreaktion in Gang setzen, die letztlich die kognitiven Funktionen verbessert. Dies prüfen derzeit laufende klinische Studien.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

lässt sich Autismus aber doch auf ein einzelnes defektes Gen zurückführen, was wichtige Ansätze für die weitere Forschung liefert. Diese seltenen Einzelgenmutationen finden sich bei etwa fünf Prozent der Betroffenen. Wissenschaftler untersuchen deren psychologische und molekulare Besonderheiten in der Hoffnung, so auch die häufiger auftretenden Fälle besser zu verstehen, bei denen das Zusammenwirken mehrerer Gene autistische Symptome hervorruft.

Forscher haben bereits einige Störungen identifiziert, die auf Einzelgenmutationen beruhen und zu Autismus sowie anderen, davon unabhängigen Symptomen führen. Etwa das Rett-Syndrom, das vor allem bei Mädchen auftritt und die Entwicklung neuronaler Schaltkreise in ihrem Gehirn beeinträchtigt. Der IQ der Betroffenen ist nur schlecht erfassbar. Manche von ihnen sind so ausgeprägt autistisch, dass ihnen sämtliche grundlegenden sprachlichen und motorischen Fähigkeiten verloren gehen.

Stammzellen für die Autismustherapie

Zu den Stoffen, die solche Symptome lindern könnten, indem sie die gestörten Hirnregionen unterstützen, gehört das Hormon IGF-1 (Abkürzung für insulin like growth factor 1, ein Wachstumsfaktor). Eine von IGF-1 abgeleitete Substanz verbesserte den Zustand von speziell gezüchteten Mäusen mit ähnlichen Symptomen wie beim Rett-Syndrom. Auch den ersten Sicherheitstest an 50 autistischen Kindern hat das Präparat bereits bestanden. Nun gilt es herauszufinden, ob es beim Menschen tatsächlich hilft.

Weitere Studien werden jedoch auch nicht genetische Faktoren berücksichtigen müssen. So könnte ein hormonelles Ungleichgewicht im Mutterleib oder der Kontakt zu bestimmten Chemikalien in der Umwelt ebenfalls eine Rolle spielen. Insgesamt ist ein mehrgleisiger Ansatz nötig, um einerseits erste Symptome schon bei rund 18 Monate alten Kindern zuverlässig zu entdecken und andererseits Therapien zu entwickeln, die letztlich Fehlfunktionen von Gehirnzellen ausgleichen.

Bei der Suche nach besseren diagnostischen Instrumenten greifen Forscher nun auch auf bildgebende Verfahren zurück. Die ersten Studien konzentrieren sich dabei auf Vertreter jener etwa 40 Prozent aller Autisten, die nur minimale oder gar keine sprachlichen Fähigkeiten besitzen.

Manche Wissenschaftler setzen ihre Hoffnung auf Stammzellen. Diese haben die besondere Fähigkeit, sich zu verschiedenen Zelltypen entwickeln zu können. Zunächst werden an leicht zugänglichen Stellen wie der Haut Zellen entnommen und in »induzierte pluripotente Stammzellen« umgewandelt (siehe SdW 6/2011, S. 22). Eine spezifische Behandlung macht aus ihnen Gehirnzellen.

Alternativ lassen sich auch Stammzellen aus dem eingefrorenen Blut der Nabelschnur eines autistischen Kindes verwenden. Auf beiden Wegen erhalten die Forscher Neurone oder Gliazellen, die denen autistischer Menschen entsprechen, mit all ihren genetischen Auffälligkeiten. In ihnen können sie nicht nur ungewöhnliche Erbanlagen bestimmen,

sondern auch, welche Gene aktiv sind. Damit ließe sich schon bei Kleinkindern herausfinden, ob sie unter das Autismuspektrum fallen und – wenn ja – wie schwer die Störung ausgeprägt ist. Falls die Zellen zudem gut auf ein bestimmtes Medikament ansprechen, indem sie etwa bessere Verknüpfungen mit anderen Neuronen ausbilden, könnte man hoffen, dass auch der ganze Patient vorteilhaft darauf reagiert. Solche Techniken erlauben Ärzten vielleicht eines Tages zu erkennen, welches Arzneimittel bei einzelnen Symptomen jeweils am besten wirkt.

Langfristig werden Forscher vermutlich noch weitreichendere Möglichkeiten entdecken, die heutzutage eher nach Sciencefiction klingen. So könnte man bei im Labor gezüchteten Nerven- oder Gliazellen mit dem Erbgut des Patienten jene molekularen Defekte in der DNA korrigieren, die an der Entstehung von Autismus beteiligt sind. Solche Zellen würde man dann beispielsweise autistischen Kindern einpflanzen und daraufhin therapeutische Lernverfahren wie ESDM anwenden. Eine derartige Kombination von genetischen und verhaltensorientierten Therapien könnte das Nervensystem auf molekularer und zellulärer Ebene umgestalten und so die kommunikativen Schwierigkeiten und repetitiven Verhaltensweisen massiv verbessern. Mit futuristischen Szenarien wie diesem wäre dann wohl auch die Heilung von Kindern wie Jayden endlich in Reichweite. ~

DIE AUTOREN



Nicholas Lange (links) ist außerordentlicher Professor für Psychiatrie und Biostatistik sowie Leiter des Neurostatistiklabors an der Harvard Medical School und dem dazugehörigen McLean Hospital.

Christopher J. McDougle leitet das Lurie Center for Autism am Massachusetts General Hospital for Children, einer multidisziplinären Behandlungseinrichtung.

QUELLEN

Dawson, G. et al: Early Behavioral Intervention Is Associated with Normalized Brain Activity in Young Children with Autism. In: Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry 51, S. 1150–1159, 2012.

Matsunami, N. et al.: Identification of Rare Recurrent Copy Number Variants in High-Risk Autism Families and Their Prevalence in a Large ASD Population. In: PLoS ONE 8(1) e52239. doi: 10.1371/journal.pone.0052239, 2013.

LITERATURTIPPS

Rogers, S. J., Dawson, G.: Early Start Denver Model for Young Children with Autism. Guilford Press, New York 2010. *Englischsprachige ESDM-»Bibel« für Therapeuten.*

Snippe, K.: **Autismus:** Wege in die Sprache. Schulz-Kirchner, Idstein 2013.

Gelungene, kompakte Übersicht verschiedener Therapieansätze, darunter auch ESDM; viele Beispiele für die Umsetzung in der Praxis.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286307

Weißt Du, wieviel Sternlein stehen?
Alles über die Milchstraße.



Jetzt
im Handel.

Auch mit
DVD erhältlich

Was ist real?

Die Welt der klassischen Physik besteht aus Teilchen, die unter dem Einfluss von Kraftfeldern bestimmte Bahnen ziehen. Doch in der Quantenfeldtheorie ist nicht mehr klar, was Teilchen und Felder überhaupt sind. Die fundamentalsten Objekte lassen sich nicht wie Alltagsdinge beschreiben, sondern als Bündel von Eigenschaften wie Form und Farbe, Masse und Ladung.

Von Meinard Kuhlmann

Physiker beschreiben das Universum für gewöhnlich als eine Menge von subatomaren Teilchen, die einander mittels Kraftfeldern anziehen und abstoßen. Sie arbeiten mit einer Art Lego-Modell der Natur. Doch dieses Weltbild kehrt eine wenig bekannte Tatsache unter den Teppich: Sowohl in der Teilchen- wie in der Feldinterpretation der Quantenphysik werden die vertrauten Begriffe »Teilchen« und »Feld« derart weit gefasst, dass sich allmählich die Meinung durchsetzt, die Welt könnte aus etwas ganz anderem bestehen.

Das Problem ist nicht etwa, dass die Physiker keine gültige Theorie über die Mikrowelt besäßen. Die gibt es durchaus. Sie heißt Quantenfeldtheorie und entstand ab dem Ende der 1920er Jahre durch Vereinigung der frühen Quantenmechanik mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie. Die Quantenfeldtheorie liefert die begriffliche Grundlage für das Standardmodell der Teilchenphysik, das die fundamentalen Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkungen in einen gemeinsamen Rahmen stellt. Hinsichtlich der empirischen Genauigkeit ist dies die erfolgreichste Theorie in der Geschichte der Wissenschaft. Physiker verwenden das Standardmodell tagtäglich, um die Folgeprodukte von Teilchenkollisionen zu berechnen, die Materiesynthese beim Urknall, die extremen Bedingungen in Atomkernen und vieles andere.

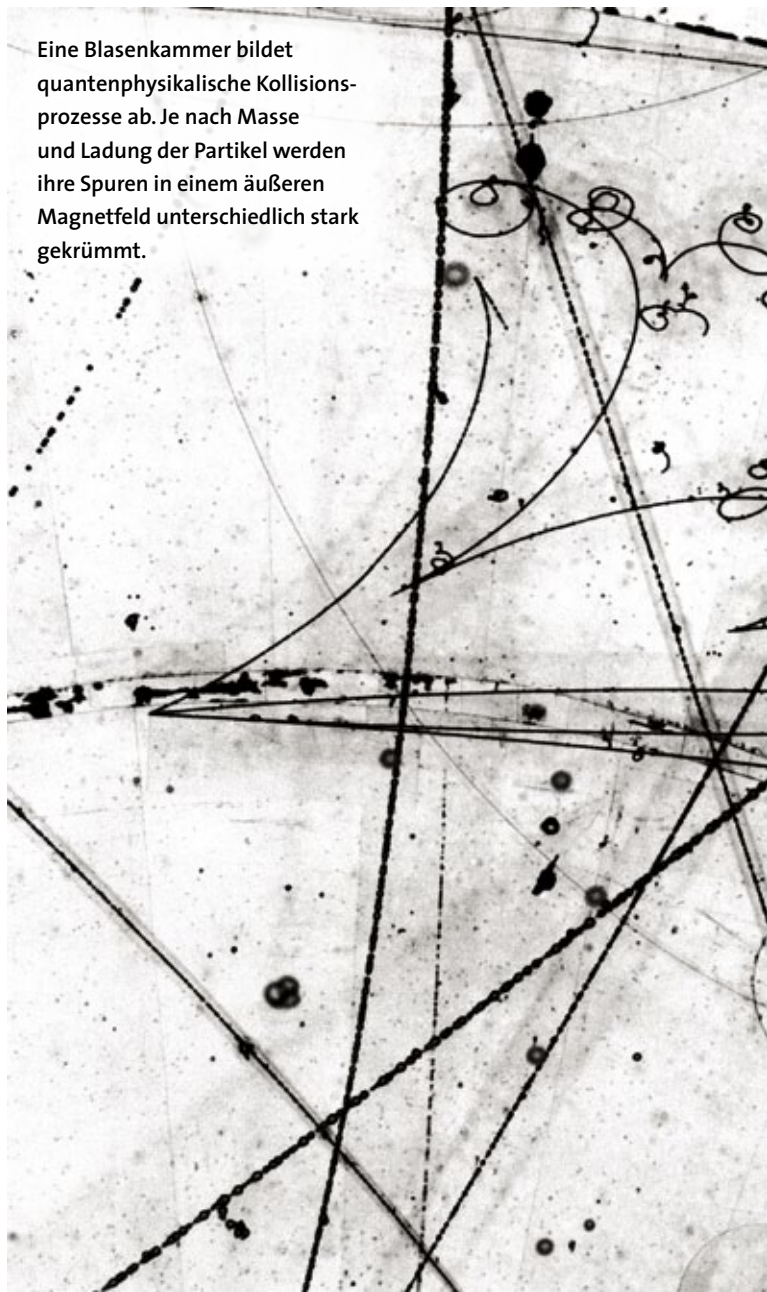
AUF EINEN BLICK

WEDER TEILCHEN NOCH FELDER

1 Die Teilchenphysik handelt von Teilchen – sollte man meinen. Üblicherweise stellt man sich dabei kleine Kugeln vor, die im Raum umherschwirren. Doch bei genauer Betrachtung erweist sich der **Teilchenbegriff** als nicht sinnvoll anwendbar.

2 Für viele Physiker sind Teilchen keine Dinge, sondern **Anregungen eines Quantenfelds** – des modernen Gegenstücks zu klassischen Feldern wie dem Magnetfeld. Doch auch Felder haben **paradoxe Eigenschaften**.

3 Manche Forscher meinen daher, die Grundbestandteile der Welt seien weder Teilchen noch Felder, sondern **bestimmte Strukturen oder Bündel von Eigenschaften**.



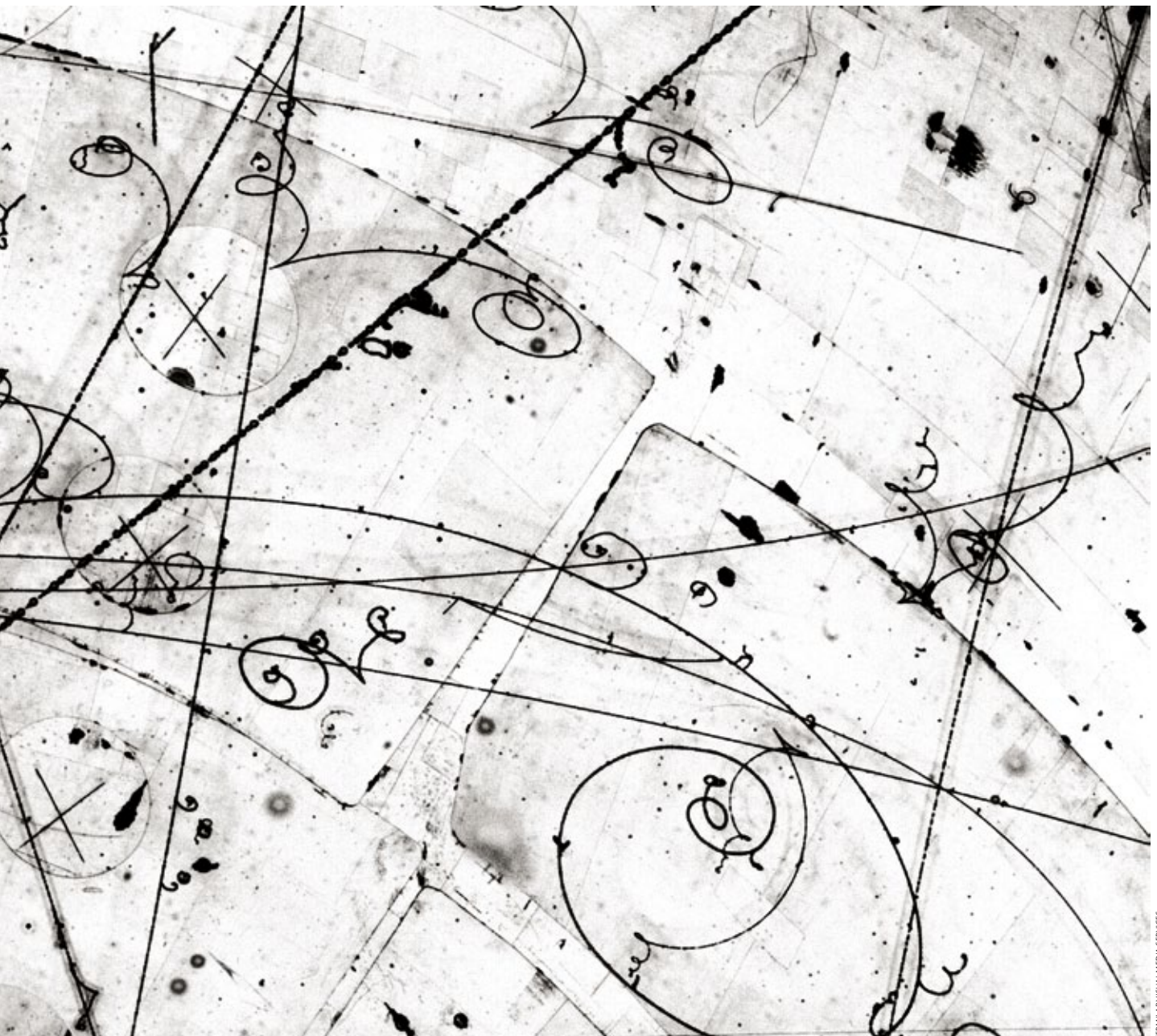
Eine Blasenkammer bildet quantenphysikalische Kollisionsprozesse ab. Je nach Masse und Ladung der Partikel werden ihre Spuren in einem äußeren Magnetfeld unterschiedlich stark gekrümmt.

Darum mag es überraschen, dass die Physiker nicht einmal sicher sind, was die Theorie besagt beziehungsweise worin ihre »Ontologie« besteht – das ihr zu Grunde liegende Bild von der physikalischen Realität. Diese Verwirrung unterscheidet sich von den viel diskutierten Paradoxien der Quantenmechanik, etwa von der berühmten Frage, ob eine in eine Kiste gesperrte Katze zugleich lebendig und tot sein kann. Die ungeklärte Deutung der Quantenfeldtheorie behindert den Fortschritt zu jeder Art von »neuer Physik« jenseits des Standardmodells, beispielsweise der Stringtheorie. Es ist heikel, eine neue Theorie zu formulieren, wenn wir die bereits vorhandene nicht verstehen.

Auf den ersten Blick erscheint der Inhalt des Standardmodells offensichtlich. Es besteht zum einen aus Gruppen

von Elementarteilchen wie Quarks und Elektronen und zum anderen aus vier Arten von Kraftfeldern, welche die Wechselwirkung zwischen den Teilchen vermitteln. Dieses Schema wurde auch schon öfter in »Spektrum der Wissenschaft« präsentiert. Es mutet zwar überzeugend an, kann aber gar nicht zufrieden stellen.

Zunächst einmal gehen die beiden Kategorien unscharf ineinander über. Die Quantenfeldtheorie weist jeder Elementarteilchensorte ein Feld zu: Wenn es Elektronen gibt, existiert unweigerlich auch ein Elektronenfeld. Umgekehrt sind die Kraftfelder nicht kontinuierlich, sondern quantisiert; darum gibt es Teilchen wie das Photon, das Quant des elektromagnetischen Felds. Somit scheint die Unterscheidung zwischen Teilchen und Feldern künstlich zu sein, und





die Physiker behandeln oft das eine oder das andere als fundamentaler. Die Debatte über die Frage, ob die Quantenfeldtheorie letztlich von Teilchen oder Feldern handelt, hat sich ergebnislos im Kreis gedreht. Sie begann als Kampf der Titanen, mit bedeutenden Physikern und Philosophen auf beiden Seiten. Bis heute sind beide Begriffe wegen ihrer Anschaulichkeit in Gebrauch, obwohl die meisten Physiker einräumen würden, dass ihre klassische Bedeutung nicht zu den Aussagen der Theorie passt. Doch wenn die von den Wörtern »Teilchen« und »Feld« wachgerufenen Vorstellungen nicht zutreffen, müssen Physiker und Philosophen sich darüber klar werden, was an ihre Stelle treten soll.

Angeichts der festgefahrenen Lage haben einige Philosophen der Physik grundsätzlich andere Lösungen vorgeschlagen. Demnach besteht die materielle Welt letztendlich aus weniger fassbaren »Gegenständen« wie Relationen oder Eigenschaften. Eine besonders radikale Idee besagt, dass sich alles vollständig auf Strukturen reduzieren lässt – ohne irgendeinen Bezug auf Einzeldinge. Das ist eine kontraintuitive und revolutionäre Idee, aber manche meinen, die Physik zwingt uns, sie anzunehmen.

Probleme der Teilcheninterpretation

Wenn Laien, aber auch Experten über die Mikrowelt nachdenken, stellen sie sich Teilchen vor, die etwa bei einem Zusammenstoß wie kleine Billardkugeln voneinander abprallen. Dieser Teilchenbegriff ist das Relikt eines Weltbilds, das von den altgriechischen Atomisten abstammt und mit den Theorien Isaac Newtons (1643–1727) seinen Siegeszug vollendete. Aus mehreren Gründen verhalten sich die Grundelemente der Quantenfeldtheorie jedoch ganz und gar nicht wie Billardkugeln.

Erstens bezieht sich der klassische Teilchenbegriff auf etwas, was einen bestimmten Ort einnimmt; aber die »Teilchen« der Quantenfeldtheorie besitzen keine klar definierten Positionen: Ein Partikel in Ihrem Körper hält sich streng genommen nicht nur in dessen Innerem auf. Ein Beobachter, der versucht, den Ort des Teilchens zu messen, wird es mit

kleiner, aber von null verschiedener Wahrscheinlichkeit in den entlegensten Winkeln des Universums entdecken. Dieser Widerspruch offenbarte sich schon in den ersten Formulierungen der Quantentheorie, wurde aber noch eklatanter, als Theoretiker die Quantenmechanik mit der Relativitätstheorie vereinigten. Relativistische Quantenteilchen sind gleichsam aalglatt: Sie lassen sich auf keine spezielle Lokalität festnageln.

Zweitens hängt der Teilchenort vom Bewegungszustand des Beobachters ab. Ein Partikel, das Sie in Ihrem Haus beobachten, erscheint einem daran vorbeirasenden Freund über das gesamte Universum ausgebreitet. Nicht nur der Ort eines Teilchens hängt also von Ihrem Standpunkt ab, sondern sogar die Frage, ob es überhaupt einen Ort einnimmt. Darum hat es wenig Sinn, lokalisierte Teilchen als die Grundelemente der Wirklichkeit anzunehmen.

Drittens: Selbst wenn Sie auf das Festnageln der Teilchen verzichten und sie einfach bloß zählen, kommen Sie in Schwierigkeiten. Angenommen, Sie möchten wissen, wie viele Teilchen sich in Ihrem Haus befinden. Sie gehen durch die Räume und finden drei Teilchen im Esszimmer, fünf unter dem Bett, acht in einem Küchenschrank und so weiter. Nun zählen Sie alles zusammen. Zu Ihrer Bestürzung wird die Summe nicht der Gesamtzahl der Teilchen entsprechen. In der Quantenfeldtheorie ist die Teilchenzahl eine Eigenschaft des gesamten Hauses. Um sie zu bestimmen, müssten Sie das Kunststück fertigbringen, das ganze Haus auf einmal zu vermessen, nicht Zimmer für Zimmer.

Ein extremes Beispiel für die Haltlosigkeit der Teilcheninterpretation ist das Vakuum, das in der Quantenfeldtheorie paradoxe Eigenschaften besitzt. Man kann insgesamt ein Vakuum vor sich haben – definitionsgemäß einen Zustand mit null Teilchen – und dennoch in jedem endlichen Teilgebiet etwas ganz anderes beobachten als ein Vakuum. Das Haus kann sozusagen völlig leer sein, obwohl man in den Zimmern überall Teilchen findet.

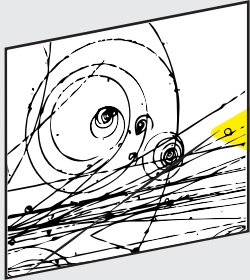
Eine verblüffende Besonderheit des Quantenvakuums ist der so genannte Unruh-Effekt, benannt nach dem kanadischen Theoretiker William Unruh von der University of British Columbia. Während ein ruhender Astronaut meint, sich in perfektem Vakuum aufzuhalten, findet sein Kollege in einem beschleunigt vorbeifliegenden Raumschiff, er sei von einem Wärmebad aus unzähligen Teilchen umgeben. Diese Diskrepanz zwischen Beobachterstandpunkten tritt auch am Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs auf und führt zu paradoxen Aussagen über das Schicksal hineinstürzender Materie (siehe »Das Informationsparadoxon bei Schwarzen Löchern« von Leonard Susskind, Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58). Ein von Partikeln erfülltes Vakuum mutet absurd an – aber nur, weil uns der klassische Teilchenbegriff in die Irre führt. Wenn die Teilchenzahl vom Bezugssystem abhängt, hat es offenbar wenig Sinn, Teilchen für grundlegend zu halten.

Außerdem folgt aus der Theorie das Phänomen der so genannten Quantenverschränkung: Teilchen büßen als Teil

Paradoxe Quantenteilchen

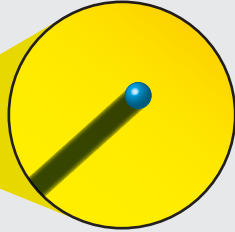
In der Quantentheorie verhalten sich Teilchen nicht wie klassische Objekte, sondern zeigen paradox anmutende Eigenschaften. Quantenteilchen sind insbesondere nicht lokalisierbar. Im Allgemeinen kann man Teilchen keine eigenständige Existenz und bestimmte Eigenschaften zuschreiben, wenn sie zu einem Gesamtsystem gehören.

Was wir feststellen



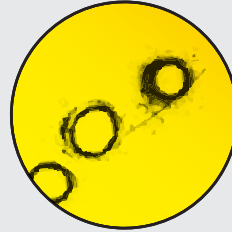
Spuren in einer Blasenkammer

Was wir daraus folgern



Teilchen durchqueren die Kammer und hinterlassen Spuren.

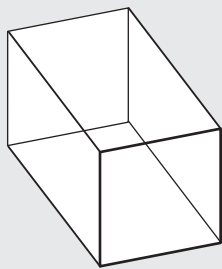
Warum das falsch ist



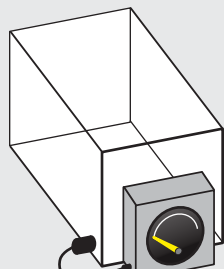
Wir sehen nur kleine Blasen, keine kontinuierliche Teilchenbahn.

TEILCHEN SIND NICHT LOKALISIERT

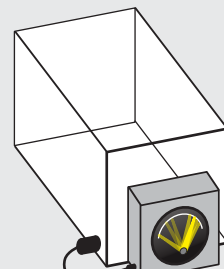
Ein Quantenteilchen beschreibt keine kontinuierliche und beliebig exakt bestimmbare Bahn. Die Spur in der Blasenkammer ist eine Folge getrennter Ereignisse.



ein Feld im Vakuumzustand



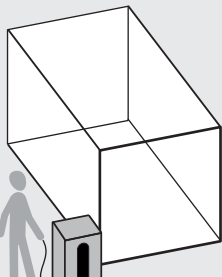
Geigerzähler wird nicht reagieren.



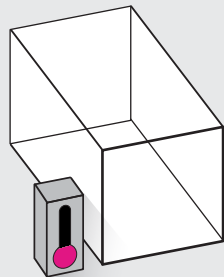
Geigerzähler klickt.

DAS VAKUUM IST NICHT LEER

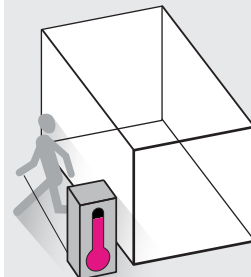
Gemäß der Quantentheorie zeigt ein Messgerät selbst im Vakuum die Anwesenheit von Teilchen an.



ein Vakuum am absoluten Nullpunkt



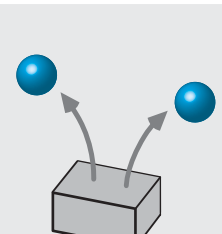
Jeder Beobachter misst ein kaltes Vakuum.



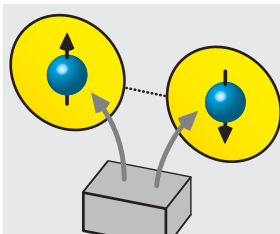
Ein beschleunigter Beobachter misst ein warmes Teilchengas.

TEILCHENEXISTENZ HÄNGT VOM BEOBACHTER AB

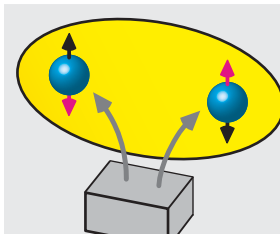
Teilchen sollten unabhängig vom Bewegungszustand des Beobachters existieren. Doch gemäß dem Unruh-Effekt nimmt ein beschleunigter Beobachter Teilchen wahr, wo sein ruhender Kollege ein Vakuum feststellt.



Ein verschränktes Teilchenpaar hat einen bestimmten Spin.



Jedes Teilchen hat einen bestimmten Spin.



Nur das Gesamtsystem hat einen definierten Spin.

TEILCHEN HABEN KEINE INDIVIDUELLEN EIGENSCHAFTEN

Quantenteilchen können verschränkt sein: Sie verhalten sich nicht als separate Partikel, sondern als ein unteilbares System.

eines Quantensystems ihre Individualität ein. Sie haben nicht nur Charakteristika wie Masse und Ladung gemeinsam, sondern auch räumliche und zeitliche Eigenschaften, beispielsweise den Bereich, in dem sie aufzufinden sind. Doch wenn zwei verschränkte Teilchen komplett ununterscheidbar sind, welchen Sinn hat es dann eigentlich, sie als separate Objekte zu betrachten? Das verschränkte System verhält sich als unteilbares Ganzes, und der Begriff eines Teils und erst recht eines Teilchens wird bedeutungslos.

Diese theoretischen Probleme mit dem Teilchenbegriff widersprechen der Anschauung. Entdeckt ein »Teilchendetektor« etwa keine Teilchen? Doch tatsächlich werden die Teilchen immer indirekt erschlossen. Ein Detektor registriert bloß zahlreiche separate Anregungen des Sensormaterials. Es ist aber nicht zulässig, diese punktuellen Ereignisse zu verbinden und zu schließen, es gäbe Teilchen auf Bahnen, die sich zeitlich verfolgen lassen.

Alle bisher dargelegten Argumente versetzen der Idee, die Natur bestünde aus einer Art kugelähnlicher Partikel, den Todesstoß. Darum ist die Bezeichnung Teilchenphysik eigentlich irreführend. Man kann zur Not von Quantenteilchen sprechen, obwohl diese praktisch nichts mit klassischen Partikeln gemein haben. Konsequenterweise sollte man den Begriff ganz fallen lassen. Manche ziehen daraus den Schluss, dass die Quantenfeldtheorie am besten als eine reine Feldtheorie zu verstehen sei. Demnach wären Teilchen nichts als Kräuselungen in einem Feld, das den Raum wie eine unsichtbare Flüssigkeit erfüllt. Doch wie sich gleich zeigt, lässt sich die Quantenfeldtheorie auch nicht allein durch Felder beschreiben.

Probleme der Feldinterpretation

Wie schon der Name nahelegt, behandelt die Quantenfeldtheorie klassische Phänomene wie elektrische und magnetische Felder mit Mitteln der Quantentheorie. Aber was heißt das? Ein Magnetfeld zwingt Eisenfeilspäne, sich um einen Stabmagneten zu ordnen, und ein elektrisches Feld lässt Haare zu Berge stehen. Ein Quantenfeld hingegen ist davon so verschieden, dass sogar ein theoretischer Physiker es sich kaum anschaulich vorzustellen vermag.

Das klassische Feld weist jedem Punkt der Raumzeit eine physikalische Größe zu, zum Beispiel Temperatur oder elektrische Feldstärke. Dagegen geht es bei einem Quantenfeld um abstrakte mathematische Ausdrücke, die nicht bestimmte Messwerte darstellen, sondern mögliche Arten von Messungen. Manche mathematischen Gebilde repräsentieren zwar physikalische Werte, doch diese lassen sich nicht bestimmten Punkten der Raumzeit zuordnen, sondern nur verschmierten Gebieten.

Historisch betrachtet entstand die Quantenfeldtheorie durch »Quantisieren« der klassischen Feldtheorie. Dabei nehmen die Theoretiker eine Gleichung und ersetzen physikalische Größen durch so genannte Operatoren, die für mathematische Vorgänge wie Differenzieren oder Wurzelziehen stehen. Manche Operatoren können auch bestimmte physi-

kalische Prozesse wie das Aussenden oder Absorbieren von Licht beschreiben. Operatoren sind abstrakte Gebilde und erhöhen gewissermaßen den Abstand zwischen Theorie und Realität. Ein klassisches Feld entspricht einer Wetterkarte, welche die Temperatur in verschiedenen Städten anzeigt. Die Quantenversion ähnelt einer Karte, die nicht »40 Grad« anzeigt, sondern » $\sqrt{\quad}$ «. Um einen Temperaturwert zu erhalten, müsste man den Operator erst auf eine weitere mathematische Größe anwenden, den so genannten Zustandsvektor; er beschreibt die Beschaffenheit des betreffenden Systems.

Auf den ersten Blick ist diese Eigenart der Quantenfelder nicht überraschend. Schon die Quantenmechanik, auf der die Quantenfeldtheorie aufbaut, liefert nicht eindeutige Werte, sondern nur Wahrscheinlichkeiten. Doch in Letzterer geht es noch seltsamer zu: Die vermeintlich fundamentalen Quantenfelder legen nicht einmal Wahrscheinlichkeiten fest; das tun sie erst, wenn sie mit dem Zustandsvektor kombiniert werden.

Durch die Notwendigkeit, das Quantenfeld auf den Zustandsvektor anzuwenden, wird es sehr schwierig, sich unter dem Gegenstand der Theorie etwas Anschauliches vorzustellen. Der Zustandsvektor ist »holistisch« oder ganzheitlich; er beschreibt das gesamte System und bezieht sich nicht auf einen bestimmten Ort. Damit untergräbt er das, was Felder eigentlich ausmacht: dass und wie sie sich über die Raumzeit verteilen. Ein klassisches Feld veranschaulicht beispielsweise, wie sich Lichtwellen durch den Raum ausbreiten; das Quantenfeld beraubt uns dieses Bilds und sagt nichts darüber aus, wie die Welt funktioniert.

Offensichtlich ist das Standardbild von Elementarteilchen, zwischen denen Kraftfelder wirken, keine brauchbare Ontologie – es drückt nicht aus, was in der physikalischen Welt wirklich vorgeht. Auch wird nicht klar, was ein Teilchen oder ein Feld eigentlich ist. Häufig wird erwidert, Teilchen und Felder sollten als komplementäre Aspekte der Realität betrachtet werden. Doch das hilft nicht weiter, denn die beiden Begriffe funktionieren selbst in den Fällen nicht, wo wir angeblich nur den einen oder den anderen Aspekt vor uns haben. Glücklicherweise gibt es für die Quantenfeldtheorie außer Teilchen und Feldern weitere ontologische Möglichkeiten.

Strukturen als Basis der Realität

Immer mehr Leute glauben heute, dass es in Wirklichkeit nicht auf Dinge ankommt, sondern auf die Beziehungen zwischen ihnen. Dieser Standpunkt, der so genannte Strukturrealismus, bricht mit herkömmlichen atomistischen Konzepten der materiellen Welt noch radikaler als alle ontologischen Varianten von Teilchen und Feldern.

Anfangs etablierte sich eine gemäßigte Version unter dem Namen epistemischer Strukturrealismus (von griechisch episteme = Wissen). Ihm zufolge werden wir zwar niemals das wirkliche Wesen der Dinge erkennen, können aber wissen, wie sie miteinander in Beziehung stehen. Beim Phänomen Masse beispielsweise sieht man niemals die Masse selbst, sondern nur, wie ein massetragender Körper mit ei-

nem anderen durch das örtliche Schwerfeld wechselwirkt. Die Struktur der Welt, die ausdrückt, wie Dinge wechselwirken, ist der dauerhafteste Teil physikalischer Theorien. Neue Theorien können unsere Vorstellung von den Grundbausteinen der Welt umstürzen, aber oft bewahren sie die Strukturen. Nur so können Forscher Fortschritte machen.

Das wirft die Frage auf: Warum kennen wir nur die Relationen zwischen Dingen und nicht die Dinge selbst? Die einfachste Antwort lautet: Es gibt nur Relationen. Dieser Sprung führt zu einem radikaleren Standpunkt, dem ontischen Strukturenrealismus (von griechisch *to on* = das Seiende).

Die vielfältigen Symmetrien der modernen Physik unterstützen den ontischen Strukturenrealismus. Sowohl in der Quantenmechanik als auch in der einsteinschen Gravitationstheorie haben bestimmte Veränderungen – so genannte Symmetrietransformationen – keine empirischen Konse-

quenzen. Diese Transformationen vertauschen die einzelnen Dinge, aus denen die Welt besteht, ohne deren Beziehungen zu verändern. Ein einfaches Beispiel: Bei einem spiegelsymmetrischen Gesicht vertauscht der Spiegel das linke Auge mit dem rechten, das linke Nasenloch mit dem rechten und so fort. Dennoch bleiben die relativen Positionen der Gesichtszüge samt und sonders erhalten. Diese Relationen definieren geradezu das Gesicht, während Zuschreibungen wie »links« und »rechts« vom Betrachter abhängen. Die Gegenstände, die wir »Teilchen« und »Felder« nennen, gehorchen abstrakteren Symmetrien, aber das Prinzip ist das gleiche.

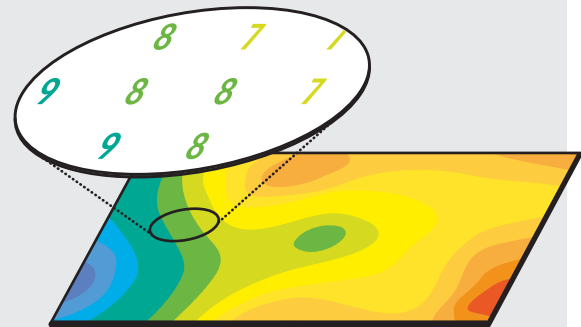
Gemäß Ockhams Rasiermesser, benannt nach dem Philosophen Wilhelm von Ockham (1288–1347), ziehen Physiker und Philosophen Ideen vor, die ein Phänomen mit möglichst wenigen Zusatzannahmen erklären. In unserem Fall kann man eine völlig ausreichende Theorie konstruieren, indem

Vieldeutige Quantenfelder

Physiker nennen die führende Theorie des Mikrokosmos **Quantenfeldtheorie**, aber die von dieser Theorie beschriebenen Felder haben kaum etwas mit den Feldern der klassischen Physik gemeinsam.

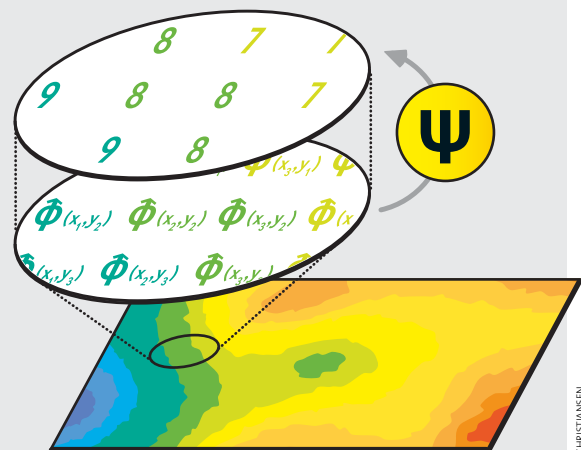
Klassisches Feld

Definitionsgemäß ist ein Feld eine physikalische Größe, bei der jedem Raumpunkt ein messbarer Wert zugewiesen wird. Ein Beispiel ist das elektrische Feld: Die Feldstärke ist größer in der Nähe elektrischer Ladungen oder Strom führender Drähte. Wenn man ein geladenes Testteilchen irgendwo im Raum platziert, bestimmt die Feldstärke, welche Kraft das Teilchen erfährt und wie stark es beschleunigt wird.

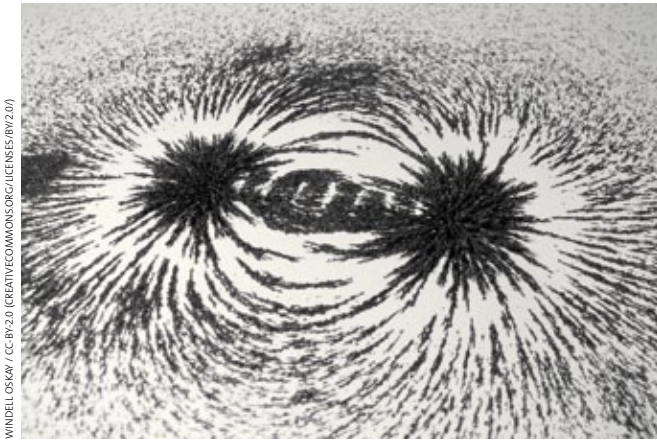


Quantenfeld

In der Quantenfeldtheorie ist jedem Raumpunkt kein eindeutig bestimmter Wert des Felds zugeordnet, sondern eine Menge möglicher Werte. Der tatsächlich beobachtete Wert hängt von einem eigenen mathematischen Gebilde ab, dem Zustandsvektor Ψ . Dieser ist nicht für einen bestimmten Ort definiert, sondern erstreckt sich über den gesamten Raum.



JEN CHRISTIANSEN



Ein klassisches Feld ordnet jedem Punkt des Raums eine eindeutig definierte Größe und Richtung der Feldstärke zu. Beispielsweise übt ein Magnetfeld auf Eisenfeilspäne eine bestimmte Kraft aus, die sich durch Feldlinien veranschaulichen lässt.

man die Existenz bestimmter Relationen postuliert, ohne zusätzlich einzelne Dinge anzunehmen. Darum sagen die Anhänger des ontischen Strukturrealismus: Verzichten wir auf Dinge als etwas Fundamentales; betrachten wir die Welt als eine Gesamtheit von Strukturen oder Netzwerken von Beziehungen.

Im Alltag erleben wir viele Situationen, in denen nur Relationen zählen und die Beschreibung der vernetzten Dinge bloß Verwirrung stiftet. Zum Beispiel muss man bei einer U-Bahnfahrt wissen, wie die Stationen zusammenhängen. In London ist die Station St. Paul's direkt mit Holborn verbunden, während man von Blackfriars kommend mindestens einmal umsteigen muss, obwohl Blackfriars näher bei Holborn liegt als St. Paul's. Es kommt vor allem auf die Struktur der Verbindungen an. Wer eine Fahrt plant, braucht auch nicht zu wissen, dass die U-Bahnstation Blackfriars kürzlich sehr hübsch renoviert wurde. Andere Beispiele sind das World Wide Web, das neuronale Netzwerk des Gehirns und das Genom. Sie alle funktionieren selbst dann weiter, wenn einzelne Computer, Zellen, Atome ausfallen.

Ein weiteres Argument für den Strukturrealismus liefert die Quantenverschränkung. Sie ist ein holistischer Effekt. Alle Wesenseigenschaften von zwei verschränkten Teilchen wie ihre elektrische Ladung und all ihre äußeren Eigenschaften wie ihr Ort reichen nicht aus, um den Zustand des Zweiteilchensystems zu bestimmen. Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Das atomistische Weltbild – alles wird durch die Eigenschaften der elementarsten Bausteine und ihre raumzeitlichen Relationen bestimmt – bricht zusammen. Statt Teilchen für primär und Verschränkung für sekundär zu halten, sollten wir die Sache vielleicht umgekehrt betrachten.

Man mag es seltsam finden, dass es Zusammenhänge ohne zusammenhängende Objekte geben soll. Das klingt wie eine Heirat ohne Brautleute. Viele Physiker und Philosophen

halten es tatsächlich für unmöglich, dass feste Objekte nur auf der Basis von Relationen entstehen. Darum versuchen einige Verfechter des ontischen Strukturrealismus einen Kompromiss zu finden. Sie verneinen nicht, dass es Objekte gibt, sondern behaupten nur, Relationen oder Strukturen seien ontologisch primär. Mit anderen Worten: Objekte besitzen keine Wesenseigenschaften, sondern gewinnen ihre Eigenart erst durch ihr Verhältnis zu anderen Objekten. Doch das ist ein fauler Kompromiss. Niemand bestreitet, dass Objekte Beziehungen haben. Interessant und neuartig ist erst der Standpunkt, dass alles nur aus Relationen hervorgeht. Vorläufig ist der Strukturrealismus eine provokante Idee, die noch weiterentwickelt werden muss, bevor wir wissen, ob damit unser Interpretationsproblem gelöst wird.

Bündel von Eigenschaften

Eine zweite Alternative zur Deutung der Quantenfeldtheorie geht von einer simplen Erkenntnis aus. Obgleich Teilchen- und Feldinterpretationen traditionell als radikal verschieden gelten, haben sie etwas Entscheidendes gemeinsam. Beide unterstellen, dass die Grundelemente der materiellen Welt dauerhafte Einzelgebilde sind, denen Eigenschaften zugeschrieben werden können. Diese Grundeinheiten sind entweder Teilchen oder – im Fall der Feldtheorien – Raumzeitpunkte. Viele Philosophen denken wie ich, dass die Aufteilung in Objekte und Eigenschaften der tiefere Grund ist, warum sowohl Teilchen- wie Feldansätze letztlich scheitern. Stattdessen sollte man Eigenschaften als die einzige Grundkategorie ansehen.

In der Regel gelten Eigenschaften als »Universalien«, als abstrakte Allgemeinbegriffe. Sie können nicht separat von den konkreten Dingen existieren, die ebendiese Eigenschaften haben. Zwar hielt der antike Philosoph Platon (428–348 v. Chr.) Allgemeinbegriffe für eigenständige Ideen, die nicht in Raum und Zeit existieren, sondern in einem eigenen Ideenhimmel. Doch wenn man beispielsweise an Rot denkt, stellt man sich normalerweise spezielle rote Gegenstände vor und nicht einen separaten Gegenstand namens »Röte«. Nun ließe sich diese Denkweise auch umkehren und den jeweiligen Eigenschaften eine von Objekten unabhängige Existenz zubilligen. Eigenschaften sind demnach konkrete Einzelheiten oder »Partikularien«, und was wir gewöhnlich ein Ding nennen, ist ein Bündel von Eigenschaften wie Farbe, Form, Festigkeit und so weiter.

Die Vorstellung, Eigenschaften seien nicht Universalien, sondern Einzelheiten, unterscheidet sich von der traditionellen Auffassung; darum haben Philosophen für eine partikularisierte Eigenschaft den neuen Ausdruck »Tropé« eingeführt. Er klingt zwar etwas komisch und weckt unzutreffende Assoziationen, hat sich aber inzwischen eingebürgert.

Normalerweise begreifen wir Dinge nicht als Bündel von Eigenschaften, doch die Idee wird weniger ungewohnt, wenn wir versuchen, uns in die allerersten Lebensjahre zurückzusetzen. Wenn wir zum ersten Mal einen Ball sehen und erleben, nehmen wir streng genommen keinen Ball wahr,

sondern eine runde Form, eine Farbe, ein elastisches Tastgefühl. Erst später assoziieren wir dieses Bündel von Wahrnehmungen mit einem bestimmten Objekt namens Ball. Wenn wir das nächste Mal so etwas sehen, denken wir nur noch »Schau, ein Ball« und vergessen, wie viel begriffliche Arbeit in dieser scheinbar unmittelbaren Wahrnehmung steckt.

In der Tropenontologie kehren wir zu den direkten Wahrnehmungen der frühen Kindheit zurück. Wir erleben nicht zuerst einen Ball und heften ihm nachträglich Eigenschaften an, sondern wir erleben Eigenschaften und nennen sie Ball. Ein Ball ist nichts als seine Eigenschaften.

Auf die Quantenfeldtheorie angewandt heißt das: Was wir ein Elektron nennen, ist eigentlich ein Bündel aus verschiedenen Tropen: drei feste Wesenseigenschaften (Masse, Ladung und Spin) sowie zahlreiche wandelbare nichtwesentliche Eigenschaften, die sich auf Wahrscheinlichkeiten für Ort und Geschwindigkeit beziehen. Zum Beispiel sagt die Theorie voraus, dass Elementarteilchen spontan entstehen und vergehen können. Obwohl im Vakuum die mittlere Anzahl der Teilchen null ist, wimmelt es von Aktivität. Unentwegt finden unzählige Prozesse statt, bei denen alle möglichen Teilchen erzeugt und sofort wieder vernichtet werden.

In einer Teilchenontologie ist diese Aktivität paradox. Wenn Partikel fundamental sind, wie können sie dann aus dem Nichts entstehen? Woraus gehen sie hervor? In der Tropenontologie ist die Situation hingegen unproblematisch. Das Vakuum enthält, wie es sich gehört, keine Teilchen – wohl aber Eigenschaften. Ein Teilchen ist das, was man bekommt, wenn diese Eigenschaften sich auf eine bestimmte Weise bündeln.

Physik und Metaphysik

Wie kann eine so erfolgreiche Theorie wie die Quantenfeldtheorie derart grundlegende Kontroversen auslösen? Die Antwort liegt auf der Hand. Die Theorie sagt uns zwar, was wir messen können, aber sie spricht in Rätseln, wenn es um die Frage geht, was eigentlich hinter unseren Beobachtungen steckt. Die Theorie beschreibt das Verhalten von Quarks, Myonen, Photonen und diversen Quantenfeldern, aber sie sagt nichts darüber aus, was ein Photon oder ein Quantenfeld wirklich ist. Das muss sie auch gar nicht, denn physikalische Theorien können empirisch gültig sein, ohne metaphysische – jenseits der Physik liegende – Fragen zu klären.

Vielen Physikern genügt das. Sie nehmen eine so genannte instrumentelle Haltung ein und verneinen, dass wissenschaftliche Theorien die Welt widerspiegeln sollen. Für sie stellen Theorien bloß Instrumente dar, mit denen sich experimentelle Vorhersagen machen lassen. Dennoch sind die meisten Wissenschaftler überzeugt, dass ihre Theorien zumindest einige Aspekte der Natur abbilden, bevor Experimentatoren eine Messung durchführen. Wollen wir nicht die Welt verstehen, wenn wir Wissenschaft treiben?

Um ein umfassendes Bild der physikalischen Welt zu gewinnen, muss man Physik mit Philosophie kombinieren. Beide Disziplinen ergänzen einander. Die Metaphysik liefert

verschiedene konkurrierende Rahmen für die Ontologie der materiellen Welt, kann aber über Fragen der inneren Widerspruchsfreiheit hinaus keine Auswahl unter ihnen treffen. Die Physik wiederum gelangt allein nicht zu schlüssigen Aussagen über fundamentale Fragen wie die Definition von Objekten, die Rolle der Individualität, den Status von Eigenschaften, das Verhältnis von Dingen und Eigenschaften sowie die Bedeutung von Raum und Zeit.

Das Zusammenwirken der beiden Disziplinen ist besonders wichtig in Zeiten, in denen Physiker gezwungen sind, Grundlagen ihres Forschungsgegenstands zu revidieren. Metaphysisches Denken leitete schon Isaac Newton und Albert Einstein, und auch heute beeinflusst es viele Theoretiker, welche die Quantenfeldtheorie mit Einsteins Gravitationstheorie vereinigen möchten. Philosophen haben ganze Bibliotheken von Büchern und Artikeln über Quantenmechanik und Gravitationstheorie geschrieben, während wir gerade erst beginnen, die Realität der Quantenfeldtheorie zu erforschen. Die hier skizzierten Alternativen zu den Standardansichten über Teilchen und Felder könnten Physikern bei ihrem Streben nach der großen Vereinigung wichtige Impulse geben. ~

DER AUTOR



Meinard Kuhlmann vertritt eine Professur für Philosophie an der Universität Bielefeld. Nach dem Studium der Physik und der Philosophie forschte er unter anderem an den Universitäten Bremen, Oxford, Chicago und Pittsburgh. Seit 2012 ist er Sprecher der Arbeitsgemeinschaft »Philosophie der Physik« der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

- Kuhlmann, M. et al. (Hg.):** Ontological Aspects of Quantum Field Theory. World Scientific, Singapur 2002
- Kuhlmann, M.:** The Ultimate Constituents of the Material World: In Search of an Ontology for Fundamental Physics. Ontos/De Gruyter, Berlin 2010
- Kuhlmann, M.:** Quantum Field Theory. In: Stanford Encyclopedia of Philosophy, 2012 (nur online)
<http://plato.stanford.edu/archives/win2012/entries/quantum-field-theory>

WEBLINKS

- www.scientificamerican.com/aug2013/field
Ein Video zur Erklärung des Feldbegriffs
- Baker, D.J.:** Against Field Interpretation of Quantum Field Theory. In: British Journal for the Philosophy of Science 60, S. 585–609, 2009
<http://philsci-archiv.pitt.edu/4132/1/AgainstFields.pdf>
- Halvorson, H., Clifton, R.:** No Place for Particles in Relativistic Quantum Theories? In: Philosophy of Science 69, S. 1–28, 2002
<http://arxiv.org/abs/quantph/0103041>
- Diesen Artikel, weitere Literatur und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286309



EXOMONDE

Leben auf fernen Monden

Die Trabanten von Exoplaneten eignen sich vermutlich besser für die Entstehung von Leben als die Gasriesen, um die viele von ihnen kreisen. Allerdings ist die Suche nach solchen Exomonden noch viel schwieriger als das Aufspüren ferner Planeten.

Von Lee Billings

Astronomen haben bisher mehr als 1000 Planeten um andere Sterne entdeckt, und wahrscheinlich beherbergt die Galaxis insgesamt hunderte Milliarden solcher Exoplaneten. Viele sind große, gasförmige Gebilde wie Jupiter oder Neptun, auf denen Leben wohl nur schwerlich gedeihen kann. Doch wie die Gasriesen unseres Sonnensystems dürften auch ferne Exoplaneten oft große Monde besitzen – und vielleicht sind ja gar nicht Planeten, sondern ihre Monde die häufigste Heimat von Leben im Universum.

Nach solchen Exomonden sucht der britische Astronom David Kipping. Er arbeitet tief im Keller des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts), in einem düsteren Raum, der mit großen Computern in Drahtkäfigen vollgepackt ist. Kipping hat Mühe, sich gegen den Lärm der Kühlventilatoren durchzusetzen, als er erklärt, dass die geballte Rechenkapazität fast ausschließlich der Analyse eines einzigen Planeten namens Kepler-22b dient, der um einen 600 Lichtjahre von der Erde entfernten sonnenähnlichen Stern kreist. Der Planet ist nach dem Kepler-Teleskop der amerikanischen Weltraumbehörde NASA benannt, mit dem er entdeckt wurde. Wie Kipping hofft, verbirgt sich in den Daten, aus denen zunächst die Existenz von Kepler-22b hervorging, auch das subtilere Signal eines Trabanten.

Kipping nennt sein Projekt »Hunt for Exomoons with Kepler« oder kurz HEK. Die Jagd nach Exomonden erfordert konzentrierten Computereinsatz, weil selbst ein noch so großer Mond nur eine kaum merkliche Spur in den Daten hinterlässt. Darum beschränkt Kipping die Suche auf wenige, sorgsam ausgewählte Ziele.

Wie sich Monde bilden

Er hat guten Grund zur Vorsicht. Jede vermeintliche Entdeckung wäre umstritten – nicht nur wegen des methodischen Aufwands, sondern auch wegen ihrer grundlegenden Konsequenzen. Beispielsweise liegt Kepler-22b in der »habitablen« (bewohnbaren) Zone, das heißt in einem Abstand vom Zentralgestirn, der flüssiges Wasser zulässt. Der Planet ist allerdings so groß, dass es sich wahrscheinlich nicht um einen erdähnlichen Gesteinsplaneten handelt, sondern um eine unwirtliche Gaskugel. Doch falls Kepler-22b einen massereichen Begleiter hat, könnte dieser Mond ein lebensfreundlicher Ort sein – und die Jagd nach Indizien für außerirdisches, gar intelligentes Leben wäre eröffnet. »Monde könnten bewohnbar sein«, meint auch Kipping, »und wenn das stimmt, gibt es unfassbar viele Möglichkeiten für Leben im All.«

Viele Astronomen – und Sciencefiction-Autoren – nahmen lange an, andere Planetensysteme müssten unserem Sonnensystem gleichen, in dem Monde vorwiegend in eisigen Regionen um Riesenwelten wie Jupiter und Saturn kreisen. Doch schon die ersten in den 1990er Jahren entdeckten Exoplaneten eröffneten neue Perspektiven. Die Planetenjäger fanden Gasriesen, die sich zunächst weit vom Zentralgestirn entfernt gebildet hatten und später irgendwie zu engeren, wärmeren Bahnen gewandert waren. Einige liegen sogar

Ein riesiger Gasplanet bedeckt einen Teil des Himmels über einem seiner Monde, dessen Oberfläche in dieser künstlerischen Darstellung aus Meeren und Kontinenten besteht.

RON MILLER

in der habitablen Zone. Das wirft die Frage auf: Könnten Trabanten dieser warmen Riesenplaneten aus festem Gestein bestehen, eine schützende Atmosphäre besitzen und wie die Erde von Meeren bedeckt sein?

Drei Forscher an der Pennsylvania State University – Darren Williams, Jim Kasting und Richard Wade – untersuchten erstmals die Möglichkeit eines Exomonds mit erdähnlicher Umwelt. In ihrer 1997 im Fachmagazin »Nature« publizierten Arbeit behandelten sie die Frage, wie groß ein Mond in der habitablen Zone sein muss, damit er eine nennenswerte Atmosphäre und flüssiges Wasser auf seiner Oberfläche aufrechterhalten kann. »Wie wir fanden, können Monde mit einem Zehntel der Erdmasse, also kleiner als Mars, nur ein paar Millionen Jahre lang eine Atmosphäre festhalten«, sagt Williams. Unterhalb dieser Schwelle erzeugt ein Mond zu wenig Schwerkraft, um eine stabile Gasschicht zu binden; die Hülle verflüchtigt sich unter der vom nahen Stern ausgehenden Strahlung.

Das Problem ist, dass Monde von erdähnlicher Größe anscheinend nicht so ohne Weiteres entstehen. Wie Astronomen glauben, bilden sich die meisten Trabanten ganz ähnlich wie Planeten: durch allmähliche Zusammenballung in einer kreisenden Scheibe aus Gas, Eis und Staub (siehe Kasten auf S. 58). Computersimulationen dieses graduellen Mondaufbaus bringen höchstens ein Objekt von der Größe des Jupitermonds Ganymed zu Wege. Gemäß der erwähnten Berechnung von 1997 müsste ein solcher Mond auf das Vier- bis Fünffache anwachsen, um eine dauerhafte Atmosphäre zu behalten.

Die Möglichkeit großer Monde

Zum Glück können massereiche Planetenbegleiter auch auf andere Art entstehen. Beispielsweise ist unser Mond so groß, dass er unmöglich zusammen mit der Erde aus einer gemeinsamen Gas- und Staubscheibe hervorgegangen sein kann. Stattdessen glauben viele Astronomen, das Erde-Mond-System sei durch einen katastrophalen Zusammenstoß in der Frühzeit des Sonnensystems entstanden. Auch Pluto und sein größter Trabant Charon dürften Resultat einer Kollision sein, wenn auch in viel kleinerem Maßstab. Solche Paare könnten weitere Mondtypen erklären. Bei einem so genannten Doppelplanetenaustausch nähert sich ein Riesenplanet zwei einander eng umkreisenden Planeten und fängt den einen der beiden als Mond ein, während der andere fortgeschleudert wird. Dieser Austausch hat sich im Sonnensystem mindestens einmal ereignet: Der größte Neptunmond Triton zieht eine ungewöhnlich stark gegen den Neptunäquator geneigte Bahn, die er obendrein als einziger Neptunmond retrograd, das heißt gegen Neptuns Drehsinn durchläuft. Nach Meinung der Astronomen ist Triton der eingefangene Rest eines Zweikörpersystems, das durch Neptun vor langer Zeit auseinandergerissen wurde.

Große Monde können selbst dann flüssiges Wasser – und somit Leben – beherbergen, wenn sie einen Planeten umkreisen, der außerhalb der habitablen Zone eines Sterns liegt. Die fehlende Wärme kann der Mutterplanet durch reflektierte

AUF EINEN BLICK

VERBORGENE EXOMONDE

1 Astronomen suchen bereits nach **Monden aus festem Gestein**, die ferne Exoplaneten umkreisen.

2 Anzeichen für solche **Exomonde** verbergen sich vielleicht schon in den vom **Kepler-Weltraumteleskop** gesammelten Daten. Allerdings sind die Signale derart subtil, dass sie sich nur mit massivem Einsatz rechenstarker Computer aus den Kepler-Daten filtern lassen.

3 Ein Exomond könnte **Lebensformen** beherbergen – vorausgesetzt, er ist groß genug, um eine **Atmosphäre** festzuhalten.

Strahlung und eigene Wärmeemission liefern – sowie durch seine Gravitationsanziehung. So wie der Mond in den irdischen Ozeanen Ebbe und Flut hervorruft, jagt die Schwerkraft eines Gasriesen Wellen von Gezeitenenergie durch einen nahe gelegenen Mond, indem sie das Mondinnere verformt und mittels Reibungswärme erhitzt. Tatsächlich könnte sich ein allzu eng um seinen Gasriesen kreisender Mond durch die Gezeitenwirkung so stark aufheizen, dass er – wie René Heller von der McMaster University in Hamilton (Kanada) und Rory Barnes von der University of Washington in Seattle errechnet haben – seine Atmosphäre abstößt oder gar schmilzt und sich in eine Kugel aus glühender Schlacke verwandelt. Doch auf einem Mond mit größerem Bahnradius kann der Gezeiteneffekt durchaus für angenehme Temperatur sorgen, obwohl sich der Mutterplanet fern von den wärmenden Strahlen des Zentralsterns aufhält.

Die Gezeitenkräfte können auch bewirken, dass ein Trabant seinem Planeten stets nur eine Hemisphäre zukehrt – wie das bei unserem Mond der Fall ist. Auf solchen Welten bietet der Nachthimmel mitunter einen höchst seltsamen Anblick, betont Heller. »Angenommen, Sie stehen auf der dem Planeten zugewandten Hemisphäre eines durch Gezeiteneffekte gebundenen Monds«, erklärt er. »Der Planet schwebt riesenhaft und unbeweglich über Ihnen. Wenn es auf dem Mond Mittag ist, müsste der Zentralstern eigentlich hoch am Himmel strahlen, doch tatsächlich zieht er hinter dem Planeten vorbei, und dieser reflektiert keinerlei Licht, sondern präsentiert seine finstere Seite. Sie sehen überall Sterne – bis auf eine schwarze Scheibe direkt über Ihnen. Um Mitternacht liegt der Stern quasi unter Ihren Füßen; die beleuchtete Seite des Planeten hat sich von einer Sichel zu einem vollen Kreis entwickelt und erhellt den Mond mit einem Maximum von reflektiertem Licht. Somit wäre Ihr Himmel zu Mitternacht viel heller als zu Mittag.«

Monde, die groß genug sind, eine Atmosphäre festzuhalten, sollten sich eigentlich in den Daten der Kepler-Sonde bemerkbar machen. Das Weltraumteleskop hat von seinem Start im Jahr 2009 bis zu seiner vorläufigen Stilllegung wegen technischer Probleme 2013 unentwegt einen bestimmten Himmelsausschnitt fixiert und die Helligkeit von mehr als 150 000 Sternen kontinuierlich überwacht. Zur Suche nach

Planeten dient die so genannte Transitmethode: Wenn ein Planet vor seinem Stern vorbeizieht, nimmt dessen Helligkeit vorübergehend ein klein wenig ab. Jeder Transit erzeugt eine periodisch wiederkehrende Delle im zeitlichen Helligkeitsverlauf des Sterns, der so genannten Lichtkurve.

Der kleinste bisher auf diese Weise aufgespürte Planet, Kepler-37b, ist kaum größer als unser Mond. Wenn die Kepler-Sonde mondgroße Planeten entdecken kann, meint Kipping, sollte sie auch planetengroße Monde finden.

Kipping durchkämmt zwar die Kepler-Daten eifrig nach solchen Spuren, aber er gehört nicht zum Kepler-Team, und sein Projekt ist auch kein Teil der NASA-Mission. Tatsächlich könnte jeder das Gleiche tun wie er, denn die Kepler-Daten sind öffentlich zugänglich. Astronomen und Hobbyplanetenjäger haben bereits neue Himmelskörper entdeckt, indem sie die enorme Datenmasse durchsiebten. Kipping ist auf private Spenden angewiesen; durch einen Aufruf im Internet hat er beispielsweise 12000 Dollar für den Kauf von Prozessoren gesammelt.

Kippings Suchstrategie beruht auf einem meist unauffälligen Detail der Gravitationswechselwirkung: In gewisser Weise kreisen nicht nur die Monde um die Planeten, sondern auch die Planeten um ihre Monde. Genauer gesagt, Planet und Mond drehen sich um den gemeinsamen Schwerpunkt; während der Mond um den Planeten fliegt, zappelt Letzterer hin und her.

Wodurch sich ein Trabant verrät

Angenommen, Sie betrachten ein weit entferntes Mond-Planet-System von der Seite. Wenn der Mond nach rechts ausschwingt, verschiebt sich der Planet ein wenig nach links. Nehmen wir weiter an, dass das Mond-Planet-System von links nach rechts vor dem Zentralgestirn vorbeiwandert. Ein durch seinen Begleiter leicht nach links versetzter Planet wird den Transit von links nach rechts ein wenig – um ein paar Minuten – verspätet beginnen. Beim nächsten Transit desselben Systems befindet sich der Mond vielleicht gerade auf der anderen Seite seines Umlaufs und verschiebt den Planeten ein bisschen nach rechts, so dass dessen Transit leicht verfrüht einsetzt. Zusätzlich kann ein Mond die Gesamtdauer des Transits verändern. Solche periodischen Schwankungen sind ein Indiz für Exomonde.

Zudem kann ein genügend großer Mond das Licht des Zentralsterns teilweise blockieren und dem Transitsignal des Planeten seine eigene winzige Delle hinzufügen. Die kombinierte Delle von Planet und Mond sieht zunächst wie das Signal eines gewöhnlichen Planeten aus, doch gelegentlich liegt der Mond direkt vor oder hinter dem Planeten, und dann blockiert das Mond-Planet-System etwas weniger Licht. Aus dieser Abweichung könnten Astronomen auf den verborgenen Mond schließen.

Doch die Suche nach solchen subtilen Effekten hat ihre Tücken. Eine kleine Senke in der Lichtkurve muss nicht unbedingt vom Transit eines Exomonds herrühren. Sie könnte auch von Sternflecken, stellaren Strahlungsschwankungen

oder banalen Instrumentenfehlern stammen. Eine weitere Komplikation entsteht dadurch, dass manche Exoplaneten nicht um Einzelsterne kreisen, sondern um bedeckungsveränderliche Doppelsternsysteme (siehe »Planeten mit zwei Sonnen« von William F. Welsh und Laurance R. Doyle, Spektrum der Wissenschaft 5/2014, S. 38). In der facettenreichen Lichtkurve solch komplexer Systeme auch noch die Spur von Exomonden zu entdecken, dürfte ein Ding der Unmöglichkeit sein. Sie sind daher auch kein Ziel von Kippings Suche.

Außerdem kann ein bestimmter Transitverlauf durch viele mögliche Anordnungen von Planet und Mond entstehen – mit unterschiedlichen Details wie Größe des Monds, Dauer seines Umlaufs und Neigung seiner Bahn. Wegen dieser Unbestimmtheit ist es äußerst schwierig, einen Exomond nur durch Transitzeiten zu charakterisieren.

Doch falls es Astronomen gelingt, einerseits die Bahnen von Planet und Mond durch Zeiteffekte zu bestimmen sowie andererseits die vom Mond verursachte Delle in der Lichtkurve zu identifizieren, können sie daraus die Massen von Mond, Planet und Stern herleiten. Indem sie die Massen mit Größenschätzungen kombinieren, die auf der vorübergehenden Lichtschwächung durch Planet oder Mond beruhen, schließen die Forscher auf die Dichten dieser Objekte und erhalten Aufschluss über Zusammensetzung, Entstehungsgeschichte und mögliche Bewohnbarkeit.

»Es ist erstaunlich, wie viel in einer Lichtkurve steckt«, meint Kipping. »Was geschieht, wenn ein vor seinem Stern vorbeiziehender Mond oder Planet ein wenig abgeplattet ist oder wenn er Ringe besitzt? Was geschieht, wenn seine Atmosphäre das Licht des Sterns bricht und beugt? All diese komplexen Informationen ergeben sich aus der Messung von winzigen Helligkeitsschwankungen des Sternenlichts.«

Um festzustellen, ob ein bestimmter Transitplanet einen Mond hat, stellt sich Kipping beim HEK-Projekt zunächst die allgemeine Frage: Wie würde die Lichtkurve aussehen, wenn um diesen Planeten ein Mond kreist? Aus hypothetischen Planet-Mond-Systemen mit ganz unterschiedlichen Massen, Radien und Bahnen erzeugt der HEK-Algorithmus zahlreiche simulierte Lichtkurven. Dann durchsiebt er die Kepler-Daten nach Übereinstimmungen und engt die Suche allmählich auf statistisch plausible Mondsignale ein. Dieser aufwändige Prozess von Versuch und Irrtum erklärt, warum HEK so viel Rechenkapazität braucht. Deshalb wählt Kipping aus der Un-



JETZT NEU IM HANDEL

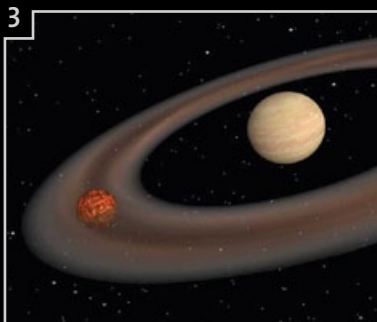
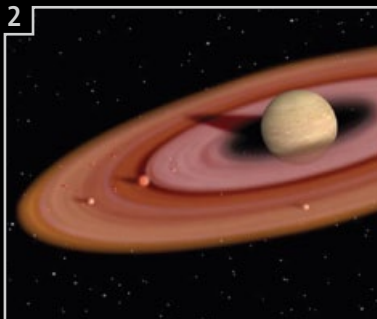
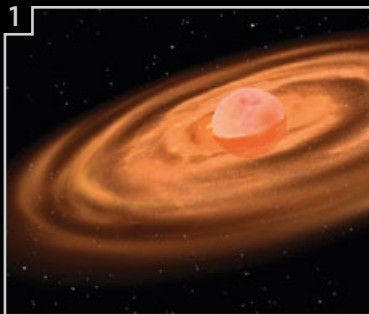
Unser Spezialheft
»Ferne Sterne und Planeten«
berichtet über die spannende Suche nach anderen Sonnensystemen mit erdähnlichen Planeten, auf denen möglicherweise Leben existiert.

Wie ein Mond entsteht

Die meisten bisher entdeckten Exoplaneten sind lebensfeindliche Gasriesen wie unser Jupiter. Doch wenn der Planet einen großen Mond besitzt, könnte dieser Leben tragen. Ein solcher Mond müsste genügend Masse haben, um mit seiner Schwerkraft eine Atmosphäre zu binden. Monde können auf mindestens drei unterschiedliche Arten entstehen.

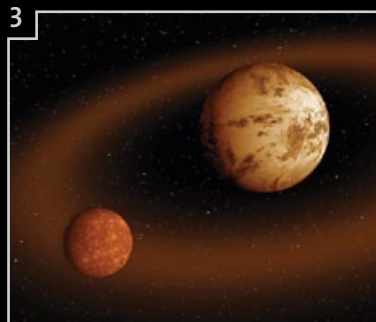
KLUMPEN IN EINER SCHEIBE – ZUM BEISPIEL DIE JUPITERMONDE

Nach herrschender Meinung entstehen Planeten als Zusammenballungen in einer Scheibe aus Staub, Gas und Eis, die um einen Stern rotiert. Rund um die jungen Planeten können sich zusätzliche Scheiben formen (1). Im Lauf von Millionen Jahren klumpen sie dann zu Ringen und Monden zusammen (2 und 3). Diese Vorgänge können allerdings höchstens Monde von der Größe des Jupitermonds Ganymed erzeugen – zu klein, um eine Atmosphäre zu binden.



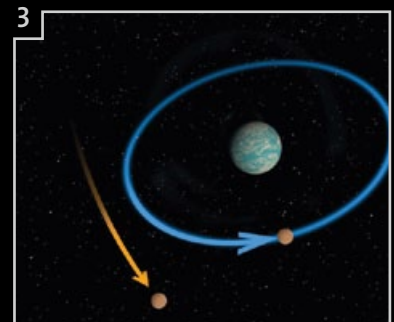
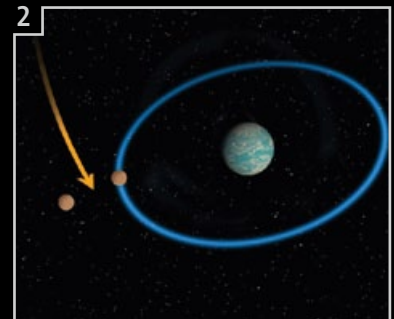
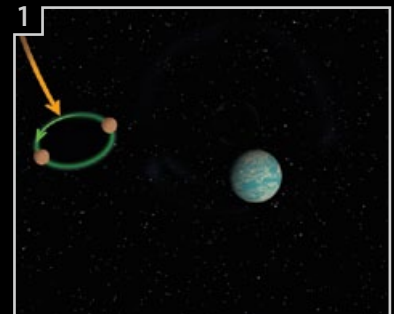
MASSEREICHE KOLLISION – ZUM BEISPIEL UNSER MOND

Bald nach ihrer Entstehung stieß die Erde mit einem Objekt von der Größe des Mars zusammen (1). Dabei wurde eine Fontäne aus Gestein und Eisen fortgeschleudert (2), die sich mit der Zeit abkühlte und in den Mond verwandelte (3). Theoretisch können aus solchen Kollisionen zwei fast gleich große Objekte hervorgehen. So bildet sich ein Doppelplanet, bei dem der »Mond« ebenso groß ist wie der »Planet«.



DOPPELPLANETENAUSTAUSCH – ZUM BEISPIEL NEPTUNMOND TRITON

Ein durch Kollision entstandener Doppelplanet trifft mitunter auf einen weiteren, noch größeren Planeten (1). Während das Planetenpaar an ihm vorbeizieht (2), zieht der Einzelgänger den einen Partner an und schleudert den anderen fort (3). Eingefangene Monde, die von Doppelplaneten abstammen, können ziemlich groß sein.



menge von Kepler-Planeten penibel nur besonders viel versprechende Ziele aus: massearme Planeten von der Größe Neptuns, die einen sonnenähnlichen Einzelstern relativ eng umkreisen und für einen Umlauf höchstens sechs Monate brauchen. Solche Planeten liefern die deutlichsten Signale, wenn ein großer Mond sie begleitet.

Monde als Planetensonden

Kipping will auch Planeten untersuchen, die vor roten Zwergsternen vorbeiziehen. Diese sind viel kleiner, lichtschwächer und zahlreicher als Sterne vom Typ unserer Sonne. Infolge der geringen Größe des Zwergsterns blockiert ein Transitplanet einen höheren Prozentsatz des Sternlichts. Die geringe Leuchtkraft verschiebt die habitable Zone näher zum Stern; ein Planet mit entsprechendem Bahnradius läuft schnell im Kreis und beschenkt die Astronomen mit einer größeren Anzahl von Transits. »Für uns haben diese Sterne nur Vorteile«, erklärt Kipping. »In den besten Fällen könnten wir wahrscheinlich sogar einen Mond entdecken, dessen Masse nur ein Zehntel oder Fünftel der Erdmasse ausmacht.«

Schlimmstenfalls wird HEK allerdings überhaupt keine Exomonde entdecken. Daraus könnte Kipping zumindest auf eine obere Grenze für die Anzahl von Planeten mit großen Monden schließen. Schon jetzt wissen wir, was sicher nicht existiert. »Gäbe es viele wirklich große Monde, etwa einen Transitplaneten vom Ausmaß Jupiters mit einem zwei Erdradien großen Mond, sähe man das mit freiem Auge in der Lichtkurve«, sagt der Astronom Eric Ford von der University of Florida in Gainesville. »Dann hätte jemand den Mond bereits in den Kepler-Daten aufgespürt oder wäre ihm dicht auf den Fersen.« Unterdessen hat Kipping die Möglichkeit ausgeschlossen, dass sein anfängliches Ziel Kepler-22b einen Mond besitzt, der voluminöser ist als die halbe Erde.

Andere Astronomen wie Eric Agol von der University of Washington bezweifeln, dass die Kepler-Daten schlüssige Beweise für Exomonde liefern können, insbesondere nur auf Grund von Zeiteffekten. »Ich denke, für einen glaubhaften Nachweis muss man den Transit eines Mondes tatsächlich sehen«, betont Agol. »Aber das ist mit dem Kepler-Teleskop kaum zu schaffen. Natürlich darf man auf trotzdem auf Überraschungen hoffen.«

Trotz seiner Skepsis räumt Agol ein, dass er und ein paar Mitarbeiter ebenfalls eine inoffizielle Suche anstellen; allerdings treiben sie weniger Computeraufwand als HEK, sondern suchen nach offensichtlicheren Effekten in einer größeren Anzahl von Kepler-Lichtkurven. »Wir sollten soweit wie möglich bei jedem bisher entdeckten Planeten nachsehen«, meint Agol.

Wie Kipping betont, erhöhen Monde auf mehrfache Weise die Chance für Leben. Zum Beispiel würden auf der Erde ohne den Mond vielleicht ganz andere Klimabedingungen und Jahreszeiten herrschen, denn über astronomische Zeitspannen hinweg stabilisiert er die Neigung der Erdachse. Außerdem könnte der Mond, bevor er sich auf seine gegenwärtige Umlaufbahn entfernte, mit seiner einst enormen Gezei-

tenwirkung das Entstehen und Gedeihen von Leben auf der Erde entscheidend gefördert haben.

»Sobald wir einen erdähnlichen Planeten innerhalb der habitablen Zone entdecken, wird eine der ersten Fragen lauten: Hat er einen Mond?«, sagt Kipping. Die Antwort wird entscheiden, ob es sich um einen echten Zwilling unseres Heimatplaneten handelt oder nur um einen entfernten Verwandten. »Ist die Erde ein seltener Glückstreffer oder etwas ganz Normales?« fragt er weiter. »Mit einer Stichprobe der Größe eins können wir das nicht wissen. Erst wenn wir mehrere Beispiele außerhalb unseres Sonnensystems finden, wird sich das Bild klären.«

Mit Hilfe eines künftigen, der Kepler-Sonde weit überlegenen Teleskop würde ein Exomond noch viel speziellere Fragen beantworten. Ein genügend großes auf der Erde oder im Weltraum stationiertes Instrument könnte die Atmosphäre eines erdähnlichen Transitplaneten oder Transitmonds analysieren und darin Anzeichen für Leben aufspüren – etwa Sauerstoff.

Nach Kippings Meinung lassen sich manche Exomonde sogar nutzen, um die Oberfläche ihres Mutterplaneten zu kartieren. Astronomen erforschen bereits die Oberfläche von Sternen, indem sie deren Helligkeit genau verfolgen, während ein Transitplanet am Stern vorbeizieht. »Wenn ein Mond von uns aus gesehen einen Planeten passiert, ergibt sich im Prinzip dieselbe Möglichkeit – nur betrachtet man dabei die Oberflächenhelligkeit des Planeten«, erklärt Kipping. »Mit äußerst raffinierten Methoden könnte man aus dem Verlauf der Lichtkurve, während der Mond an einem Zwilling der Erde vorbeizieht, eine grobe Karte der Kontinente und Meere zeichnen. Manchmal denke ich, dass wir nur so – wenn überhaupt jemals – eine Art Fotografie eines bewohnbaren Planeten bekommen werden.«

DER AUTOR



Lee Billings ist Journalist und Schriftsteller. Er lebt in New York.

QUELLEN

Billings, L.: Five Billion Years of Solitude. The Search for Life among the Stars. Penguin, New York 2013

Kipping, D. M. et al.: The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK): I. Description of a New Observational Project. In: Astrophysical Journal 750, S. 115 – 134, 2012; <http://arxiv.org/abs/1201.0752>

WEBLINKS

Trickfilm der Lichtkurve eines Planet-Mond-Systems unter ScientificAmerican.com/jan2014/exomoons

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281874

Welt der Schatten

Indem frühe Forscher die von astronomischen Körpern geworfenen Schatten vermaßen, trugen sie maßgeblich zu unserem naturwissenschaftlichen Weltbild bei.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Was kann der Mensch erkennen? Eine der berühmtesten Antworten auf diese Frage gab Plato (427–um 348 v. Chr.) in seinem Höhlengleichnis. Hier schildert er, wie Menschen in einer Höhle unaufhörlich deren Wände beobachten, auf denen Schatten hin- und herwandern. Diese stammen von Lebewesen und Gegenständen, die sich vor der Höhle und damit außerhalb des Blickfelds der Menschen bewegen. Nur weil sie von einem großen, weit entfernten Feuer angestrahlt werden, dessen Licht auch in den Höhleneingang dringt, sind sie überhaupt zu bemerken.

Für Plato sind wir selbst die Menschen in der Höhle: Normalerweise können wir lediglich das sinnlich Wahrnehmbare in unserer unmittelbaren Umgebung deuten. Von der nur geistig erfahrbaren Außenwelt besitzen wir in der Regel allenfalls eine schattenhafte Ahnung. Die menschliche Erkenntnis, so kann man den Philosophen verstehen, sei prinzipiell auf die Untersuchung von Schatten beschränkt und eine direkte sinnliche Erfahrung der Wirklichkeit unmöglich.

Jenseits solcher Metaphysik lassen sich Platos Schatten aber auch ganz wörtlich nehmen. Als Instrument naturwissenschaftlicher Erkenntnis war das »Schattenlesen« sogar einer der wichtigsten Zugänge des Menschen zu seiner Umwelt: Einen ganz erheblichen Teil des klassisch-astronomischen Weltbilds gewannen frühe Naturforscher tatsächlich durch Beobachtungen von Schatten. Was aber macht diese so erkenntnisträchtig?

Als Schatten sind Gegenstände in ihrer Komplexität, insbesondere der Zahl ihrer räumlichen Dimensionen, reduziert und von überflüssigen Details be-

freit. Nicht selten werden sie einer wissenschaftlichen Untersuchung so überhaupt erst zugänglich. Eine der ersten mit Hilfe von Schatten gewonnenen astronomischen Erkenntnisse war die Invarianz der Nord-Süd-Richtung, die bereits die Inder vor etwa 4000 Jahren entdeckten. Wenn sie einen Schattenstab senkrecht aufstellten und um seinen Fußpunkt mehrere konzentrische Kreise zogen, stellten sie fest, dass das Ende des Schattens im Lauf eines Tages je zweimal auf denselben Kreis fällt, an je unterschiedlichen Orten (Skizze rechts oben). Die Winkelhalbierende des von

den Schnittpunkten gekennzeichneten Kreisabschnitts zeigt dann stets in dieselbe, nämlich in die Nord-Süd-Richtung – damit hatten sie ein unveränderliches Orientierungsmerkmal entdeckt.

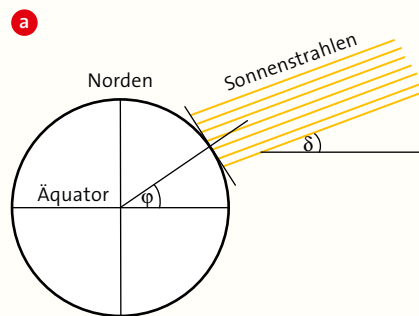
Um 1100 v. Chr. bestimmten dann die Chinesen die Schiefe der Ekliptik, also die Neigung der Erdachse relativ zu der Ebene ihrer Bewegung um die Sonne, und lieferten so gleichzeitig einen Beleg dafür, wie weit ihre astronomischen Modelle bereits gediehen waren. Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangte um 300 v. Chr. der Hellene Pytheas, der mit Hilfe eines Schattenstabs neben

»Nichts ist begreiflich ohne Licht und Schatten«

Leonardo da Vinci (1452–1519)

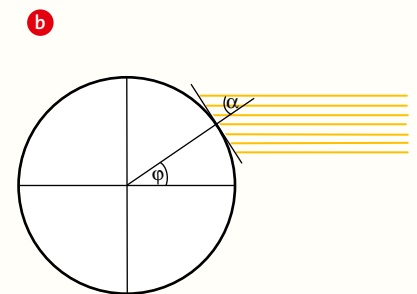
Skizzen eines Weltbilds

Die frühen Wissenschaftler mussten bereits weit reichende Vorstellungen von den Bewegungen der Himmelskörper besitzen, um aus der Beobachtung von Schatten as-



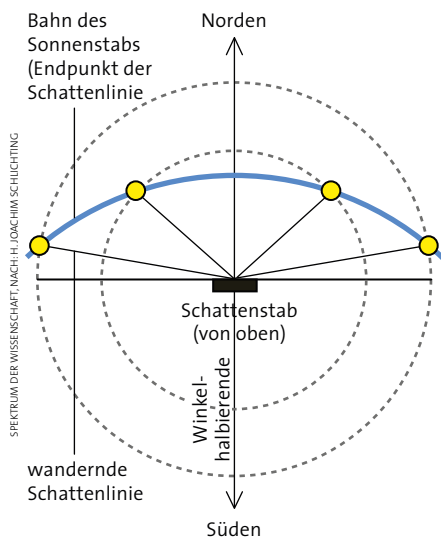
Schiefe der Ekliptik

Am Tag der Sommersonnenwende lässt sich vom Breitengrad φ des eigenen Standorts und von der Sonnendekliniation δ auf die Schiefe der Ekliptik schließen.



Geografische Breite

Bei Tag-und-Nacht-Gleiche steht die Sonne mittags senkrecht über dem Äquator, ihre Dekliniation ist also $\delta = 0$. Dann entspricht der Winkel α zwischen Schatten und Schattenstab genau der geografischen Breite.



Nord-Süd-Richtung

Auf konzentrischen Kreisen rund um einen Schattenstab kommt das Ende des Schattens je zweimal pro Tag zu liegen. Die Winkelhalbierende liegt dann stets in Nord-Süd-Richtung.

eine Mondfinsternis. Interpretiert man sie als Vorgang, bei dem der Mond den Erdschatten durchquert, erweist sich Ersterer als eine Art Projektionsschirm der von der Sonne beleuchteten Erde. Und weil die Schattengrenze der Erde auf diesem Schirm stets kreisbogenförmig verläuft, kommt nur eine Kugel als Schattengeber in Frage.

Vermutlich war es dieses Vorwissen, das später Erathostenes (etwa 275–195 v. Chr.) dazu ermutigte, den Umfang der Erdkugel zu bestimmen. In Syene, dem heutigen Assuan in Ägypten, lagen die Dinge einfach: Am Tag der Son-

nenwende, dem 21. Juni, schien die Sonne mittags senkrecht in einen Brunnen, warf also keinen Schatten; denn Assuan liegt auf dem nördlichen Wendekreis. (Das Experiment hätte an jedem Ort zwischen den Wendekreisen funktioniert, solange die Sonne nur im Zenit gestanden hätte.) Gleichzeitig ließ sich an einem Schattenstab in Alexandria – nördlicher auf fast demselben Längengrad gelegen – ein Winkelabstand zwischen Sonne und Zenit von rund 7,2 Grad ablesen. Die Skizze (c) zeigt, dass der in Alexandria gemessene Winkel identisch mit dem Winkel des Kreisbogens auf der Erdoberfläche ist, der Alexandria mit Syene verbindet – eine Strecke von rund 800 Kilometer Luftlinie, zu deren Abmessung Erathostenes beamtete Schrittzähler zur Verfügung gestellt wurden und deren Länge er mit 5000 Stadien angab. Je nachdem, ob er ägyptische oder griechische Stadien meinte, betrug der so ermittelte Erdumfang 39375 oder 46250 Kilometer – tatsächlich sind es etwa 40000.

der Schiefe der Ekliptik (a) auch die geografische Breite (b) seines Geburtsorts Marseille bestimmte.

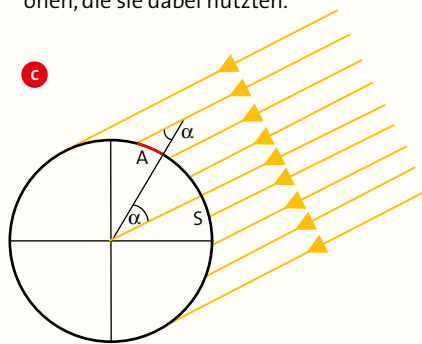
Schatten verraten auch die Kugelgestalt der Erde. Zwar gibt es für diese weitere Indizien, wie etwa die hinter dem Horizont verschwindenden Schiffe. Noch aussagekräftiger ist jedoch

Beleg für revolutionäre Ansichten

Für Aristarch von Samos (310–230 v. Chr.) diente wieder die Erde selbst als Schattengeber. Wenn bei Halbmond die Hälfte des Erdtrabanten in dessen eigenem Schatten liegt, bilden Erde, Mond und Sonne ein rechtwinkliges Dreieck (d). Den Winkel zwischen Sonne und Mond bestimmte er zu 87 Grad, woraufhin er das Verhältnis zwischen der Entfernung Erde-Sonne und Erde-Mond abschätzen konnte. Die Sonne, so fand er heraus, muss 19-mal weiter von der Erde weg sein als der Mond. Damit lag er zwar um das 20-Fache zu niedrig, doch war der Wert für damalige astronomische Vorstellungen so groß, dass Aristarch eine revolutionäre Ansicht vertreten konnte: Nicht die Erde, sondern die weit entfernte Sonne stünde im Zentrum der Welt. Die Ungenauigkeit hatte übrigens einen einfachen Grund; mittlerweile ist klar, dass der betreffende Winkel fast genau 90 Grad beträgt und selbst mit modernen Methoden nicht genau messbar ist.

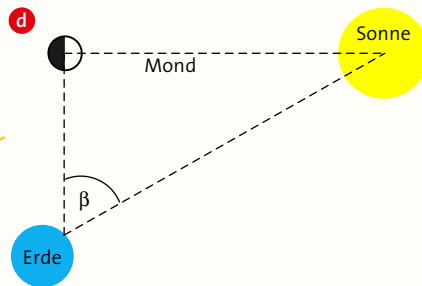
Aristarch kam außerdem auf die Idee, aus einem Schattenphänomen das

tronomische Erkenntnisse zu gewinnen. Die Skizzen illustrieren einige der Konstellationen, die sie dabei nutzten.



Erdumfang

Der Winkel α , den der Schattenstab mit den Sonnenstrahlen bildet, ist gleich dem Winkel des durch Alexandria (A) und Syene (S) begrenzten Kreisbogens. Damit und aus der entlang der Erdoberfläche gemessenen Strecke AS lässt sich dann der Erdumfang ermitteln.



Entfernungsverhältnisse

Während dieser Konstellation von Sonne, Erde und Mond konnte Aristarch den Winkel β zwischen den Verbindungslinien Erde-Sonne und Erde-Mond zu 87 Grad ermitteln und mit Hilfe weiterer Überlegungen das Verhältnis der Entfernungen Erde-Mond und Erde-Sonne berechnen. Längen und Winkel sind nicht maßstabsgerecht dargestellt.



STEFAN SEIP

Größenverhältnis von Erde und Mond herauszulesen. Bei einer Mondfinsternis beobachtete er nämlich, dass der Erdschatten auf dem Mond etwa die Größe des doppelten Monddurchmessers hat; tatsächlich sind es 2,6 Monddurchmesser. Außerdem wusste er, dass der Mond die Sonne bei einer totalen Sonnenfinsternis gerade abzudecken vermag. Aus diesen Angaben konnte er mit Hilfe des aus der Mathematik bekannten Strahlensatzes das Verhältnis von Mondradius zu Erdradius ermitteln.

Der ungenaue Gang der Sonnenuhr

Schatten erlaubten aber nicht nur Aussagen über statische Eigenschaften der Welt. Weil der Lauf der Sonne sie kontinuierlich in Bewegung hält, geben sie auch Einblick in astronomische Abläufe. Die ersten Uhren der Menschheit, welche zuverlässig die Tageszeit anzeigten – unabhängig davon, an welchem Tag im Jahr sie abgelesen wurden –, entwickelten frühe Wissenschaftler, indem

sie lernten, die Orientierung der Schattenstäbe auf die geografischen Gegebenheiten abzustimmen. Und in die ersten Kalender, wie sie für die sesshaft gewordenen und vom Ackerbau abhängigen Menschen bedeutsam geworden waren, ließen sie die Wanderung des Nachtschattens einfließen.

Als im Verlauf des 15. Jahrhunderts mechanische Uhren gebräuchlich wurden, stellte man fest, dass sie dem Schatten im Jahresverlauf mal vorausseilen, mal hinterherhinken. Weil man der Regelmäßigkeit der sie antreibenden Pendelschwingungen größeres Vertrauen als dem »Gang« der Sonnenuhr entgegenbrachte, suchte man die Ursachen für die Diskrepanz vor allem in astronomischen Gegebenheiten. Tatsächlich stießen Wissenschaftler so auf die elliptische Form der Bahn der Erde um die Sonne, die zu einer im Jahreslauf variierenden Umlaufgeschwindigkeit führt.

Schatten sind also weit mehr als bloße Verdunklung. Die Menschheit lernte

Zu den beeindruckendsten – und seltensten – astronomischen Schattenphänomenen zählt der Venustransit. Dabei sehen wir die unbeleuchtete Seite unseres Nachbarplaneten, während er vor der Sonne vorbeizieht. Im 17. und 19. Jahrhundert wurden solche Transits zur Bestimmung des damals nur ungefähr bekannten Abstands der Erde von der Sonne genutzt. Nachdem 2004 und 2012 zwei Transits kurz aufeinanderfolgten, findet der nächste erst wieder im Jahr 2117 statt.

früh, sie als eng mit der Bewegung von Sonne, Mond und Erde verbundene Phänomene aufzufassen, die helfen konnten, unser Naturverständnis zu erweitern. Doch ist diese Geschichte damit schon an ihrem Ende angelangt? Keineswegs. In der modernen Physik haben Platons Schatten wieder zu ihrer gleichnishaften Bedeutung zurückgefunden. Je tiefer die Forscher in den Mikrokosmos vordringen, desto schwerer fällt ihnen nämlich die Antwort auf die Frage, woraus denn die Welt »in Wirklichkeit« besteht. Physiker sind mit Symbolen und Formeln erfolgreich, aber die Wirklichkeit selbst bekommen sie nicht zu fassen. Das sah auch der britische Astrophysiker Arthur Eddington (1882–1944) so. 1931 schrieb er in »Das Weltbild der Physik«: »Das offene Eingeständnis, dass die Physik sich mit einer Welt der Schatten befasst, ist einer der bezeichnendsten Fortschritte der neueren Zeit.« ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 erhielt er den Archimedes-Preis für Physik.

WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu antiken astronomischen Experimenten unter: www.spektrum.de/artikel/1286310

JETZT NEU!

Unsere Digitalreihe Ratgeber

Nur
€ 2,49*



Renommierete Pädagogen erklären, wie Eltern ihren Kindern beim Lernen am besten unter die Arme greifen können. Mit vielen praktischen Tipps und Übungen für den Alltag. **Lernhilfen für Kinder** ist die 2. Ausgabe der digitalen Ratgeberreihe von »Gehirn und Geist« (PDF-Format).

DIGITALRATGEBER

Ausgabe 1: **Kommunikation und Rhetorik**

Ausgabe 2: **Lernhilfen für Kinder**

* Bezahlungsmöglichkeit



PayPal™

www.gehirn-und-geist.de/ratgeber

Hier QR-Code per
Smartphone scannen!



Woraus besteht die Dunkle Materie?

Weil bisherige Experimente keine klare Antwort auf diese Frage liefern, sollten Physiker ihre Suche nach jenen flüchtigen Elementarteilchen ausweiten, die den Löwenanteil der Masse des Universums stellen. Bleiben die Erfolge auch dann noch aus, werden sie ihre Theorien über unsere Welt grundsätzlich überdenken müssen.

Von Mario Livio und Joe Silk

Die Dunkle Materie macht ihrem Namen alle Ehre. Zwar liefern astronomische Beobachtungen schon seit Jahrzehnten überzeugende indirekte Hinweise auf die Existenz dieser Form von Materie, die elektromagnetische Strahlung weder aussendet noch absorbiert. Aber alle Versuche, ihre Bestandteile nachzuweisen, schlugen fehl.

Auf die Gegenwart Dunkler Materie lässt sich nur durch ihre Schwerkraft schließen. Beispielsweise bewegen sich Sterne und Gaswolken in Galaxien oder auch Galaxien in Galaxienhaufen deutlich schneller, als allein die Anziehung der sichtbaren Materie erklären würde. Das Licht weit entfernter Objekte könnte durch die Schwerkraft von Dunkler Materie abgelenkt werden, die ihm auf dem Weg zur Erde in die Quere kommt. Und schließlich hängt auch das beobachtete Mus-

ter der großräumigen Strukturen im Universum hauptsächlich von der Dunklen Materie ab. Tatsächlich sind astronomischen Messungen zufolge ungefähr 85 Prozent der Materie im Universum dunkel – das entspricht etwa einem Viertel seines gesamten Energieinhalts.

So allgegenwärtig die Dunkle Materie ist, sie entzieht sich immer noch der Beobachtung. Bislang waren die Befunde allesamt negativ, wenn Forscher den Teilchenkandidaten, mit denen sie zu erklären wäre, mit Experimenten zu Leibe rückten. LUX, das Large Underground Xenon Experiment tief unter der Erde in der Homestake-Mine im US-Bundesstaat South Dakota, ist der bislang empfindlichste Detektor seiner Art. In den inzwischen ausgewerteten ersten drei Monaten seines Messbetriebs 2013 fand er aber keinerlei Anzeichen für Teilchen der Dunklen Materie. Der große Hadronenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) des europäischen Teilchenforschungszentrums CERN bei Genf lieferte bislang ebenfalls keine Hinweise. Dort fahndet man nach denjenigen Kandidaten, die manchen Forschern zufolge am ehesten für die Dunkle Materie in Frage kommen: die von Theoretikern vorhergesagten supersymmetrischen Teilchen. Jedes bekannte Elementarteilchen existiert demzufolge auch in Gestalt eines viel schwereren so genannten Superpartners.

Gibt es Licht am Ende dieses dunklen Tunnels? Möglicherweise – aber nur dann, wenn wir die Suche entschlossener angehen und ausweiten. Bei unseren Experimenten sollten wir nicht nur nach den üblichen Verdächtigen, sondern nach möglichst vielen verschiedenen Teilchenarten suchen. Darüber hinaus müssen die Forscher Tests ersinnen, mit denen sich zumindest einige der vielen Modelle und Theorien defi-


AUF EINEN BLICK

IN ALLE RICHTUNGEN SUCHEN

1 Die meisten Astrophysiker betrachten Dunkle Materie als **unverzichtbaren Bestandteil des Universums**. Der Nachweis der mysteriösen Substanz ist bislang aber nicht gelungen.

2 Falls die Dunkle Materie aus mehr als einem **Teilchentyp** bestehen oder ausschließlich über die **Gravitation** mit anderen Teilchen wechselwirken sollte, hätten bisherige Experimente nur geringe Chancen, sie zu finden.

3 Die Autoren fordern, die Suche auszuweiten: auf neue Experimente, auf **zusätzliche Teilchenarten** und auf astrophysikalische Phänomene, bei denen die Teilchen sogar **Schwarze Löcher** entstehen lassen könnten.



Die Teleskope des geplanten Cherenkov Telescope Array (CTA) sollen Dunkle Materie indirekt nachweisen. Sie registrieren, wenn energiereiche Photonen, die bei der Zerstrahlung von Dunkle-Materie-Teilchen erzeugt wurden, auf die Erdatmosphäre prallen.

DESY / MILDE SCIENCE COMMUNICATION / EXOZET

nitiv ausschließen lassen. Sollte die Dunkle Materie allerdings in der nächsten Dekade weiterhin unentdeckt bleiben, so stünden die Physiker ernsthaft vor der Entscheidung, statt über neue Teilchen besser über alternative Theorien der Gravitation nachzudenken.

Jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik

Einiges wissen wir immerhin schon über die Dunkle Materie. Da sie kein Licht absorbiert und auch sonst nicht mit elektromagnetischer Strahlung wechselwirkt, können Baryonen – die zu den Teilchen der gewöhnlichen Materie gehören – nicht ihr Hauptbestandteil sein. Zu den Baryonen zählen insbesondere Protonen und Neutronen im Atomkern, die wie alle Baryonen aus jeweils drei Quarks bestehen. Auch aus einem anderen Grund muss die Dunkle Materie über das Standardmodell der Teilchenphysik hinausgehen. Bestünde sie aus gewöhnlicher baryonischer Materie, käme es nämlich zu Widersprüchen mit der Theorie der Elemententstehung beim Urknall. Die aber sagt überaus erfolgreich die heute beobachteten Häufigkeiten der leichten Elemente wie Deuterium, Helium und Lithium vorher.

Als Hauptbestandteile der Dunklen Materie erwarten die Forscher schwach wechselwirkende massereiche Teilchen, kurz WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles). Solche Teilchen bringen einige Dutzend bis Tausende Protonenmassen auf die Waage. WIMPs treten miteinander und mit anderen Teilchen über die Gravitation und über die schwache Kraft in Wechselwirkung, aber nicht über die zwei anderen Fundamentalkräfte, die elektromagnetische sowie die starke Kraft. Sie müssen sich zudem relativ langsam bewegen – also

»kalt« sein –, um die Entstehung der Galaxien und Galaxienhaufen erklären zu können. Wären die WIMPs schneller – in der Sprache der Fachleute also »wärmer« oder gar »heiß« –, könnten WIMPs also etwa Regionen der Größe einer werdenden Galaxie rasch durchqueren, so hätten sie viele der heute beobachteten Strukturen im Universum längst verwischt.

Welche Kandidaten gibt es für die WIMPs? Am wahrscheinlichsten, so vermuten viele Physiker, handelt es sich bei ihnen um die leichtesten supersymmetrischen Teilchen. In Theorien des frühen Universums spielt eine mathematische Symmetrie eine Rolle, die so genannte Supersymmetrie (SUSY), die jedem bekannten Elementarteilchen – darunter etwa das Elektron, das Photon oder die Quarks – einen sehr massereichen Partner zuordnet. Laut diesen Theorien sind unmittelbar nach dem Urknall alle schweren SUSY-Teilchen zerfallen oder vernichteten sich durch Annihilation gegenseitig. Nur die leichtesten Teilchen, die nicht weiter zerfallen konnten, überlebten bis heute.

Die Anzahl der erhalten gebliebenen SUSY-Teilchen hängt von ihren Massen und der Stärke ihrer Wechselwirkungen ab; beides ergibt sich aus theoretischen Berechnungen. Diese Eigenschaften müssen gerade solche Werte haben, dass die Dichte der noch existierenden Teilchen die beobachteten Effekte der Dunklen Materie erklären kann. Weil leichte SUSY-Teilchen zu dieser Dichtebilanz passen, versuchen Forscher in aller Welt sie mit zahlreichen unterschiedlichen Experimenten nachzuweisen. Bislang sind sie aber rein hypothetisch.

Den Modellen zufolge bilden Dunkle-Materie-Teilchen eine kugelförmige massereiche Materiewolke um unsere eigene Galaxie, einen Halo. Einige von ihnen durchqueren

auch unsere Detektoren – jeden Quadratmeter Detektorfläche sollten pro Sekunde mehrere dieser Teilchen treffen. Mit ein bisschen Glück könnte bei einer jetzt anstehenden, 300 Tage dauernden Messung des LUX-Experiments der Nachweis von WIMPs gelingen. Vielleicht sind aber noch größere Detektoren nötig – oder andere Methoden (siehe Kasten).

Da die Teilchen so schwach wechselwirken, muss für ihre Messung enormer Aufwand getrieben werden. Treffen sie mit der erwarteten Rate ein, werden nach einigen Schätzungen Detektoren mit der 100-fachen Masse von LUX benötigt, um genügend von ihnen einfangen zu können. 2019 könnte dessen Nachfolger LUX ZEPLIN in Betrieb gehen, das mit 7 Tonnen flüssigem Xenon statt der bisherigen 370 Kilogramm arbeiten soll. Vielleicht brauchen wir sogar 100 Tonnen, aber damit hätten wir das Limit erreicht. Denn ab dann sorgen Neutrinos – erzeugt bei Supernovae, in unserer Sonne und beim Aufprall energiereicher Teilchen aus der kosmischen Strahlung auf die Erdatmosphäre – für unvermeidliche »Hintergrund«-Signale, die sich nicht mehr von WIMP-Anzeichen unterscheiden lassen.

Vielleicht können wir die Teilchen der Dunklen Materie auch künstlich in großen Beschleunigern erzeugen. Der LHC soll ab 2015 eine Energie von 14 Teraelektronvolt (TeV, 10^{12} eV) erreichen – das ist das Doppelte der Energie, bei der das Higgs-Bosons aufgespürt wurde. Möglicherweise zeigen sich dann erste Hinweise auf SUSY-Teilchen und auf andere Abweichungen vom Standardmodell. Allerdings deutet das bisherige Ausbleiben jeglicher noch so schwacher SUSY-Anzeichen eher darauf hin, dass wir erheblich höhere Energien benötigen, um diese Teilchen tatsächlich zu sehen. Viele Teilchenphysiker befürworten daher den Bau eines LHC-Nachfolgers, der bis zu 100 TeV erreicht. Um 2020 könnten die Arbeiten beginnen – eine aufregende Perspektive.

Einige Experimente zur Dunklen Materie lieferten zwar schon in den letzten Jahren faszinierende Ergebnisse, ihre Deutung ist aber umstritten. Beispielsweise wird seit 14 Jahren im italienischen Gran-Sasso-Bergmassiv mit dem DAMA/LIBRA-Experiment beziehungsweise seinem Vorgänger nach Schwankungen im Teilchenstrom der Dunklen Materie gefahndet. Diese Fluktuationen beruhen darauf, dass die Erde um die Sonne läuft und sich zugleich mit ihr durch unsere Heimatgalaxie bewegt, so dass sich die Bewegungen überlagern. Ein halbes Jahr lang haben beide dieselbe Richtung, und ein halbes Jahr lang sind sie einander entgegengesetzt. Die Dunkle-Materie-Teilchen, die sich ungeordnet durch die Milchstraße bewegen, sollten daher mit jahreszeitlich schwankenden Raten auf die irdischen Detektoren fallen.

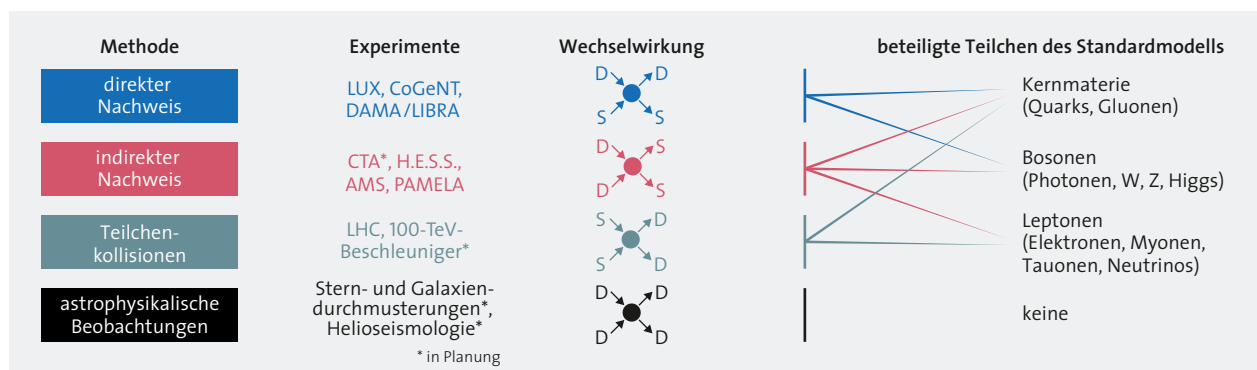
Stammen die Signale wirklich von WIMPs?

Von solch einer Veränderung berichtete 2013 das DAMA/LIBRA-Team; seine kumulierten Messungen wiesen eine extrem hohe statistische Signifikanz auf, müssen also als sehr verlässlich gelten. Unabhängig davon zeigten sich zu Beginn dieses Jahrs ähnliche periodische Schwankungen auch in den über drei Jahre angesammelten Daten von CoGeNT, dem Coherent Germanium Neutrino Technology Dark Matter Experiment in der Soudan-Mine im US-Bundesstaat Minnesota. Allerdings war die Signifikanz der Messkurven gering, auch stimmten die Messungen nur teilweise mit den Vorhersagen überein. Die meisten Physiker bezweifeln einstweilen, ob die DAMA/LIBRA-Ergebnisse wirklich von WIMPs stammen und überlegen, ob nicht ein anderes Phänomen als Ursache in Frage kommt. Beispielsweise könnten Neutronen aus dem umgebenden Gestein ausgewaschen werden – in je unterschiedlicher Zahl, weil dessen Temperatur mit den Jahreszeiten schwankt.

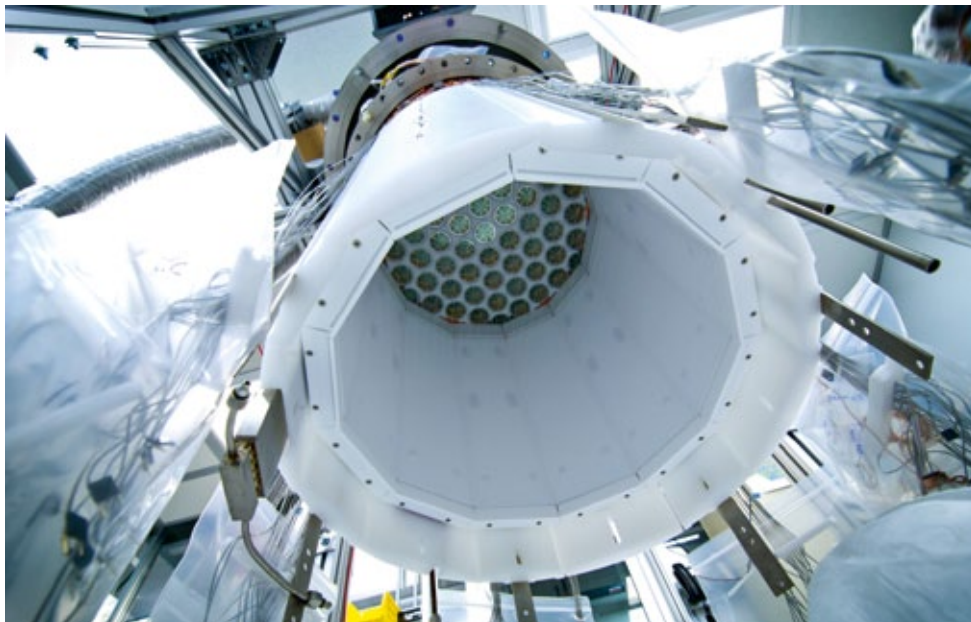
Auf vielen Wegen zum Ziel

Die Teilchen der Dunklen Materie, also schwach wechselwirkende massereiche Teilchen oder Axionen (in der mittleren Spalte mit D gekennzeichnet), lassen sich anhand ihrer Wechselwirkungen mit verschiedenen Teilchen des Standardmodells (S) oder auch mit anderen Dunklen Teilchen aufspüren. Der ex-

perimentelle Nachweis kann auf verschiedene Arten gelingen: ➤ direkt, ➤ indirekt durch den Nachweis von Teilchen wie etwa Photonen, die bei der jeweiligen Wechselwirkung frei werden, ➤ bei Teilchenkollisionen in Beschleunigern oder ➤ durch astrophysikalische Beobachtungen.



LUX: LARGE UNDERGROUND XENON EXPERIMENT; COGeNT: COHERENT GERMANIUM NEUTRINO TECHNOLOGY DARK MATTER EXPERIMENT; CTA: CHERENKOV TELESCOPE ARRAY; H.E.S.S.: HIGH ENERGY STEREO SCOPIC SYSTEM; AMS: ALPHA MAGNETIC SPECTROMETER; PAMELA: PAYLOAD FOR ANTIMATTER MATTER EXPLORATION AND LIGHT-NUCLEI ASTROPHYSICS; LHC: LARGE HADRON COLLIDER



Mit dem LUX-Experiment wollen Forscher Photonen nachweisen, die bei der Wechselwirkung zwischen Teilchen der Dunklen Materie und flüssigem Xenon entstehen.

Die Versuche, Dunkle Materie indirekt nachzuweisen, blieben bislang ähnlich ergebnislos. 2013 ergaben Messungen des Alpha-Magnet-Spektrometers (AMS-02) auf der Internationalen Raumstation einen »Überschuss« an Positronen, der im Spektrum der kosmischen Strahlung bis zu einer Energie von 350 Gigaelektronvolt beobachtet wurde. Ein solcher Überschuss entspricht dem, was durch Kollision und anschließende Paarvernichtung von Dunkle-Materie-Teilchen entstehen sollte. Dieses Ergebnis bestätigte zudem Berichte vom Satellitenexperiment PAMELA. Die Positronen könnten jedoch auch aus anderen Quellen stammen, etwa aus Winden schnell rotierender Neutronensterne, so genannter Pulsare. Beobachtungen bei noch höheren Energien, die AMS-02 in den nächsten zwei Jahren durchführen wird, können möglicherweise zwischen den Hypothesen entscheiden.

Für Aufregung sorgte im vergangenen Jahr eine Entdeckung des Weltraumteleskops Fermi. Seine Messungen ergaben einen Überschuss an Gammastrahlung aus der Region um das Zentrum der Milchstraße, wo sich die Dunkle Materie konzentrieren sollte. Eine schmale Spektrallinie bei 130 GeV, die offenbar mit dem Überschuss zusammenhängt, könnte ein Hinweis auf den Zerfall oder die Paarvernichtung von Teilchen der Dunklen Materie sein. Allerdings wurde eine ähnliche Spektrallinie auch vom Rand der irdischen Atmosphäre aufgenommen, was dafür spricht, dass zumindest ein Teil des Signals in den Instrumenten selbst entsteht. Der entscheidende Test könnte in den kommenden Jahren mit dem Gammateleskop H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) gelingen, das von Namibia aus die innere Milchstraße im Bereich von 100 GeV bis 1 TeV beobachtet.

Die negativen Ergebnisse von LUX, dem LHC und vielen anderen Experimenten schränken immerhin die Auswahl möglicher Teilchen ein, mit denen sich die Dunkle Materie erklären ließe. Angesichts der vielen vermeintlichen Teilchenfunde, die so schnell für Aufregung sorgen wie sie wie-

der vergessen werden, reagieren die Physiker aber inzwischen mit wachsender Skepsis auf neue Entdeckungsmeldungen. Der ein oder andere Theoretiker stellt bereits die Frage, ob es Dunkle Materie überhaupt gibt. Schon seit den 1980er Jahren werden vereinzelt Ansätze verfolgt, die allgemeine Relativitätstheorie zu modifizieren, um die bislang notwendige Annahme der Dunklen Materie loszuwerden.

Unangenehme Überraschungen jederzeit möglich

Solche radikalen Ideen spielen auch bei der Lösung eines anderen Problems der Astrophysik zunehmend eine Rolle: der Frage nach dem Ursprung der Dunklen Energie. Dieses ebenfalls mysteriöse Phänomen ist für die Beschleunigung der kosmischen Expansion verantwortlich. Die meisten Forscher meinen allerdings, dass wir noch lange nicht nach neuen physikalischen Gesetzen Ausschau halten müssen, zumal immer noch einige experimentelle Wege offen stehen. Doch unangenehme Überraschungen sind jederzeit möglich.

Es gibt zwei Szenarien für den schlimmsten anzunehmenden Fall. Zum einen könnte sich die Dunkle Materie aus vielen verschiedenen Teilchentypen zusammensetzen. Bei den meisten derzeitigen Experimenten geht man davon aus, dass es sich um nur einen Typ handelt. Zum anderen könnten die Teilchen der Dunklen Materie ausschließlich gravitativ wechselwirken. Damit wären sie für alle konventionellen Detektoren praktisch unsichtbar.

Klar ist, dass die bereits existierenden Experimente weiterlaufen sollten. Aber zusätzlich brauchen wir neue Herangehensweisen, wenn wir die Teilchen der Dunklen Materie innerhalb der nächsten zehn Jahre endlich dingfest machen wollen. Beispielsweise könnten wir ein weiteres Experiment zur Messung jahreszeitlicher Schwankungen einsetzen – ähnlich wie DAMA/LIBRA oder CoGeNT, aber diesmal auf der Südhalbkugel. Damit ließe sich das Ausmaß der jahreszeitlichen Effekte klären, die gegenüber den Messungen auf der

Nordhalbkugel phasenverschoben wären. Auch sollte Dunkle Materie, die sich in Form von Klumpen oder Strömen in der Milchstraße bewegt, die Raten beeinflussen, mit denen wir deren Teilchen in den Detektoren registrieren, sowie messbar die Bewegungen der rund einer Milliarde Sterne stören, die der kürzlich gestartete ESA-Satellit Gaia über insgesamt fünf Jahre lang überwachen soll.

Das Fenster für Energien von 100 TeV aufstoßen

Experimente am LHC oder an Beschleunigern der nächsten Generation bringen vielleicht ebenfalls Licht in das Dunkel der Materie. Wenn beispielsweise die aus einer Kollision hervorgehenden Teilchen nicht die gesamte in die Kollision gesteckte Energie tragen, könnte dies auf ein neues, nicht detektiertes Teilchen hinweisen. Darüber hinaus müssen wir die direkte Suche ausweiten und die astrophysikalischen Methoden besser ausschöpfen. Als Erstes sollten wir nach Teilchen mit höheren Massen Ausschau halten, insbesondere nach den vorhergesagten SUSY-Vertretern. Ein direkter Nachweis solcher schwerer Teilchen ist zwar schwierig, weil ihre zu erwartende Anzahl so gering ist. Aber die Gamma-Astronomie könnte helfen. Das internationale Cherenkov Telescope Array (CTA) soll in diesem Jahrzehnt das Fenster für Energien von 100 TeV aufstoßen. Dafür wird eine Anordnung von etwa 100 Teleskopen nach Tscherenkow-Lichtblitzen suchen, ausgelöst von sehr energiereichen kosmischen Gammastrahlen, die auf die Erdatmosphäre prallen. Passenderweise entspricht die Energie von 100 TeV zugleich der oberen Grenze für die Masse von WIMPs, wie sie physikalische Überlegungen nahelegen. Zerfallen die WIMPs oder vernichten sie sich paarweise, würden sie Gammastrahlung im TeV-Bereich erzeugen.

Zweitens sollten wir auch nach anderen Arten von Teilchen suchen. Dunkle Materie ist möglicherweise ähnlich komplex wie gewöhnliche Materie: Sie könnte eine geringe Ladung tragen oder innere Zustände besitzen, ähnlich den Energieniveaus der Elektronen in gewöhnlichen Atomen. Wenn Wolken aus solchen geladenen Teilchen auf die Sonne treffen und durch die Elektronen im Sonnenplasma gestreut würden, käme es dort zu Schwingungen, die sich helioseismologisch nachweisen ließen. Und falls die Teilchen der Dunklen Materie auch nur geringfügig elektromagnetisch wechselwirken, zeigte sich dies an den dunklen Halos entfernter Galaxien: Sie würden sich stärker der Kugelform annähern. Dies wiederum ließe sich nachweisen, indem man die Halos als Gravitationslinsen nutzt, die durch ihre Schwerkraft das Licht noch weiter entfernter Objekte ablenken.

Eine dritte Möglichkeit ist das Axion (siehe SdW 6/2014, S. 36) Vorhergesagt wurde dieses Teilchen, um eine Anomalie in der Quantenchromodynamik, der Theorie für die starke Kraft, zu beheben. Seine elektromagnetische Signatur wird seit Langem in vielen Experimenten gesucht, bislang erfolglos. Der Stringtheorie zufolge könnten ultraleichte Axionen existieren, die etwas »wärmer« wären als kalte Dunkle Materie. Möglicherweise könnte ein Gemisch aus kalter und warmer Dunkler Materie, vielleicht zusätzlich mit Neutrinos an-

gereichert, unter anderem erklären, warum es im Universum weniger Zwerggalaxien gibt, als Modelle vorhersagen, die nur von kalter Dunkler Materie ausgehen.

Astrophysiker sollten darüber hinaus bei alten Sternen, etwa bei Neutronensternen oder Weißen Zwergen, nach auffälligen Signalen suchen. Denn während sich die Sterne durch die Milchstraße bewegen, sammeln sie WIMPs auf. Insbesondere könnten so im Kern eines Neutronensterns genug WIMPs zusammenfinden, dass ein kleines Schwarzes Loch entsteht, welches irgendwann den Stern verschlingt und am Ende eine gewaltige Explosion auslöst. Ein solches Ereignis muss allerdings erst einmal beobachtet werden. Helioseismologisch untersuchen ließe sich auch der Effekt von WIMPs auf das Temperaturprofil der Sonne.

Und schließlich müssen Teilchen- und Astrophysiker besser miteinander kommunizieren, um ihre experimentellen und theoretischen Strategien zu verbessern. Die Zahl der zu prüfenden Teilchenkandidaten für die Dunkle Materie ist beschränkt: Die Untergrenze für ihre Masse wird von unseren experimentellen Möglichkeiten vorgegeben, bei der Obergrenze setzen theoretische Überlegungen ein Limit. Wollen wir bei der Suche erfolgreich sein, müssen wir uns jetzt entscheiden, sie multidisziplinär und in einem Energiebereich zwischen einem und 100 TeV anzugehen. ~

DIE AUTOREN



Mario Livio (links) ist Astrophysiker am Space Telescope Science Institute in Baltimore im US-Bundesstaat Maryland. **Joe Silk** ist Professor am Institut für Astrophysik der Pariser Universität Pierre et Marie Curie und hat auch leitende

Funktionen am Department of Physics and Astronomy der Johns Hopkins University in Baltimore sowie am Beecroft Institute of Particle Astrophysics and Cosmology der britischen University of Oxford inne.

QUELLEN

Akerib, D. S. et al. (LUX Collaboration): First Results from the LUX Dark Matter Experiment at the Sanford Underground Research Facility. In: *Physical Review Letters* 112, 091303, 4. März 2014

Aalseth, C. E. et al. (CoGeNT Collaboration): Search for An Annual Modulation in Three Years of CoGeNT Dark Matter Detector Data. arXiv:1401.3295, 14. 1. 2014

Aguilar, M. et al. (AMS Collaboration): First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV. In: *Physical Review Letters* 110, 141102, 3. April 2013

WEBLINKS

Diesen Artikel, weitere Quellen und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286311

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 507, S. 29–31, 6. März 2014

Deutschlands **F** großes Reisemagazin gegen **Fernweh.**



10 Ausgaben
+ Geschenk
für nur 48,- €

Sparen Sie
über 14%!



MAG-LED™ MINI MAGLITE® 2 AA

Die original Mini Maglite® war Vorbild für diese LED-Version des Design-Klassikers. Sie wird per Drehschalter am Lampenkopf zum Leuchten gebracht und zeigt die ganze Brillanz einer LED-Leuchte. Wird im Handumdrehen zur „Kerze“ durch Abschrauben des Kopfes. Farbe: blau, ca. 14,5 cm lang. Inkl. Batterien und Etui.

Mehr Auswahl auf www.abenteuer-reisen.de/shop

Bitte ausfüllen, ausschneiden oder kopieren und gleich senden an:

abenteuer und reisen AboService, Postfach 1201, 61175 Karben oder per Fax an + 49(0)6187/90 568-29, per E-Mail: aboservice@abenteuer-reisen.de

- Faszinierende Reportagen und grandiose Fotos
- Verlässliche echte Insider-Tipps
- Vor Ort überprüfte Adressen von Hotels und Restaurants
- Individuelle Städte-Touren, Traum-Reiseziele und Outdoor-Action
- Sie erhalten jeweils die kommenden 10 Ausgaben und sparen über 14%
- Weitere Angebote finden Sie unter: www.abenteuer-reisen.de/shop

Ja, ich bestelle 10 Ausgaben abenteuer und reisen und erhalte ein Geschenk gratis dazu.

10 Hefte zum Preis von nur 4,80 € statt 5,60 € pro Ausgabe inkl. Zustellung und MwSt. Ich spare über 14% gegenüber dem Einzelkauf. Das Jahres-Abo verlängert sich automatisch, sofern wir nicht rechtzeitig (6 Wochen vor Ablauf der Bezugszeit) eine anderslautende Mitteilung von Ihnen erhalten. Mein Geschenk kann ich auch dann behalten, wenn ich abenteuer und reisen nicht weiter lesen möchte. Lieferung nur, solange Vorrat reicht. Dieses Angebot ist nur für Deutschland gültig.

Vertrauensgarantie: Die Bestellung kann ich innerhalb von 14 Tagen ohne Begründung beim abenteuer und reisen AboService, Postfach 1201, 61175 Karben, widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Name		Vorname	
Straße		Hausnummer	
PLZ	Ort		
Datum	Unterschrift		

Wer waren die Etrusker?

Lange konnte die Kultur der Etrusker nur anhand ihrer Nekropolen erforscht werden. Grabungen in Heiligtümern und einer Siedlung bestätigen, was Griechen und Römer schon dachten: Die Etrusker waren speziell!

Von Martin Bentz



Die »Chimäre von Arezzo«, ein Mischwesen aus Löwe, Ziege und Schlange, gilt als Meisterwerk der etruskischen Bronzezießer (Ende 5., Anfang 4. Jahrhundert v. Chr.).

Der heiligste Ort der Etrusker war das »Fanum Voltumnae«. Der römische Historiker Livius schilderte die jährlichen Treffen dort, die mit Jahrmärkten, Wettkämpfen und politischen Versammlungen einhergingen. Schon im 14. Jahrhundert spekulierten Gelehrte über Lage und Aussehen, doch bis vor Kurzem wurden Etruskologen nicht fündig. Sie glaubten daher, es sei aus vergänglichen Materialien errichtet worden und deshalb nicht mehr nachweisbar. Simonetta Stopponi, Archäologin der Università degli Studi di Perugia, ließ jedoch nicht locker und hat nun in der Nähe der heutigen Stadt Orvieto einen geeigneten Kandidaten entdeckt. Bislang wurden eine Prozessionsstraße, vier Kultbauten, Altäre und große Mengen an Weihegeschenken freigelegt. Die etruskische Kultur bietet offenbar noch so manche Überraschung.

Die Etrusker selbst nannten sich »Rasna« beziehungsweise »Rasenna«. Als »Tyrrhenoi« wurden sie von den Griechen, als »Tusci« beziehungsweise »Etrusci« von den Römern bezeichnet. Sie prägten Italien vom 8. bis zum 1. Jahrhundert v. Chr., also bis sie im Römischen Reich aufgingen. Ihr Kernland umfasste die heutige Toskana sowie den nördlichen Teil Latiums und den Westen Umbriens (siehe Karte S. 72 links). Im Westen bildete das Tyrrhenische Meer eine natürliche Grenze, im Süden und Osten floss der Tiber, im Norden der Arno, wo sich auch der Apennin erhob. Benachbart lebten etliche italische Völker: Im Süden die Latiner, Sabiner und Falisker, im Osten Umbrier und Picener, im Norden Ligurer und Veneter. Zur Zeit ihrer größten Macht und Blüte im 6. Jahrhundert erweiterten die Etrusker ihren Einflussbereich bis in die Poebene und Kampanien. Das sicherte einerseits den Handel mit den Kelten im Norden und den freien Zugang zu den Adriaahäfen, ermöglichte andererseits direkten Kontakt mit den griechischen Koloniestädten Süditaliens. Darüber hinaus gab es etruskische Präsenzen auf Korsika, in Südfrankreich und Nordafrika.

Die Städte im Norden – wie etwa Volterra oder Chiusi – waren eher dem Binnenland zugewandt und lagen zumeist auf der Spitze steiler Hügel, während die großen Städte des Südens – zum Beispiel Vulci, Tarquinia und Caere – Seehandel betrieben und auf von tiefen Flusstälern begrenzten Hochplateaus lagen. Bis auf Populonia lag keine einzige Stadt unmittelbar an der Küste; sie unterhielten daher eigene Hafenstädte.

Dieses Volk bildete keine einheitliche Nation, sondern organisierte sich in unabhängigen Stadtstaaten, die aber einen losen »Zwölfstädtebund« bildeten. Das Verbindende waren vor allem die gemeinsame Sprache und die Religion. Geleitet wurde der Bund von einem Beamten oder Priester, der vermutlich »zilath mechl rasnal« hieß, was dem in römischen Quellen genannten »praetor Etruriae« entspricht. Einmal im Jahr versammelte man sich im erwähnten »Fanum Voltumnae«. In den Stadtstaaten herrschte zunächst ein monarchisches System mit Königen beziehungsweise »Lucumones« an der Spitze. Gegen Ende des 6. Jahrhunderts kam eine oligarchisch-republikanische Regierungsform auf, bei der die wichtigen religiösen und politischen Ämter im Wechsel von

Mitgliedern der bedeutenden Familien, den »gentes«, ausgeübt wurden.

Mag dieses System der gesellschaftlichen Organisation in vielem auch den griechischen »poleis« ähneln, mutmaßte der griechische Historiker Herodot im 5. Jahrhundert dennoch, die Etrusker stammten aus Lydien in Kleinasien, wo eine Hungersnot sie zur Auswanderung trieb. Ihrem Anführer Tyrrhenos verdanke sich die griechische Bezeichnung »Tyrrhenoi«. Dionysios von Halikarnassos, der um die Zeitenwende lebte, sah in ihnen zwar ein uritalisches Volk, andere antike Autoren verorteten ihre Abstammung aber nördlich der Alpen. Einig waren sich dennoch alle darin, dass die Etrusker hinsichtlich Sprache und Religion anders seien als ihre Nachbarn.

Viele Wurzeln der etruskischen Kultur

Aus heutiger Sicht enthalten diese drei Theorien zur Herkunft alle ein wenig Wahrheit, doch keine von ihnen kann allein Gültigkeit beanspruchen. Die archäologischen Zeugnisse legen vielmehr einen Jahrhunderte dauernden Prozess nahe, in dem sich verschiedene Einflüsse vermischten, bis etwa ab 700 v. Chr. die Merkmale der etruskischen Kultur ausgebildet waren. Massimo Pallottino von der Università degli Studi di Roma »La Sapienza« hat dieses Modell maßgeblich geprägt. Er verwies auf die kontinuierliche Besiedlung vieler Orte von der Bronzezeit des 2. Jahrtausends v. Chr. über die früheisenzeitliche Villanovakultur bis zu den Städten des Zwölferbunds. Dies bestätigt die These des uritalischen Volks. Dem stehen jedoch Einflüsse von außen entgegen, wie etwa die Einführung der Brandbestattung in der späten Bronzezeit aus dem nordalpinen Raum oder importierte Waren und handwerkliche Traditionen aus griechischen und vorderasiatischen Regionen.

Neuerdings unterfüttern die Anhänger der verschiedenen Theorien ihre Modelle mit naturwissenschaftlichen Daten. So ergaben DNA-Vergleiche 2007 eine genetische Verwandtschaft zahlreicher Bewohner des toskanischen Dorfs Murlo, das die Etrusker im 7. Jahrhundert v. Chr. gegründet hatten,

AUF EINEN BLICK

IM- UND EXPORT VON IDEEN

1 Anhand von Inschriften und ersten Siedlungsbefunden rekonstruieren Forscher die Struktur und das Alltagsleben der etruskischen Gesellschaft. So hatte sich offenbar im 6. Jahrhundert v. Chr. eine **Elite** etabliert, die in den Stadtstaaten das Sagen hatte.

2 Aktuelle Siedlungsfunde bestätigen griechische und römische Überlieferungen, dass sich die **etruskische Kultur** in vielerlei Hinsicht von der ihrer Nachbarn unterschied. Beispielsweise fand wohl das **öffentliche Leben auf den Straßen**, nicht auf einem zentralen Marktplatz statt.

3 Die Etrusker hatten zahlreiche Elemente ihrer Kultur insbesondere von Griechen und Römern übernommen. Doch es gab auch einen **Ideenexport**: Das typisch römische **Atriumhaus** ging sehr wahrscheinlich auf etruskische Vorbilder zurück.



In ihrer Blütezeit (8. – 5. Jahrhundert v. Chr.) waren die Etrusker Hauptakteure des internationalen Handels. Der vernetzte vor allem die Kulturen des Mittelmeerraums, schloss aber ebenso die keltischen Gruppen Mitteleuropas mit ein. In dieser Zeit beherrschten die Etrusker auch Teile Norditaliens und Korsikas.

mit Menschen des Nahen Ostens. 2013 verwies eine Gruppe italienischer Genetiker um Silvia Ghirotto von der Università degli Studi di Ferrara die damit untermauerte Migration aber anhand von 150 Genproben aus Anatolien in eine Zeit vor 5000 Jahren. Gleichzeitig ermittelten sie durch Vergleich von 30 etruskischen DNA-Proben mit 27 aus dem Mittelalter und 370 aus der Gegenwart eine genetische Kontinuität zwischen den antiken Bewohnern der Toskana und einem kleinen Teil der heutigen Bevölkerung.

Die Etrusker hätten sich laut Ghirotto demnach doch lokal entwickelt. Eine enge, auf Zuwanderung hindeutende Beziehung bestehe allerdings zu mitteleuropäischen, insbesondere süddeutschen Bevölkerungsgruppen. Mögen die Naturwissenschaften auch solide Zahlenwerke und Statistiken liefern – offenbar geben sie nicht automatisch die historische Wirklichkeit wieder, sondern müssen im Kontext archäologischer Befunde gedeutet werden.

Weihinschriften für die Götter

Im Jahr 1964 entdeckten Archäologen aus Rom im etruskischen Heiligtum von Pyrgi, der Hafenstadt der Metropole Caere, drei dünne, mit Inschriften versehene Goldblättchen, die vermutlich an die hölzernen Türen oder Säulen des Tempels angenagelt worden waren. Zwei davon waren in etruskischer Sprache beschriftet, das dritte in phönizischer. Vor allem aber konnten die Forscher zeigen, dass der phönizische Text einem der etruskischen entsprach. Es war eine Weihinschrift des Herrschers von Caere, welcher der Göttin Uni einen Tempel und eine Statue gestiftet hatte. Zwar war der Text zu kurz, um als »Stein von Rosette« bei der Erforschung der etruskischen Sprache zu dienen, sie gab jedoch wichtige Impulse. So ließen

sich zahlreiche Wortbedeutungen klären, zudem war sie ein guter Beleg für die engen Beziehungen zwischen den Etruskern und den Phöniziern, die mit Karthago eine wichtige Kolonie im westlichen Mittelmeer gegründet hatten.

Inzwischen ist das Etruskische aus mehreren Tausend Inschriften vom späten 8. bis zum 1. Jahrhundert v. Chr. bekannt. Da sie in einem abgewandelten griechischen Alphabet verfasst wurden, lassen sie sich lesen, die meisten auch verstehen. Ein Großteil stammt von Grabmälern und nennt die Namen der Verstorbenen, ihrer Väter und Mütter, Herkunft und Alter. Eine weitere große Gruppe bilden Weihinschriften wie die erwähnten Goldblättchen, die ein Objekt als Besitz eines Gottes auswiesen. Zudem erklärten sie, wer welchem Gott etwas für wen oder welchen Zweck geweiht hatte. Verständnisschwierigkeiten bereiten vor allem die wenigen längeren Texte, in denen sich Worte und Formen finden, die nirgends sonst vorkommen und die sich daher mangels Vergleichsmöglichkeit schwer deuten lassen.

Meist ist der Kontext klar: Es handelt sich entweder um Ritualvorschriften, Festkalender oder Verträge. Berühmte Beispiele sind die »Mumienbinde von Zagreb« mit ihren etwa 1200 Wörtern, in der Regularien für Opferfeste in einer unbekanntem Stadt festgehalten sind, oder die bronzene »Tabula Cortonensis«, die in etwa 200 Worten die Bedingungen eines Landverkaufs dokumentiert. Eine etruskische Literatur oder Geschichtsschreibung gab es aber offenbar nicht. Religiöse Texte hingegen existierten reichlich, doch sie sind nur durch später entstandene römischen Berichte bekannt.

Auffällig ist, dass Etruskisch nicht zur indogermanischen Sprachfamilie gehörte, was erneut die Frage nach der Herkunft dieser Kultur aufwirft. Kritische Sprachvergleiche von

Linguisten, zeigen, dass scheinbare Verwandtschaften zu Sprachen der italischen Nachbarvölker oder dem Griechischen lediglich Lehnwörter betreffen, nicht aber die Struktur.

Dass ein Ideen- und damit einhergehend Wortimport möglich war, bezeugen Ausgrabungen der Università degli Studi di Perugia in Gravisca, der Hafenstadt von Tarquinia. Sie brachten Produkte zu Tage, die aus Phönizien, Ägypten, Ostgriechenland, Sparta, Korinth und Athen stammten. Ein Steinanker, der laut Inschrift einem gewissen Sostratos von der Insel Ägina vor Athen gehörte, sowie Weihschriften im Hafengebiet belegen die Präsenz von Griechen.

Bodenschätze brachten Wohlstand

Demnach hatten die Etrusker großen Anteil an der vernetzten Welt des Mittelmeerraum im 7. und 6. Jahrhundert v. Chr. Zusammen mit Phöniziern und Griechen betrieben sie, wie auch zahlreiche Darstellungen beweisen, einen intensiven Fernhandel zur See, der nicht nur Waren, sondern auch Ideen von einem Land zum anderen beförderte. Etrurien war mit seinen reichen Bodenschätzen, vor allem Eisenerz, ein begehrter Handelspartner. Funde und Inschriften belegen die Präsenz und Assimilierung von ausgewanderten Griechen

und Phöniziern in etruskischen Städten. Umgekehrt dokumentierten etruskische Eliten ihren daraus resultierenden Wohlstand durch den Import von Luxusprodukten.

Wie weit dieses Handelsnetz reichte, zeigen von der Ostsee stammender Bernstein, Grabmalereien mit dem am Nil hergestellten Ägyptisch-Blau, Edelmetallgefäße und Elfenbeinschnitzereien von der Levante. Einheimische Werkstätten imitierten häufig solche teuren Waren, und wegen der großen Nachfrage wanderten ausländische Handwerker in Etrurien ein. Ein gutes Beispiel, wie im Zuge des Handels eine gesellschaftliche Sitte übernommen wurde, ist das Essen und Trinken bei festlichen Anlässen nicht im Sitzen, sondern im Liegen. Es verbreitete sich aus Griechenland kommend im 6. Jahrhundert v. Chr. schnell unter Aristokraten, wie entsprechende Grabfunde und -bilder bezeugen. Der Züricher Archäologe Christoph Reusser wies zudem vor zehn Jahren nach, dass die griechische Keramik als Zeichen hellenischer Kultur und Sitten Einzug hielt, jedoch nicht auf die Oberschicht beschränkt, sondern auch bei einfachen Menschen und das in allen Teilen Etruriens.

Die Forscher interpretierten diese Beziehungen bis vor wenigen Jahren als Phänomen reiner »Akkulturation«, also der Übernahme von Kulturelementen einer höherstehenden Gesellschaft durch eine einfachere. Heutzutage spricht man neutraler von Kulturkontakten und deren Auswirkungen auf lokale Identitäten. Denn eigene Traditionen wurden offenbar nicht unbedingt zu Gunsten der importierten aufgegeben, wie man beispielsweise bei der Bekleidung sieht. Zudem wurden verschiedene Elemente kreativ miteinander verarbeitet, was Stilanalysen etruskischer Keramik zeigen.

Wie in vielen Bereichen der Altertumsforschung zählen das Alltagsleben und damit zusammenhängende gesellschaftliche Fragen zu den weißen Flecken der Etruskologie. Denn die



Ein nach oben offener Raum im Zentrum, das Atrium, darum herum weitere Zimmer des Hauses – dergleichen kannten Archäologen vor allem aus römischen Städten wie Pompeji. Wie die Rekonstruktion zeigt, gab es das Atriumshaus aber schon im älteren etruskischen Kainua.

Städte und Dörfer Etruriens wurden häufig in römischer Zeit, im Mittelalter oder der Neuzeit überbaut, so dass sie sich heute nur schwer erforschen lassen. Im Zusammenhang können Archäologen vor allem die Nekropolen ausgraben, die außerhalb angelegt worden waren. Es gibt nur eine etruskische Stadt, deren gesamte Struktur sie in den letzten zehn Jahre erforscht haben – das beim heutigen Bologna gelegene Marzabotto, das etruskische Kainua.

Die auf einem flachen Plateau liegende, von einem Wall geschützte Stadt wurde Mitte des 6. Jahrhunderts mit einem rechtwinkligen Straßensystem angelegt und im Lauf der Zeit nur innerhalb dieses Rasters umgestaltet. Die rationale Vorgehensweise ist vermutlich stark von griechischen Koloniestädten in Süditalien beeinflusst. Nach nur 150 Jahren Blüte wurde Kainua im Zuge der Kelteneinfälle wieder verlassen.

Tempelsäulen aus Holz

Im Norden lagen offenbar die sakralen Bereiche: Insbesondere überragten fünf Tempel und Altarbezirke von der Akropolis aus die Stadt. Vor wenigen Jahren kamen zudem bei Bauarbeiten in einem Gebiet, das außerhalb der antiken Stadtbefestigung lag, dutzende profilierte Steinbasen ans Licht. Sie gehörten wohl zu einem Quellheiligtum, in dem Nymphen verehrt wurden. Eine unbeschädigte 30 Zentimeter große Statuette einer vornehm gewandeten etruskischen Frau wurde dort den Göttinnen geweiht. Sie hielt eine Blüte in der Hand, ein bekanntes Fruchtbarkeitssymbol. Ein Team um den Archäologen Giuseppe Sassatelli von der Università di Bologna hat inzwischen obendrein den zentralen städtischen Tempel freigelegt, der dem obersten Gott Tinia geweiht war. Es handelt sich um einen Ringhallentempel mit Säulenreihen auf allen vier Seiten, auch das ein von den Griechen übernommenes Konzept. Die Säulen standen aber nicht, wie in Griechenland üblich, auf einer breiten, soliden Fundamentreihe, sondern besaßen einzelne runde Fundamente aus Flusskiesel. Auf diesen standen die Holzsäulen, welche das Gebälk und ein Dach aus großen, teilweise bemalten Tonziegeln trugen.

Die wirtschaftlichen Grundlagen der Stadt bildeten Handel und Handwerk, weniger die Landwirtschaft, die im engen Flusstal nicht extensiv betrieben werden konnte. Ein eigenes Handwerkerviertel, wie in antiken Städten üblich, hatte Kainua zwar nicht, doch sind Spuren einer florierenden Keramik- und Bronzeherstellung über das ganze Stadtgebiet verteilt und finden sich zumeist in den Wohnhäusern. Was nach wie vor fehlt, ist ein Marktplatz, wie er zur Grundausstattung jeder griechischen und römischen Stadt gehörte. Weil dergleichen noch in keiner etruskischen Siedlung zu Tage kam, wurde schon vermutet: Dort fungierten Wege als öffentlicher Raum. Dazu passt, dass die Hauptstraßen in Kainua mit 15 Meter überdurchschnittlich breit sind.

Neue Ausgrabungen in den Wohnbereichen durch den Autor und Christoph Reusser von der Universität Zürich zeigen eine Übernahme kultureller Elemente auch in der Gegenrichtung. Denn in Kainua konnten sie einen Haustypus

nachweisen, der 100 bis 150 Jahre später in römischen Siedlungen wieder auftrat: das Atriumhaus, wie man es aus Rom, insbesondere aber aus Pompeji kennt, und das als römisches Haus schlechthin gilt. Charakteristisch ist die strenge Symmetrie mit einer zentralen Halle, dem »Atrium«, und direkt daran anstoßend der »Tablinum« genannte Raum. Er lag in der Blickachse des Atriums und diente ebenso wie dieses dem Empfang von Besuchern. In seitlich gelegenen Flügellären, den »Alae«, wurden zudem die Ahnenporträts ausgestellt. Offenbar hatten die Etrusker diesen Haustypus vorgezogen.

Die etruskischen Exemplare belegten etwa doppelt so viel Fläche wie die übrigen Häuser Kainuas. Zudem lagen sie alle an der Hauptstraße in der Nähe des großen Tempels. Darin wohnten also Angehörige der Elite, die solche Räume und Raumfolgen benötigten, um Gefolgsleute zu empfangen, Geschäften nachzugehen und die Bedeutung ihrer Familie herauszustellen. Diese Funktion von Privathäusern kannten die Griechen nicht, die ihre öffentlichen Angelegenheiten auf dem Markt beziehungsweise in öffentlichen Gebäuden erledigten. Die Annahme liegt nahe, dass dies ein Wesenszug etruskischer Kultur war, den die Römer mitsamt dem zugehörigen materiellen Niederschlag später »importierten«.

Wie in Kainua helfen neue Siedlungsbefunde, das Alltagsleben der Etrusker zu verstehen. Ausgrabungen von Heiligtümern bestätigen, was griechische und römische Autoren von ihnen sagten: Religion spielte in ihrem Leben eine zentrale Rolle; Tempel bildeten daher wichtige öffentliche Räume in den Städten. Von überregionaler Bedeutung freilich war das »Fanum Voltumnae«, das eingangs erwähnte Bundesheiligtum der Etrusker, an dem sich die Vertreter der Stadtstaaten jährlich trafen. Dieser Ort besaß eine ähnliche Bedeutung wie Delphi oder Olympia für die Griechen. Obwohl die meisten etruskischen Heiligtümer in römischer Zeit aufgegeben wurden, konnte Simonetta Stopponi hier eine kultische Nutzung bis in die Spätantike nachweisen. Sogar eine christliche Kirche wurde später auf einem der alten Tempel errichtet. ~

DER AUTOR



Martin Bentz, Archäologe an der Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, ist Spezialist für die etruskische und griechische Kultur und deren Wechselbeziehungen. Zu diesem Themenbereich hat er mehrere Ausgrabungen durchgeführt sowie Ausstellungen und Tagungen organisiert.

QUELLEN

Bentz, M., Reusser, C.: Marzabotto. Planstadt der Etrusker. Philipp von Zabern, Mainz 2008
Camporeale, G.: Die Etrusker, Geschichte und Kultur. Artemis und Winkler, Düsseldorf 2003

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286312



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 noch 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 redaktionelle 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

Sehen, riechen, orientieren

Prägt die Lebensumwelt unsere Sprache oder diese unsere Umweltwahrnehmung? An der Frage scheiden sich die Geister. Die Sprachen von Jäger-und-Sammler-Gruppen könnten diesen alten Streit bald entscheiden.

Von Thomas Widlok und Niclas Burenhult

Rund 100 Wörter für Schnee sollen die Bewohner der Arktis kennen, verriet Peter Høeg 1992 in seinem Roman »Fräulein Smillas Gespür für Schnee«. Und immerhin 20 Begriffe für die Farbe Grün verwenden Brasiliens Indianer, so der Auswandererfilm »Die andere Heimat« (2013) des deutschen Regisseurs Edgar Reitz. Diesen Zuschreibungen haftet nicht nur etwas Geheimnisvolles an, das sie attraktiv macht, sie greifen auch auf eine Diskussion zurück, die Sprachforscher und Anthropologen seit dem 19. Jahrhundert umtreibt: Begründen solche Beispiele einen erkenntnistheoretischen Relativismus, demzufolge Menschen unterschiedlicher Sprachen und Kulturen auch in verschiedenen Welten lebten? Vertreter dieser These – unter anderen Wilhelm und Alexander von Humboldt – widersprachen damit der universalistischen Annahme, nach der die Kategorien der abendländischen Sprachen verallgemeinerbar seien

und das Denken, Sprechen und Handeln des Menschen an sich ausdrücken.

Im 20. Jahrhundert erreichte die Fachdebatte auch die breite Öffentlichkeit. Als Vertreter des kulturellen Relativismus traten die amerikanischen Linguisten Benjamin Whorf und Edward Sapir in den Ring. Sie postulierten, Sprache beeinflusse die Wahrnehmung der jeweiligen Umwelt. Die Gegenposition vertrat prominent Noam Chomsky, inzwischen Emeritus des Massachusetts Institute of Technology. Er betonte die Universalität angeborener Strukturen, die in allen Sprachen wirksam seien. Der Leidenschaft der öffentlich geführten Diskussion zum Trotz war die empirische Datenbasis aber zu klein, um solide Argumente zu liefern.

Inzwischen herrschen beinahe umgekehrte Verhältnisse: Wir wissen sehr viel über die Sprache und das Denken der Bewohner auch entlegener Gebiete, doch die Diskussion um Universalien unserer kognitiven und kulturellen Ausstattung wird oft auf die Genetik und Neurowissenschaft reduziert. Das ist auch insofern bedauerlich, als die Mythen der Anfangszeit noch immer in den Köpfen spuken.

So basiert »Die Eskimo haben 100 Wörter für Schnee« vermutlich auf einem Aufsatz des deutschen Arktisforschers und Völkerkundlers Franz Boas, der 1896 in die USA auswanderte und dort eine Generation von Kulturanthropologen prägte. Boas wies 1911 eher beiläufig darauf hin, dass sich in den indianischen Sprachen Nordamerikas oft andere Strategien zur Abbildung der Umwelt finden als im Englischen. Beispielsweise gehen englischsprachige Begriffe für Wasserflächen von unterschiedlichen Wortstämmen aus wie »river«, »lake«, »stream«, »sea« (Fluss, See, Bach und Meer), während manche Sprachen indigener Gruppen sie aus einer einzigen Wurzel entwickeln. Andererseits leiteten die Bewohner der Arktis (meist Inuit oder Eskimo genannt), ihre Begriffe für auf Schnee bezogene Phänomene aus ganz unterschiedlichen Wortstämmen ab. In europäischen Sprachen werden sie dagegen meist aus einem einzigen Wortstamm gebildet wie die deutschen Begriffe »Schneefall«, »Schneewehe« und »eingeschneit«. Ohne dies explizit zu sagen, verwies Boas damit auch auf eine grundlegende Gemeinsamkeit von Sprachen: Sie bilden Wissensbereiche nicht streng nach ei-



DIE SERIE IM ÜBERBLICK

WELT DER SPRACHE

- | | | |
|---------------|---|------------------|
| Teil 1 | ▶ Ende der Exklusivität
<i>Ina Bornkessel-Schlesewsky
und Matthias Schlesewsky</i>
Sprachenvielfalt als natürliches Experiment
<i>Nikolaus P. Himmelmann</i> | Mai 2014 |
| Teil 2 | ▶ Sprachenvielfalt der Anden
<i>Paul Heggarty</i> | Juni 2014 |
| Teil 3 | ▶ Sehen, riechen, orientieren
Thomas Widlok und Niclas Burenhult | Juli 2014 |
| Teil 4 | ▶ Neolithisierung und die
Ausbreitung der Sprachen
<i>Paul Heggarty</i> | August 2014 |
| Teil 5 | ▶ Pfeifsprachen
<i>Jan Dönges</i> | September 2014 |
| Teil 6 | ▶ Die Entstehung
der kreolischen Sprache
<i>Jürgen Lang</i> | Oktober 2014 |

nem einzigen Muster, sondern flexibel auf ein Vokabular ab. Über Whorf und einige amerikanische Unterrichtswerke entwickelte sich aus Boas' Bemerkung aber im Lauf eines knappen Jahrhunderts der genannte Mythos.

Dass Linguisten und auch die Inuit selbst erst am Ende des 20. Jahrhunderts Widerspruch erhoben – 1991 erschien dazu »The Great Eskimo Vocabulary Hoax« von Geoffrey Pullum – hat nicht zuletzt damit zu tun, dass dieses Klischee auf sehr vielen falschen Prämissen beruht. So ist es schon ein Fehler, von einer einzigen Inuit-Sprache auszugehen – es gibt eine ganze Reihe Idiome unter den indigenen Arktisbewohnern. Übrigens ist auch der übliche »Vergleichsstandard« Englisch in dieser Hinsicht problematisch: Gehört etwa die Fachsprache der Meteorologen zum gleichen Englisch wie das Patwa Kreol der Jamaikaner, das Pidgin-Englisch in Neuguinea oder der Grundwortschatz eines in die USA immigrierten Lateinamerikaners? Sprachen sind keine sauber abgrenzbaren Einheiten, denen jeweils eine einzige Population und Kultur entspricht!

Naive Annahmen, unklare Definitionen

Ebenso schwierig ist die im Schneemythos stillschweigend vorausgesetzte Zählbarkeit von Wörtern. Viele Sprachen, auch die der verschiedenen Inuit-Gruppen, kreieren durch kleine Anhängsel aus einem Wortstamm eine Vielzahl von Begriffen, die in Wörterbüchern aber meist unter nur einem Eintrag gefasst werden. Die Aussage, eine Sprache habe in einem Bereich mehr Wörter als eine andere, beruht aber auf der naiven Annahme einheitlicher Zählbarkeit. Zu klären wäre auch, was denn überhaupt zum Phänomen »Schnee«

AUF EINEN BLICK

WIE »SINNLICH« IST SPRACHE?

1 Seit dem 19. Jahrhundert diskutieren Forscher über den **Einfluss der Umweltbedingungen** auf Wahrnehmung und Sprache. Gibt es angeborene Strukturen, die in allen Sprachen sichtbar werden?

2 Einschlägige Studien krankten aus heutiger Sicht oft daran, dass die Teilnehmer meist einer westlichen Bildungselite angehörten, die **Ergebnisse daher schwer verallgemeinerbar** sind.

3 Ethnologisch arbeitende Linguisten liefern neue Daten. So bilden **Jäger-und-Sammler-Gruppen** wie die Aborigines oder die Jahai Malaysias ihre Umwelt auf oft überraschende Weise in Sprache ab. Das betrifft nicht nur die Sinneswahrnehmungen, sondern auch Orientierungsangaben.

gehört. Ist die herabfallende Flocke eine Form davon? Falls ja, wie unterscheidet man davon methodisch sauber herabfallende Flocken aus anderen Materialien wie Ruß?

Nach heutigem Kenntnisstand verfügen tatsächlich relativ viele Inuit-Sprachen über vergleichsweise viele Bezeichnungen für Schneephänomene – allerdings in der Größenordnung von wenigen Dutzenden. Das darf bei Arktisbewohnern freilich ebenso wenig überraschen wie das Vermögen von Menschen des Regenwaldes, etliche Grünfarben zu differenzieren. Wichtiger als Sprachrekorde sind Fragen wie: Welche Strategien zur Unterscheidung von Sinneserfahrungen haben Sprachen? Und: Wie wirkt sich diese Wortvielfalt auf die Umweltwahrnehmung aus? Das wissenschaftliche Interesse an fremden Kulturen gilt heutzutage einer Neuformulierung des kulturellen Relativismus: Beruht das, was uns na-

»Gehe entlang der Mutter des Wassers, dann unter dem Rücken des Waldes hindurch und schließlich folge dem Brustkorb der Erde«, so könnte eine Wegbeschreibung in der Sprache der malaysischen Jahai lauten. In unsere Sprache übertragen: »Folge dem Fluss, durchquere den Wald und dann geh hangaufwärts.« Jäger-und-Sammler-Gruppen haben oft andere Spachsyste-me entwickelt, um in ihrer Umgebung zu navigieren.



NICLAS BURKHUT

türlich erscheint, lediglich auf einer kulturellen Konvention darüber, wie die Welt zu verstehen ist? Viele als gesichert geglaubte Universalien kommen zurzeit erneut auf den Prüfstand, denn Psychologen und Kognitionswissenschaftler zweifeln an der Verallgemeinerbarkeit der bisherigen experimentellen Studien.

»Western, educated, industrial, rich and democratic«, kurz »weird« lautet das Schlagwort, das diese Zweifel zusammenfasst. In einem Großteil der Versuche waren die Probanden nämlich Psychologiestudenten europäischer und nordamerikanischer Universitäten. Der Evolutionswissenschaftler Joseph Henrich und seine Kollegen von der University of British Columbia demonstrierten 2010 das Problem in der Zeitschrift »Behavioral and Brain Sciences« durch kulturvergleichende Studien. Selbst bei einem Klassiker experimenteller Wahrnehmungspsychologie, der Müller-Lyer-Illusion, offenbarten sie Probleme: Betrachtet man zwei gleich lange, parallele Linien, die an ihren Ende Pfeilspitzen tragen, so wirkt – das galt als unstrittig, obgleich bislang nicht erklärbar – jene Linie länger, auf die diese Spitzen zuweisen. Doch nur solche Probanden lassen sich irritieren, in deren Lebensalltag überhaupt gerade Linien vorkommen. Für die San-»Buschleute« besteht diese Illusion nicht, für viele andere Gruppen über die ganze Welt verteilt ist der Effekt nur minimal. Die einzige Gruppe, die sich signifikant von allen anderen in ihrer Wahrnehmung einer »Illusion« unterscheidet, war die der besagten westlichen Psychologiestudenten.

Daher wächst das Interesse bei Kognitionsforschern, das gesamte Spektrum der menschlichen Gesellschaften auszuschöpfen, die eigenen wissenschaftlichen »Illusionen« aufzuspüren und noch vorhandene Wissenslücken zu schließen. Insbesondere der Dokumentation kleiner Gruppen, die sich durch Jagen, Sammeln und Fischen ernähren, kommt dabei große Bedeutung zu, denn solche aus unserer Sicht extremen Lebensumstände sollten sich nicht nur in der Kultur widerspiegeln, sondern auch in Sprache und Kognition.

Systematische Vergleiche in den 1960er Jahren widmeten sich der Klassifizierung und Wahrnehmung von Farben, nicht zuletzt der Praktikabilität wegen: Mit buntem Papier oder Plastik steht an jedem Ort der Erde ein universaler Stimulus für eine weltweite Datenerhebung zur Verfügung. Unter anderem suchten die Forscher nach »basalen« Begriffen, die wie »rot« oder »grün« aus einem Wortstamm bestehen.

Ausgeschlossen sind abgeleitete Wörter wie »bläulich«, Zusammensetzungen wie »zitronenfarbig« oder spezifische Farbnamen wie »blond«, die nur in wenigen Bereichen – hier Haare und Biere – verwendet werden.

Die Studien fanden sehr große Unterschiede, wie Sprachen das Farbspektrum auf Worte abbilden. Sie zeigten aber auch, dass diese Diversität in beschreibbaren Grenzen bleibt, die man »Wenn-dann-Universalien« oder »Universalien der Implikation« nennen könnte. Gibt es beispielsweise ein Wort für »blau«, kennt die betreffende Sprache auch ein Wort für »grün« – aber nicht umgekehrt. Es lassen sich sogar Voraussagen treffen: Benennt eine Sprache bereits die vier Farben »schwarz«, »weiß«, »rot« und »grün« mit basalen Wörtern, dann kommt als weiteres Farbwort »blau« und nicht irgendeine andere Farbe hinzu. Auf der anderen Seite existiert innerhalb einer Sprache offenbar sehr viel mehr Verschiedenheit, als gemeinhin angenommen. Insbesondere »nicht basale« Begriffe – im Deutschen etwa »türkis« oder »violett« – können keineswegs alle Sprecher mühelos identifizieren.

Eine Farbe ist eine Farbe, ein Geruch ein Geruch?

Erschwerend für ein grundlegendes Verständnis ist zudem die Naivität der naturwissenschaftlichen Sichtweise, die bisweilen davon ausgeht, dass Unterteilungen des Farbspektrums natürliche Kategorien seien, die sich unweigerlich im sprachlichen Bereich abbilden müssten. Dem ist nicht so, wie die Anthropologin Diana Young bei Feldstudien in Australien feststellte. In der Sprache der Pitjantjatjara gibt es ein Wort, das bislang mit »grün« übersetzt wurde, tatsächlich bedeutet es jedoch »etwas, das heraussticht«. Damit bezeichnen die Sprecher zwar auch frisch gesprossenes Gras, doch dessen Grün interessiert nur, insofern es vor dem rot-braunen Hintergrund der ansonsten verdorrten Landschaft hervortritt. Die Pitjantjatjara zirkeln den Bereich »Farbe« also anders ab, als wir es aus indoeuropäischen Sprachen kennen. Offenbar genügt es nicht, sich einzelne Wörter anzuschauen, nicht einmal das gesamte Vokabular reicht aus. Es kommt vielmehr darauf an, wie Worte in Mustern organisiert, grammatikalisiert und in der alltäglichen Kommunikation verwendet werden.

Inzwischen untersuchen Forscher weitere Bereiche der Wahrnehmung, darunter auch das Riechen. Lange gingen sie davon aus, dass der Geruchssinn für uns Menschen eine geringere Rolle spielt als das Sehen. Auf die Sprache bezogen würden wir daher erwarten, dass es überall ein weit umfangreicheres Vokabular für das Schauen gibt als für das Riechen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft, 6/2014, S. 68). Asifa Majid von der Radboud-Universität in Nimwegen und einer der Autoren (Burenhult) erforschen einen Fall, bei dem diese Erwartung nicht zutrifft: die Jahai, eine Gruppe von mobilen Jägern und Sammlern in den von Regenwald bedeckten Bergen Malaysias. Die Jahai kennen etwa ein Dutzend Geruchsbezeichnungen, die sie als abstrakte Begriffe für sehr unterschiedliche Gerüche gebrauchen. Anders als im Deutschen

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



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



[www.spektrum.de/
thema/sprache/832281](http://www.spektrum.de/thema/sprache/832281)



Der Jahai Cheneleg Pilyo erklärt den Geruch des Fackelngewers (*Etilingera elatior*), einer wohlriechenden Pflanze, die in den bergigen Regenwäldern Malaysias wild wächst.

oder Englischen enthalten diese keine Wertung wie »stinkend« oder umschreiben einen Geruch durch Angabe einer Quelle in der Art von »wie Schokolade«. Vielmehr entsprechen ihre Geruchsworte abstrakten Kategorien, wie Farben sie in anderen Sprachen bilden. So kann im Deutschen »weiß« eine gemeinsame Eigenschaft von Milch, Maiglöckchen und Kalkverputz sein. In gleicher Weise verwenden die Jahai ein und dasselbe Wort für eine gemeinsame Geruchsqualität unterschiedlicher Quellen, von bestimmten Pilzen über abgestandenes Essen bis hin zu Schuhcreme. Eine andere Kategorie beschreibt die Wahrnehmung der Nase bei Fisch, rohem Fleisch, Blut, Ei und Gegenständen aus Eisen. Experimente bestätigen, dass die Jahai diese Begriffe so genau und regelmäßig verwenden wie ein Europäer Farbkategorien.

Warum aber schenkt dieses Volk Gerüchen so viel Aufmerksamkeit? Eine zu testende Hypothese wäre, ob dies mit alltäglichen Aufgaben zusammenhängt wie dem Aufspüren von Beute und nützlichen Pflanzen oder dem Schutz vor Vergiftungen durch verdorbene Nahrungsmittel. Eines der Jahai-Wörter identifiziert einen Geruch, der Tiger und Leoparden anziehen soll. Sie schreiben ihn verschiedenen Nagetieren zu, zerquetschten Kopfläusen und altem Regenwasser in hohlen Bambusstämmen. In diesem Fall könnte also der Schutz vor Raubtieren die Motivation sein.

Gerüche tragen zudem religiöse Bedeutung, denn nach dem Glauben der Jahai erfolgt die Kommunikation mit den übernatürlichen Kräften weit gehend über das Riechen. Gottheiten fällen zum Beispiel ihr Urteil über einen Stammesangehörigen anhand seines Geruchs. Dementsprechend ver-

sucht ein jeder, für die Götter gut zu riechen, verbrennt süßlich riechende Harze oder trägt bestimmte Blätter und Blumen an sich. Ein Gutteil der alltäglichen Handlungen und Konversationen dreht sich bei den Jahai darum, Geruch positiv zu beeinflussen.

Wie nun Sprache, Kultur, Kognition und Handeln im Einzelnen genau aufeinander wirken, lässt sich noch nicht sagen, zu viele Befunde sind noch Einzelbeobachtungen. Einen Ansatz, dieses Zusammenspiel zu ergründen, unternehmen daher Kognitionsanthropologen und -linguisten am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nimwegen, die seit über 20 Jahren auch über die Repräsentation von Raum in verschiedenen Sprachen forschen. Die galt ebenfalls lange als Universalie, da allen Menschen auf Grund ihres Körperbaus die Achsen links/rechts und vorne/hinten zur Verfügung stehen. Auf der anderen Seite wusste man seit Längerem von Jäger-und-Sammler-Gruppen, die Landschaftsmerkmale zur Orientierung benutzen. Statt also von links oder rechts zu sprechen, würden diese – wie auch »Die andere Heimat« kolportiert – eher »zum Fluss hin« oder »bergauf« sagen.

Navigieren in der Welt ohne »links« und »rechts«

Räumliche Konstellationen lassen sich in Feldversuchen relativ leicht aufbauen, und inzwischen gibt es umfangreiche Daten dazu. Tatsächlich verfügen etliche Gruppen weltweit über präzise Orientierungssysteme, die sehr gut ohne links und rechts auskommen. Das Hai//om, eine von mehreren Sprachen der San im Norden Namibias, kennt zwar ein »linkerhand« und »rechterhand«. Normalerweise verwenden die Sprecher diese Termini aber nur, wenn sie die betreffende Körperhälfte auch tatsächlich meinen. Ansonsten benutzen sie Landmarken und Himmelsrichtungen, die einen deutlichen Vorteil bieten: Während »links« oder »vorn« von der Stellung des Sprechers abhängt, trifft das bei »hin zum Flussland« oder »hin zur Sonnenuntergangsseite« nicht zu. Das Spektrum solcher Orientierungssysteme ist groß. Die Abori-

gines Australiens beispielsweise nehmen auf die vier Himmelsrichtungen Bezug, in den Gebirgsregionen Mittelamerikas und Zentralasiens bilden die Achsen »bergauf/bergab« sowie »quer zum Berg« den Rahmen.

Der Bezug der Raumwahrnehmung auf die Umgebung statt auf den Menschen kommt oft auch in nicht sprachlichem Verhalten wie Gesten und Tänzern zum Ausdruck. Offensichtlich sprechen diese Orientierungssysteme unbewusste Körper Routinen an, die Forscher bisher für universal und unveränderlich gehalten haben. Vermutlich erleichtern »allozentrische« Systeme den Jägern und Sammlern die Navigation im Gelände auch über größere Distanzen hinweg. Der Umkehrschluss wäre aber falsch: Linguisten kennen viele Jäger-und-Sammler-Gesellschaften, die ihren Weg problemlos mit Bezügen zur Körperachse finden. Ebenso wenig kommen allozentrische Wörter automatisch mit der Sesshaftwerdung außer Gebrauch. Ihre Grundlage bildet also nicht ausschließlich das tatsächliche Umherziehen. Vielmehr spiegeln die Orientierungsangaben Vorstellungen über die Beschaffenheit der Welt, die für die jeweiligen Sprecher nicht einfach gegeben ist, sondern durch Kommunikation fortwährend vermittelt wird.

Von der Raumwahrnehmung aus erschließen Anthropologen und Linguisten als weiteres Forschungsfeld die Variabilität in der Wahrnehmung und Beschreibung von Landschaftsformationen. Wie geht der Mensch mit fließenden Übergängen statt scharfen Grenzen, mit Unregelmäßigkeiten statt ständig gleichen Strukturen um? Kennen alle Sprachen von Bergvölkern Begriffe für Berge, Hügel und Täler? Falls ja, ziehen sie zwischen diesen Landschaftselementen stets die gleichen Grenzen? Damit in Zusammenhang stehend: Welche geografischen Merkmale werden für Ortsbezeichnungen benutzt? Unterscheiden alle Sprachen zwischen unbesiedelten und bewohnten Flächen, wie wir es im Westen mit Flur- und Ortsnamen tun?

Auch hier zeichnet sich ab, dass die Vielfalt der Einteilung und Benennung weit größer ist als bisher angenommen. Das erweisen schon nahe verwandte und bekannte Sprachen: Das deutsche »Berg« könnte durchaus dieselbe hohe Landmasse meinen wie ein englischer »mountain«, doch ein deutscher Wanderer verwendet den »Berg« auch dann, wenn sein englischer Kollege allenfalls von einem »hill«, also einem Hügel sprechen würde. Auch in diesem Bereich sind Fallbeispiele der Jäger-und-Sammler-Forschung besonders aufschlussreich. In vielen Sprachen der Ureinwohner Australiens könnten ein Klumpen, ein Haufen, ein Hügel und ein Berg trotz der Größenunterschiede mit demselben Wort bezeichnet werden. Sofern sie nämlich aus dem gleichen Material bestehen – Fels, Sand oder Ton – oder die gleiche Form haben, also abgerundet, spitz oder zerklüftet. Diese Unterschiede sind dann sehr wohl lexikalisiert, das heißt im Vokabular repräsentiert. Dem entsprechen Eigenheiten der Religion: In Australien sind Form und Beschaffenheit in den Schöpfungsmythen besonders wichtig, denn den Wesen der Traumzeit wird zugesprochen, mit ihren Be-





THOMAS WIDLÖK

Angehörige der San in Nordnamibia spielen die »Space Games« – ein zu Vergleichszwecken standardisiertes Set von Aufgaben zur Erfassung und Dokumentation räumlicher Bezeichnungen. Einer der beiden beschreibt eine räumliche Anordnung, die der andere nicht sehen kann, aber mit Hilfe der Angaben identifizieren oder mit Hilfe von Gegenständen reproduzieren soll. Diese Dialoge bilden systematisch die Strategien der Sprecher ab, wenn sie auf räumliche Gegensätze wie Ost/West oder links/rechts eingehen.

wegungen das Land geformt zu haben, »als die Welt noch weich gewesen ist«.

Kulturvergleiche zeigen auch in diesem Bereich der Wahrnehmung, dass Jäger-und-Sammler-Gesellschaften keineswegs immer die gleichen Repräsentationsstrategien verfolgen. Der Wortschatz zu Landschaftsformen der Jahai in Malaysia etwa basiert weitgehend auf drei Elementen: Wasser, Erde und Wald. Es genügt, diese Grundwörter mit Begriffen für Körperteile oder mit Verwandtschaftsbezeichnungen zu kombinieren, um ein fast vollständiges Landschaftsvokabular zu erhalten. So ist ein Berghang ein »Brustkorb der Erde«, die Baumkronen bilden den »Rücken des Waldes«. Ein großer Fluss ist die »Mutter des Wassers«, ein Bach das »Kind des Wassers«.

Auch hier finden sich religiöse Bezugspunkte, da diese Elemente als in der mythischen Zeit lebendig gelten. Während in Australien aber besondere Plätze mit bestimmten Wesen und ihren Taten in Beziehung gebracht werden, bilden die metaphorischen Modelle der Jahai standardisierte Begriffsschablonen, mit deren Hilfe sie sich durch den Wald bewegen sowie Erinnerungen und Kommunikation organisieren. Dazu gehört auch, dass sie sich – ohne Berge oder Flüsse mit Flurnamen zu benennen – in ihrer Welt zurechtfinden, weil ihre standardisierten Begriffe für Landschaftsformationen dafür ausreichen. Darin unterscheiden sie sich nicht nur von europäischen Völkern, sondern auch von vie-

len anderen Jägern und Sammlern, bei denen Flurnamen sehr gebräuchlich sind.

Bei all den oft exotisch anmutenden Eigentümlichkeiten, den Geruchswörtern der Jahai, den Schnee Begriffen der Inuit oder den Landschaftsbezeichnungen der Australier sollten wir aber eines nicht übersehen: Es lässt sich immer eine Brücke bauen, um sich in die Lebenswelt anderer hineinzusetzen. Auch das haben Jäger und Sammler uns gelehrt, die sich in ihren Lebensräumen stets mit ihren Nachbargruppen verständigt haben. Wir Menschen sind offenbar nicht nur in der Lage, sehr individuelle, an die äußeren Bedingungen angepasste Strategien zur Bewältigung unseres Lebens zu entwickeln – wir können diese Unterschiede auch überbrücken. ~

DIE AUTOREN



Thomas Widlok (links) lehrt Kulturwissenschaften Afrikas an der Universität zu Köln.

Niclas Burenhult ist Privatdozent für Linguistik an der Universität Lund in Schweden.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1286313

Vielseitige Chemie mit brennbarer Luft

Wasserstoff ist zwar das einfachste Element, sorgt aber immer wieder für Überraschungen.

VON ROALD HOFFMANN

Meine erste Begegnung mit molekularem Wasserstoff (H_2) war typisch für einen Jungen im Zeitalter der Chemiebaukästen. Der meinige enthielt etwas Zinkpulver, aber keine Säuren. Die sollte man laut Gebrauchsanleitung selbst aus anderen Chemikalien erzeugen – Salzsäure (HCl) etwa aus Natriumhydrogensulfat ($NaHSO_4$) und Ammoniumchlorid (NH_4Cl). Kleinere Mengen seien aber auch in der Apotheke zu haben. Tatsächlich bekam ich dort das Gewünschte, indem ich artig im besten mir zu Gebote stehenden Englisch – schließlich war ich erst ein Jahr zuvor aus Europa nach Brooklyn gekommen – danach fragte. Ich schütete etwas von der Säure auf das Zink in einem Reagenzglas, beobachtete die aufsteigenden Bläschen, hielt mit leicht zittrigen Händen ein brennendes Streichholz hin und hörte mit Entzücken das charakteristische »Plopp« der Knallgasreaktion.

Als Nächstes begegnete ich der »brennbaren Luft« – so die Bezeichnung ihres Entdeckers Henry Cavendish (1731–1810) – bei einem Elektrolyseexperiment in der High School. Wir leiteten elektrischen Strom durch Wasser mit etwas gelöstem Kochsalz und fingen die Gase, die an den beiden Elektroden ausperlten, in umgestülpten Reagenzgläsern auf. Deren Inhalt verschaffte uns anschließend kleine pyrotechnische Freuden, indem wir ein frisch ausgeblasenes Streichholz hineinhielten. In einem Fall hörten wir das schon bekannte »Plopp« und im anderen loderte die erloschene Flamme zischend wieder auf.

Primo Levi beschreibt in seinem wunderbaren Buch »Das periodische System« dasselbe Experiment, das in seinem Fall allerdings etwas dramatischer verlief:

»Ich hob das Glas an der Kathode behutsam an, ... zündete ein Streichholz an und näherte es der Öffnung. Es gab einen dumpfen, aber heftigen Knall, das Glas zersprang in lauter Splitter (zum Glück hielt ich es in Brusthöhe und nicht weiter oberhalb), und mir blieb wie zum Hohn der Boden in der Hand zurück ... Es war also doch Wasserstoff gewesen, derselbe, der in der Sonne und in den Sternen brennt und aus dessen Verdichtung sich in ewiger Stille die Welten bilden« (Übersetzung aus dem Italienischen von Edith Packmeyer, Copyright 1979, Aufbau Verlag, Berlin und Weimar, heute dtv 11334).

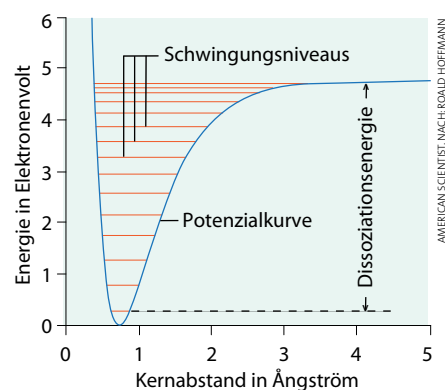
Von Lavoisier zur Quantenchemie

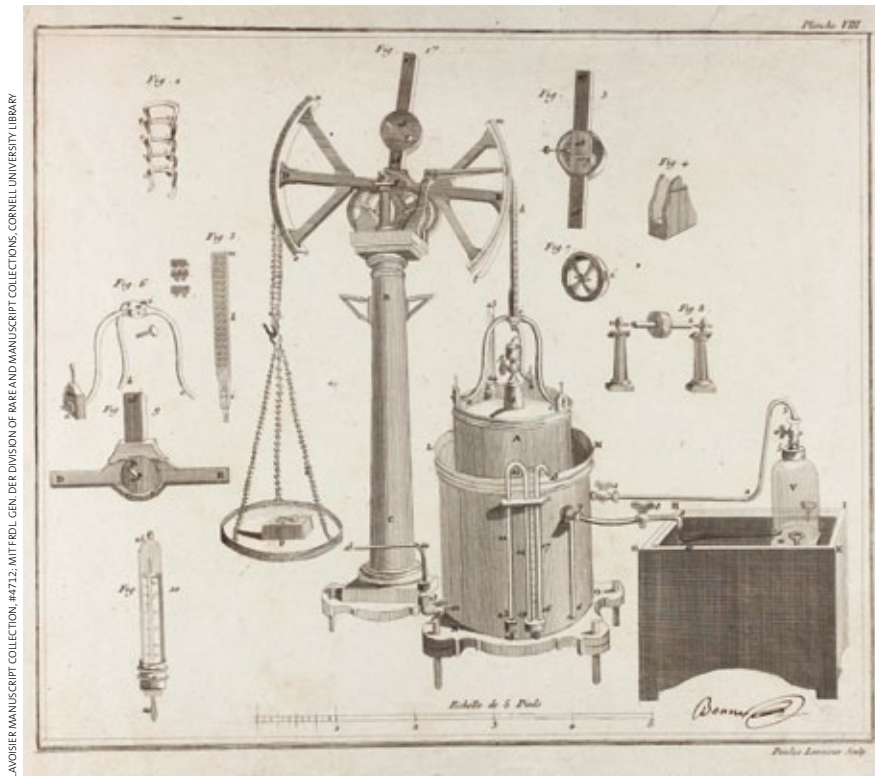
Auch Antoine Laurent Lavoisier (1743–1794) hatte das Experiment an zwei Tagen im Februar 1785 bereits durchgeführt. Er wollte damit seine revolutionäre Verbrennungstheorie beweisen und lud deshalb ausgewählte Kapazitäten der französischen Wissenschaft als Beobachter ein. Mit bemerkenswerten Geräten, die er auf eigene Kosten gebaut hatte (Bild rechts), zerlegte der Vater der modernen Chemie Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und

Molekularer Wasserstoff lässt sich als anharmonischer Oszillator auffassen, dessen Potenzialkurve hier schematisch gezeigt ist. Weil es sich um ein Quantensystem handelt, sind nur diskrete Schwingungszustände erlaubt (rote waagrechte Linien). Die Differenz zwischen dem tiefsten und höchsten Niveau entspricht der Dissoziationsenergie des Moleküls und der mittlere Abstand der beiden Wasserstoffatome im Grundzustand der Bindungslänge: 0,74 Ångström.

Sauerstoff und zeigte dann, dass bei der Vereinigung der beiden Gase wieder Wasser entsteht – ebenso wie bei der Verbrennung von Wasserstoff, was Cavendish einige Jahre zuvor schon bewiesen hatte. Und noch etwas demonstrierte Lavoisier: Bei dem Zyklus aus Zerlegung und Neubildung von Wasser bleibt die Masse erhalten. Auch wenn sich die Zuschauer damals nicht überzeugen ließen, läutete dieses Experiment ein neues Zeitalter der Chemie ein. Wasser und Luft, jene scheinbar homogenen Elemente der alten Griechen, erwiesen sich als Verbindung beziehungsweise Gemisch.

Die Chemie brauchte danach noch gut 75 Jahre bis zu der Erkenntnis, dass die makroskopischen Verbindungen eine mikroskopische Entsprechung in Form von Molekülen haben. Und es dauerte weitere 65 Jahre, ehe die neu entstandene Quantenmechanik das Wie und Warum des Wasserstoffmoleküls erklären konnte. In meiner Ausbildung durchlief ich denselben Erkenntnisprozess, benötigte dafür allerdings nur drei Jahre und nicht 140. Ich lernte die quantenmechanische Beschreibung von H_2 in einer mitreißenden Vorlesung von George Fraenkel (1921–





Im Jahr 1789 schuf die französische Chemikerin und Illustratorin Marie-Anne Pierrette Paulze Lavoisier diese Zeichnung der Apparatur, mit der ihr Ehemann Antoine Laurent Lavoisier (1743–1794) Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff spaltete und es aus den beiden Gasen anschließend zurückgewann.

2009) in meinem letzten Jahr am Columbia College in New York kennen.

Als Erste hatten Walter Heitler (1904–1981) und Fritz London (1900–1954) im Jahr 1927 das Wassermolekül mit Hilfe der damals ganz neuen Quantenmechanik berechnet. Ihr Modell baute Linus Pauling (1901–1994) dann zu einer allgemeinen Theorie der kovalenten Bindung aus. Zu jener Zeit war die Dissoziationsenergie von H_2 – sie muss aufgewendet werden, um das Molekül in seine beiden Atome zu zerlegen – bereits bekannt. Sie beträgt 4,48 Elektronenvolt (eV) pro Molekül oder 104 Kilokalorien pro Mol (kcal/mol). Wer mit Letzterem nichts anfangen kann, dem sei gesagt, dass ein Mol H_2 etwas mehr als 22 Liter Gas bei Raumtemperatur umfasst und nur zwei Gramm wiegt. Wegen dieser sehr geringen Dichte wurde Wasserstoff in Luftschiffen verwendet. Und was die Kilokalorien betrifft, braucht man 80 kcal, um einen Liter Wasser von Raumtemperatur bis zum

Siedepunkt zu erhitzen – was wohl die meisten von uns schon gemacht haben. Die Spaltung von zwei Gramm H_2 erfordert also etwa die gleiche Energie, wie eineinviertel Liter Wasser zum Kochen zu bringen. Versuchen Sie es aber lieber nicht auf Ihrem Herd – denken Sie an die Katastrophe der Hindenburg!

Doch wie läuft die Dissoziation genau ab? Führt man einem Wasserstoffmolekül Energie zu, fängt es an zu schwingen. Dabei bewegen sich die beiden Atome periodisch voneinander weg und aufeinander zu. Je größer die zugeführte Energie, desto stärker die Bewegung. Sie wird schließlich so heftig, dass das Molekül zerreißt.

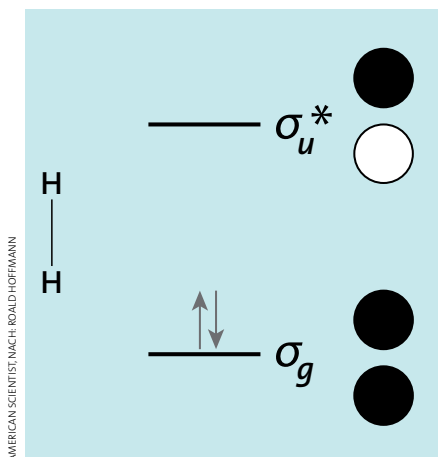
Eine so genannte Potenzialkurve beschreibt den Zusammenhang zwischen der aufgenommenen Energie und dem Abstand der beiden Atome an den Endpunkten der Schwingung – dem Moment maximaler Dehnung oder Stauchung (Bild links). Sie hat eine Mulde, und deren Tiefe entspricht der Dis-

soziationsenergie, also der Energie, die mindestens zugeführt werden muss, um das Molekül zu zerreißen.

Im Minimum der Potenzialkurve sollte gar keine Schwingung stattfinden. Allerdings gehorcht jedes Molekül den Gesetzen der Quantenmechanik und damit dem heisenbergschen Unbestimmtheitsprinzip, wonach Position und Geschwindigkeit eines submikroskopischen Teilchens niemals beide exakt bekannt sein können. Das träfe aber zu, wenn sich das Wasserstoffmolekül reglos im Potenzialminimum der Energiekurve befände. Deshalb vibriert es auch im energieärmsten Zustand noch. Die Wasserstoffkerne schwanken dabei um ihren Gleichgewichtsabstand – ähnlich wie ein Pendel, aber nicht so deterministisch. Manchmal sind sie sich etwas näher, manchmal etwas ferner. Im zeitlichen Mittel beträgt die Distanz, allgemein als Bindungslänge bezeichnet, ungefähr $0,74 \times 10^{-8}$ Zentimeter oder 0,74 Ångström (Å).

Als Heitler und London ihre Berechnung für das H_2 -Molekül durchführten, erhielten sie 3,14 eV für die Dissoziationsenergie und 0,87 Å als Gleichgewichtsabstand. Die Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Werten ist also nicht perfekt, aber doch ganz gut. Vor allem konnten die beiden Theoretiker mit Hilfe der Quantenmechanik erstmals die Existenz eines Moleküls erklären, was mit einer Kombination aus klassischer Mechanik und Elektrostatik zuvor nicht gelungen war.

Die Schrödinger-Gleichung – jene Wellenfunktion, die alle Materie beschreibt – ist für H_2 nicht exakt lösbar. Heitler und London entwickelten deshalb ein Näherungsverfahren, das im Lauf der Zeit stetig verbessert wurde. Wie sich die Quantenchemiker allmählich an die genaue Lösung herantasteten, erschien mir als jungem Adepten wunderbar logisch und faszinierend. Die Entwicklung gipfelte in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1933, in der Hubert M. James und Albert Sprague Coolidge die experimentell gefundenen Werte mit Hilfe von mechanischen Kurbelrechenmaschinen exakt reproduzierten.



In den beiden Molekülorbitalen von H_2 – σ_g und σ_u^* genannt – überlagern sich die Wellenfunktionen für die Elektronen der beiden Einzelatome einmal in Phase (beide schwarz) und einmal um 180 Grad phasenverschoben (eine schwarz, die andere weiß). σ_g hat im Unterschied zu σ_u^* keine Knotenfläche, bei der die Elektronendichte zwischen den zwei Kernen auf null zurückgeht. Deshalb liegt es energetisch tiefer und wird als bindendes Orbital bezeichnet. Es ist im Grundzustand von H_2 mit zwei Elektronen besetzt, während das antibindende σ_u^* leer bleibt.

külorbitale werden mit σ_g und σ_u^* bezeichnet (Bild links).

Das Sigma (σ) und die Indizes unten und oben beschreiben Symmetrieeigenschaften. Entscheidend ist, dass σ_g im Gegensatz zu σ_u^* keine Knotenfläche zwischen den beiden Wasserstoffkernen aufweist, in der die Elektronendichte auf null absinkt. Es stellt daher den energieärmeren Zustand dar. Chemiker sprechen von einem bindenden Orbital. Ist es nämlich wie beim H_2 -Molekül mit (maximal zwei) Elektronen besetzt, halten diese die Atomkerne zusammen. Elektronen im »antibindenden« Orbital σ_u^* – beim ungestörten H_2 -Molekül gibt es keine, in der einfachsten Betrachtungsweise jedenfalls – treiben das Molekül dagegen auseinander. So erstaunlich das klingt, schreiben die winzigen Elektronen den schweren Kernen also vor, wo sie sich aufzuhalten haben.

Fraenkel präsentierte in seiner Vorlesung auch die von Friedrich Hund (1896–1997) und Robert S. Mulliken (1896–1986) entwickelte Molekülorbital-(MO-)Methode, die lange Zeit mit der Valenzbindungs-(VB-)Methode von Pauling konkurrierte. Dabei werden Atomorbitale zu Aufenthaltsräumen der Elektronen im Molekül kombiniert. Dieses Verfahren hat sich schließlich durchgesetzt und seit 1950 das chemische Denken beherrscht, lieferte anfangs aber eine schlechtere Beschreibung der Bindung im H_2 -Molekül, zu

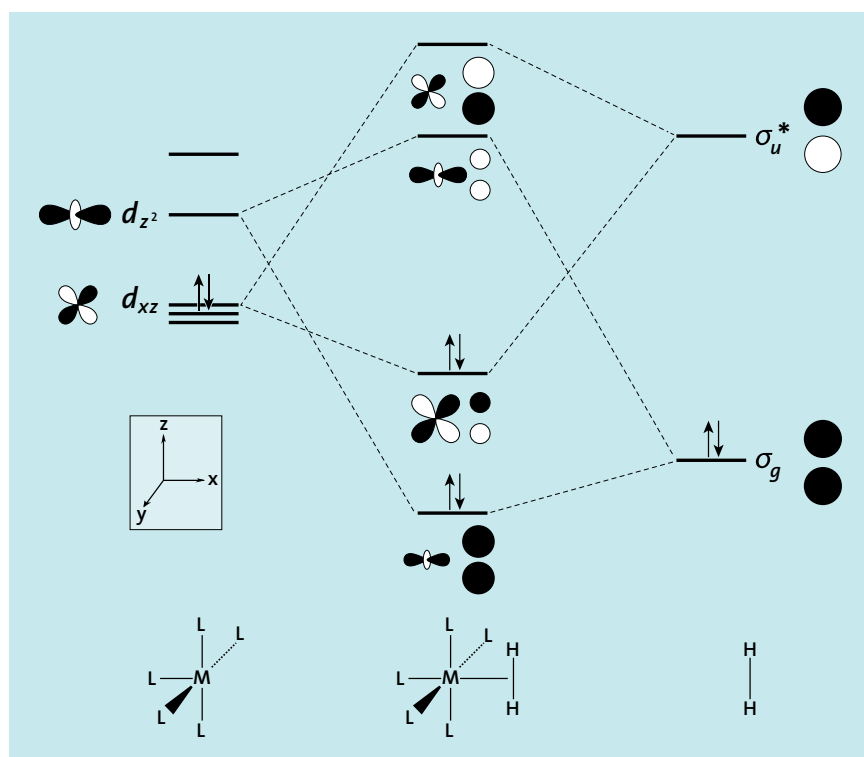
der jedes der beiden Wasserstoffatome sein einziges Elektron beisteuert, welches das so genannte 1s-Orbital besetzt.

Ich möchte auf die Molekülorbitale von H_2 hier näher eingehen – nicht nur wegen ihrer grundlegenden Bedeutung, sondern auch weil ich ihnen nie entgegenkomme bin: Etwa alle 25 Jahre haben sie mir eine neue Chemie beschert. Um sie zu erhalten, kombiniert man die Wellenfunktionen für die zwei Elektronen der beiden Einzelatome – einmal in Phase und einmal um 180 Grad phasenverschoben. Die resultierenden Mole-

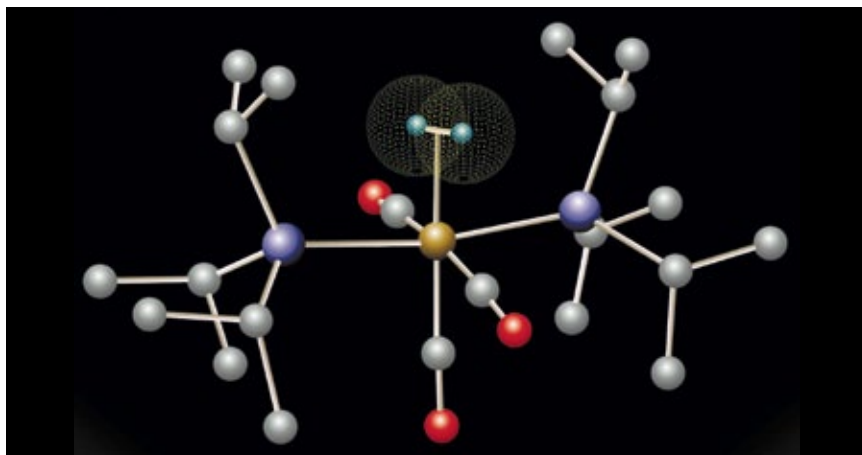
Ein produktiver Reifall

Nach meiner Promotion machte ich erneut Bekanntschaft mit dem Wasserstoffmolekül, und wieder endete die Begegnung in einer Beinahekatastrophe – diesmal allerdings nicht im materiellen,

Molekularer Wasserstoff (rechts seine Molekülorbitaldarstellung) ist üblicherweise recht reaktionsträge, kann mit einem passenden »Komplex« aus einem Übergangsmetallatom M und darum gruppierten Liganden L aber eine Verbindung bilden. Der hier gezeigte ML_5 -Komplex (links) fungiert mit seinem leeren d_{z^2} -Orbital am Metall als Säure und mit dem gefüllten d_{xz} -Orbital als Base. Das saure d_{z^2} tritt deshalb mit dem besetzten, basischen σ_g von Wasserstoff in Wechselwirkung. Analog interagiert das basische d_{xz} mit dem leeren, sauren σ_u^* . Dabei entstehen jeweils, wie durch gestrichelte Linien angezeigt, zwei Molekülorbitale, eines mit höherer und eines mit niedrigerer Energie als die Ausgangsorbitale. Werden die beiden tiefsten mit den vier zur Verfügung stehenden Elektronen besetzt, hat die Verbindung eine niedrigere Gesamtenergie als die Ausgangsmoleküle und ist folglich stabil.



Greg Kubas und seine Kollegen am Los Alamos National Laboratory in New Mexico haben den ersten Metallkomplex mit molekularem Wasserstoff (grün) als Liganden synthetisiert. Bei dem Metall handelt es sich um Wolfram (gelb). Die fünf anderen Liganden bestehen aus Phosphor (violett), Sauerstoff (rot) und Kohlenstoff (grau), an den teils weitere Wasserstoffatome gebunden sind, die der Übersichtlichkeit halber weggelassen wurden.



BRIAN SCOTT UND JOSH SMITH, LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY

sondern im geistigen Sinn. Einige Theoretikerkollegen und ich hatten bei William N. Lipscomb (1919–2011) die erweiterte Hückel-Theorie ausgearbeitet: eine näherungsweise Molekülorbitalmethode, die für größere organische Moleküle vernünftige Geometrien und plausible Energieschemata ergab. Doch als ich sie auf das Wasserstoffmolekül anwandte, kollabierte es: Der berechnete Abstand zwischen den Kernen ging gegen null. Das war ein Schock. Wir mussten all unseren Mut zusammennehmen, um mit einer Methode fortzufahren, die – aus guten Gründen, wie sich später herausstellte – das einfachste Molekül der Welt falsch beschrieb.

Vielleicht hatte dieser unerwartete Reifall aber auch sein Gutes. Denn fortan vertrauten meine Mitarbeiter und ich weniger auf Zahlen als auf ein tieferes Verständnis. Und so gewannen wir eine Menge chemischer Einsichten mit unserer unzulänglichen Methode.

Molekularer Wasserstoff ist ähnlich wie Methan ziemlich reaktionsträge. Zwar brennt er natürlich – mit einer fast farblosen, aber sehr heißen Flamme. Doch tut er das nicht von sich aus. Zum Anzünden braucht man ein Streichholz, obwohl pro verbranntes Mol Wasserstoff etwa 68 Kilokalorien an Energie freigesetzt werden. Das ist eben Chemie: Manche Vorgänge scheitern sich nicht im Geringsten darum, dass sie laut Thermodynamik eigentlich spontan ablaufen sollten.

Chemische Reaktionsbereitschaft beruht hauptsächlich auf der Wirkung

von Säuren und Basen. Diese stehen deshalb auch im Mittelpunkt der Einführungskurse in das Fach. Eine Base wie Ammoniak (NH_3) ist ein guter Elektronenspende; denn sie besitzt ein gefülltes Molekülorbital hoher Energie. Eine Säure wie das Hydronium-Ion (H_3O^+) – ein Wassermolekül mit angelagertem Proton – ist dagegen ein ausgezeichnete Elektronenakzeptor, weil sie über ein leeres Molekülorbital niedriger Energie verfügt. Molekularer Wasserstoff hat nichts von beidem. Sein einziges besetztes MO, das σ_g im MO-Schema, weist ein hohes Ionisationspotenzial von 15,4 eV auf, was bedeutet, dass es energetisch sehr tief liegt. Das niedrigste leere Molekülorbital, σ_g^* , ist dagegen ziemlich energiereich – man braucht etwa 11 eV, um ein Elektron aus dem besetzten Grundzustand dorthin zu verschieben.

Kurz gesagt ist das Wasserstoffmolekül also weder eine gute Base noch eine vernünftige Säure. Und eben das macht es schlecht angreifbar: Anderen Molekülen bietet es quasi keinen Haltegriff.

Wasserstoff reagiert jedoch bereitwillig in Gegenwart von bestimmten Metallen. So entdeckte Johann Wolfgang Döbereiner (1780–1849) schon 1823, dass sich das Gas an einer Platinoberfläche spontan entzündet. Dies war die erste gut charakterisierte katalytische Reaktion. Döbereiner wusste noch nicht, dass gasförmiger Wasserstoff aus Molekülen besteht – er gewann ihn wie ich als Junge aus Zink und einer Säure, in seinem Fall Schwefelsäu-

re. Ebenso wenig kannte er die atomaren Vorgänge bei der Reaktion: Wie die H_2 -Moleküle auf der Platinoberfläche gespalten werden und sich dann mit Sauerstoff aus der Atmosphäre verbinden. Aber er nutzte seine Entdeckung für ein Feuerzeug auf Wasserstoffbasis, das ein halbes Jahrhundert lang im Haushalt gute Dienste leistete.

Wasserstoff in Metallkomplexen

Erst in den 1980er Jahren fanden sich Hinweise auf eine schwache Bindung von molekularem Wasserstoff an diverse Metallatome. Oberflächenchemiker reimten sich daraufhin einen Mechanismus für Döbereiners magisches Feuerzeug zusammen. Derweil fanden ihre Kollegen im Labor Reaktionen, bei denen sich Wasserstoffmoleküle als »Liganden« in Metallkomplexen an ein Zentralatom binden und dabei in die Atome zerfallen. Folglich betrachteten Experimentatoren wie Theoretiker die scheinbare Reaktionsträgheit von H_2 zunehmend als Herausforderung statt als Dogma.

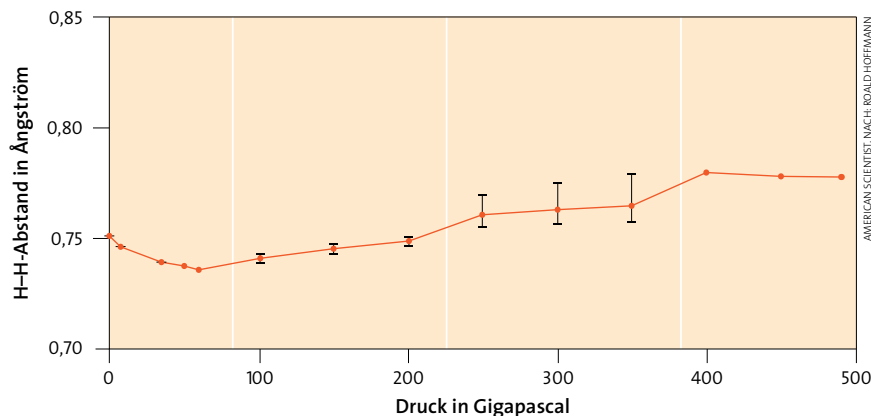
Auch ich selbst war an dieser Entwicklung beteiligt. Im Jahr 1984 untersuchte Jean-Yves Saillard, heute an der Universität Rennes, als Postdoc in meinem Arbeitskreis anhand quantenmechanischer Berechnungen die Wechselwirkung von Wasserstoff und Methan mit Übergangsmetallkomplexen der Form ML_n . Darin steht M für das zentrale Metallatom und L für Liganden wie Kohlenmonoxid (CO) oder Phosphin (PH_3), die es umgeben. War der Kom-

plex so aufgebaut, dass er als gute Base und Säure zugleich dienen konnte, und verfügte er über eine unbesetzte Koordinationsstelle, sollte er nach den Berechnungen von Saillard und mir an dieser Stelle ein Wasserstoffmolekül binden können. Ein solcher Metallkomplex war nach unserer damaligen Kenntnis noch nie zuvor hergestellt worden.

Der Kern unserer Überlegungen lässt sich in einem Molekülorbitaldiagramm veranschaulichen (Grafik S. 84 unten). Solche Diagramme sind beruflich mein täglich Brot. Sie zeigen die Wechselwirkungen der wichtigen Orbitale von zwei Teilen eines Moleküls. Beim $L_5M(H_2)$ -Komplex sind das die ML_5 -Gruppe und mein alter Bekannter H_2 .

Dessen Orbitale kennen wir schon: das bindende σ_g und das antibindende σ_u^* . Die hauptsächlich am Metall lokalisierten Orbitale der ML_5 -Gruppe sind komplizierter. Sie gehören zu Elektronen der dritten Hauptschale mit der Nebenquantenzahl 2 und tragen deshalb die Bezeichnung 3d. Sie sind teils gefüllt und teils leer. Einige können sich auf Grund ihrer Symmetrie und geometrischen Form gut mit den H_2 -Orbitalen überlagern. Das gilt insbesondere für d_{xz} und σ_u^* sowie d_{z^2} und σ_g . Durch die Überlappung entsteht jeweils wieder ein energetisch tief liegendes bindendes und ein hochenergetisches antibindendes Molekülorbital.

Das leere d_{z^2} repräsentiert die Säurefunktion der ML_5 -Gruppe. Es tritt mit dem gefüllten basischen σ_g von H_2 in Wechselwirkung. Analoges gilt für das voll besetzte basische d_{xz} -Orbital und das leere saure σ_u^* . (Habe ich nicht gesagt, dass die ganze Plackerei mit Säuren und Basen im ersten Jahr Chemie doch einen Sinn hat?) Ganz wichtig ist, dass beim Überlappen jeweils Elektronendichte von dem vollen auf das leere Orbital übergeht. Das wirkt sich auf die Länge und Stärke der H_2 -Bindung aus. Da das bindende σ_g Elektronendichte an d_{xz} abgibt und das antibindende σ_u^* welche von d_{xz} erhält, wird der Zusammenhalt zwischen den beiden Wasserstoffatomen schwächer, und sie rücken auseinander. Damit ist der Anfang für den Bindungsbruch gemacht.



Unter steigendem Druck ändert sich der Kernabstand im Wasserstoffmolekül. Er nimmt aber nicht gleichmäßig ab, wie man erwarten würde. Vielmehr wird er je nach den Wechselwirkungen zwischen den Orbitalen und dem Elektronenaustausch über weite Strecken sogar größer. Die vertikalen Linien markieren Änderungen in der Packung der Moleküle. Die »Fehlerbalken« in der theoretisch abgeleiteten Kurve zeigen in Wahrheit die Spanne der Kernabstände, die bei Wasserstoffmolekülen an unterschiedlichen Stellen innerhalb der jeweiligen Struktur unter dem betreffenden Druck auftreten.

Als Saillard und ich diese Überlegungen anstellten, wussten wir nicht, dass der erste solche Komplex gerade hergestellt worden war (Bild S. 85) – von Greg Kubas im Los Alamos National Laboratory in New Mexico (und zwar ganz ohne Kernreaktionen). Er enthält Wolfram als Zentralatom sowie drei CO-Moleküle und zwei Phosphinderivate als Liganden. Über die Jahre folgten weitere solche Komplexe, sogar solche, in denen mehr als ein H_2 an das Metall gebunden ist.

Schließlich gelang es per Neutronenbeugung und magnetische Kernresonanzspektroskopie auch, den H-H-Abstand in diesen Molekülen präzise zu bestimmen. Wie von uns vorhergesagt, ist er größer als im freien H_2 . Kubas wusste übrigens von Anfang an genau, was er tat – seine qualitativen Vorstellungen über die Bindung des Wasserstoffmoleküls in diesen Komplexen stimmten ziemlich gut mit den Ergebnissen unserer Berechnungen überein.

Für mich war es eine helle Freude zu sehen, wie unsere theoretische Idee über die Bindung eines Moleküls – noch dazu des ausgesprochen reaktionsträgen Wasserstoffs – Wirklichkeit wurde. Die größte Anerkennung verdient jedoch Kubas; denn letztlich geht es in der Chemie um greifbare Moleküle.

Theorien kommen und gehen, aber ein einmal hergestelltes Molekül ist eine Errungenschaft für die Ewigkeit.

In den letzten Jahren untersuchten mein Kollege Neil Ashcroft und ich in einer fruchtbaren Kooperation, wie Moleküle und Atomgitter auf extremen Druck reagieren. Dabei kehrten wir schließlich auch zu einer Jugendliebe von Neil zurück, dem Wasserstoff. Als Postdoc mit im Team war die Französin Vanessa Labet.

Verhalten unter extremem Druck

Eine alte, heiß umstrittene Frage ist, bei welchem Druck fester kalter Wasserstoff (ja, Wasserstoff erstarrt bei etwa -259 Grad Celsius) metallisch und damit elektrisch leitend wird. Nur in einem sind sich die Forscher einig: dass er auch bei den 3,5 Millionen Atmosphären, die im Erdzentrum herrschen, noch als zweiatomiges Molekül vorliegt. Da im metallischen Zustand alle Wasserstoffatome gleich weit voneinander entfernt wären, müsste auf dem Weg dahin die H-H-Bindungslänge innerhalb der H_2 -Moleküle zu-, der Abstand zwischen ihnen dagegen abnehmen.

Das Mittel der Wahl zur experimentellen Untersuchung von Materie unter Druck sind Diamantstempelzellen. Mit ihnen lässt sich eine Probe, umschlos-

sen von einem Dichtungsring aus einem (hoffentlich) unreaktiven Metall, zwischen zwei Brillanten bis auf einige Gigapascal komprimieren – mehr als den 10000-fachen Atmosphärendruck. Da Diamant farblos und durchsichtig ist, kann man das Material im Innern der Apparatur spektroskopisch untersuchen und auf diese Weise zum Beispiel auch feststellen, wie sich der H–H-Abstand beim Komprimieren ändert. Demnach vollführt er einen ziemlich wilden Tanz (Bild links): Zunächst nimmt er ein wenig ab, vergrößert sich dann und geht schließlich wieder leicht zurück. Insgesamt beträgt die Variation jedoch nicht einmal zwei Prozent des Normalabstands von 0,74 Ångström.

Es gibt Bereiche in Physik und Chemie, wo die Theorie – sofern man ihr trauen kann – aussagekräftiger ist als das Experiment. Materie unter Extrembedingungen gehört dazu. Vanessa Labet verschaffte sich ein Sortiment der besten Strukturdaten für die Hochdruckmodifikationen von festem H₂, die Chris Pickard vom University College London und Richard Needs von University of Cambridge (England) berechnet hatten. Diesem Datensatz wollte sie physikalische Einsichten darüber entlocken, warum sich die H–H-Bindungslänge so verhält, wie die spektroskopischen Befunde nahelegen. Was steckt hinter dem kuriosen Auf und Ab?

Die Knicke in der Kurve rühren von so genannten Phasenübergängen her: dem abrupten Wechsel von einer Kristallstruktur zu einer anderen. Die unterschiedlichen Neigungen in den annähernd linearen Bereichen dazwischen aber müssen andere Gründe haben. Wir tippten zuerst auf die zunehmende räumliche Enge; denn mit wachsendem Druck wird jedes Wasserstoffmolekül von seinen Nachbarn immer mehr eingequetscht. Ein Modell dafür hatten Dudley Herschbach von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und Richard LeSar von der Iowa State University in Ames schon früher entwickelt.

Die beiden Forscher betrachteten die Verschiebungen der Energieniveaus von H₂, wenn man das Molekül in ei-

nen starren kugelförmigen Hohlraum sperrt und diesen stetig verkleinert. Wie zu erwarten, verringert sich dabei der Kernabstand: Er nimmt kontinuierlich immer weiter ab – im Widerspruch zu den experimentellen Befunden. Labet simulierte deshalb, was passiert, wenn das Wasserstoffmolekül in einen etwas weicheren Käfig eingesperrt wird, nämlich zwischen zwei Heliumatomen, den unnachgiebigsten chemischen Wänden, die sich denken lassen. Aber wieder nahm der H–H-Abstand kontinuierlich ab. Was blieb ihm auch anderes übrig?

Die Preisfrage lautete also: Wodurch um alles in der Welt könnte der Atomabstand länger werden, während das Wasserstoffmolekül gequetscht wird? An diesem Punkt erinnerte ich mich an die Metallkomplexe von Kubas. Darin streckt sich der seitlich gebundene Wasserstoff auf eine Länge von 0,82 bis 0,89 Ångström. Und dank den Arbeiten von Saillard und mir wusste ich auch warum! Im Metallkomplex nimmt die Elektronendichte im bindenden σ_g ab und im antibindenden σ_u^* zu. Beides lockert die H–H-Bindung.

Bei komprimiertem Wasserstoff gab es zwar keine Metallkomplexe weit und breit. Aber könnten deren Rolle bei extremen Drücken nicht vielleicht andere Wasserstoffmoleküle rund um ein gegebenes H₂ übernehmen? Wir erstellten Molekülorbitaldiagramme und – oh Wunder! – der Effekt war da. Modellrechnungen bestätigten, dass der Tanz der H–H-Abstände auf zwei konkurrierenden Effekten beruht: räumlicher Enge und der resultierenden Überlappung von Molekülorbitalen, durch die Elektronendichte übertragen und damit die Bindung gestreckt wird. Solche Einsichten, die einen Zusammenhang zwischen Dingen aufdecken, die scheinbar nichts miteinander zu tun haben, begeistern mich stets aufs Neue. Dasselbe Phänomen, das in exotischen Komplexen von Übergangsmetallen auftritt, zeigte sich auch in einem hochkomprimierten Kristall von reinem H₂!

Das leichteste Element und das einfachste denkbare zweiatomige Molekül – was könnte simpler sein? Doch welche Komplexität und Vielfalt ver-

birgt sich selbst in solch einem scheinbar banalen System! Der Bogen spannt sich von der Knallgasreaktion, die einem 13-jährigen Jungen in Brooklyn wonnige Schauer einflößte, über Döbereiners Feuerzeug und jene exotischen Übergangsmetallkomplexe mit Wasserstoff, die Kubas als erster Mensch auf der Welt erblickte, bis zum Tanz des Kernabstands im hochkomprimierten H₂-Molekül. Das Faszinierende ist, die tieferen Beziehungen zwischen all diesen unterschiedlichen Erscheinungsformen und Verhaltensweisen zu erkennen. Darin steckt das wahre Vergnügen, das die Beschäftigung mit der Chemie bereitet. ∞

DER AUTOR



Roald Hoffmann ist emeritierter Frank H.T. Rhodes Professor of Humane Letters an der Cornell University in Ithaca (New York) und Träger des Chemie-nobelpreises 1981. Er

dankt Neil Ashcroft und Vanessa Labet für den Anstoß, über ein Element nachzudenken, von dem er schon alles zu wissen meinte – und dabei tatsächlich noch etwas Neues zu lernen.

QUELLEN

Kubas, G.J. et al.: Characterization of the First Examples of Isolable Molecular Hydrogen Complexes, $M(\text{CO})_3(\text{PR}_3)_2(\text{H}_2)$ (M = Molybdenum or Tungsten; R = Cy or Isopropyl). Evidence for a Side-on Bonded Dihydrogen Ligand. In: Journal of the American Chemical Society 106, S. 451–452, 1984

Labet, V. et al.: A Fresh Look at Dense Hydrogen under Pressure: 3. Two Competing Effects and the Resulting Intramolecular H–H Separation in Solid Hydrogen under Pressure. In: Journal of Chemical Physics 136, 074503, 2012

Levi, P.: Das periodische System. Carl Hanser Verlag, München, Wien 1987

Saillard, J.-Y., Hoffmann, R.: C–H and H–H Activation in Transition Metal Complexes and on Surfaces. In: Journal of the American Chemical Society 106, S. 2006–2026, 1984

Salem, L.: Die Wunder des Moleküls. VCH, Weinheim 1987

© American Scientist

Dieser Artikel im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1286314

Individuelles Lernen per Computer

Schulen und Hochschulen begeistern sich für Technologien, die Lernenden Inhalte mundgerecht servieren und den Lehrer entbehrlich machen. Aber ist das eine Verbesserung?

Von Seth Fletcher

Als Arnecia Hawkins sich im Herbst 2012 an der Arizona State University (ASU) einschrieb, ahnte sie nicht, dass sie Versuchskarnickel für ein sehr großes Experiment werden würde. Es ging um nichts weniger als die Neuerfindung der Grundausbildung an amerikanischen Hochschulen. Ein gutes halbes Jahr später saß sie gemeinsam mit einer Kommilitonin namens Jessica in einem gut ausgestatteten Computerlabor im Campus Tempe der ASU – der wie eine Ferienkolonie mitten in der Wüste wirkt – und übte Annuitäten berechnen: Welche Summe aus Zins- und Tilgungszahlungen ergibt sich, wenn man einen Kredit mit festem Zinssatz in einer vorgegebenen Zeit abzahlen will?

Von einem mittels Software simulierten Steuerpult aus konnten die beiden per Mausclick Videos, digitalisierte Lehrbücher, Quizseiten und Übungsaufgaben anwählen und in ihrer eigenen Geschwindigkeit durcharbeiten. Nicht nur ihre Lösungen zu den Aufgaben, sondern alle ihre Aktionen am Computer wurden an einen Server übermittelt. Dort verglichen Prognosealgorithmen ihr Verhalten mit dem von Zehntausenden anderer Studierender und versuchten daraus zu erschließen, was Hawkins gerade lernte, was ihr Schwierigkeiten bereitete, was sie als Nächstes lernen, und vor allem, wie sie das tun sollte (Grafik S. 91).

Für Hawkins war es ungewohnt, von einem Computer zu lernen. »Ich will nicht lügen, am Anfang hat es mich echt genervt«, gibt sie zu. Für ihren Professor war es ebenfalls eine Umstellung. Der Mathematiker David Heckman war den Frontalunterricht gewohnt; nun musste er als wandernder Nachhilfelehrer auf Handzeichen jedem aushelfen, der nicht weiterkam. Bald erkannten beide jedoch auch Vorteile. Hawkins schätzte die Möglichkeit, in ihrer eigenen Geschwindigkeit und bei freier Zeiteinteilung – zum Beispiel zu Hause mit dem eigenen Laptop – zu arbeiten. Und Heckman konnte die Lernerfolge seiner Studenten besser im Auge behalten. Auf seinem Bildschirm war nicht nur zu sehen, wer mitkam und wer hinterherhinkte, sondern auch, an welchem Thema jeder gerade arbeitete. Bislang würde Heckman immer noch

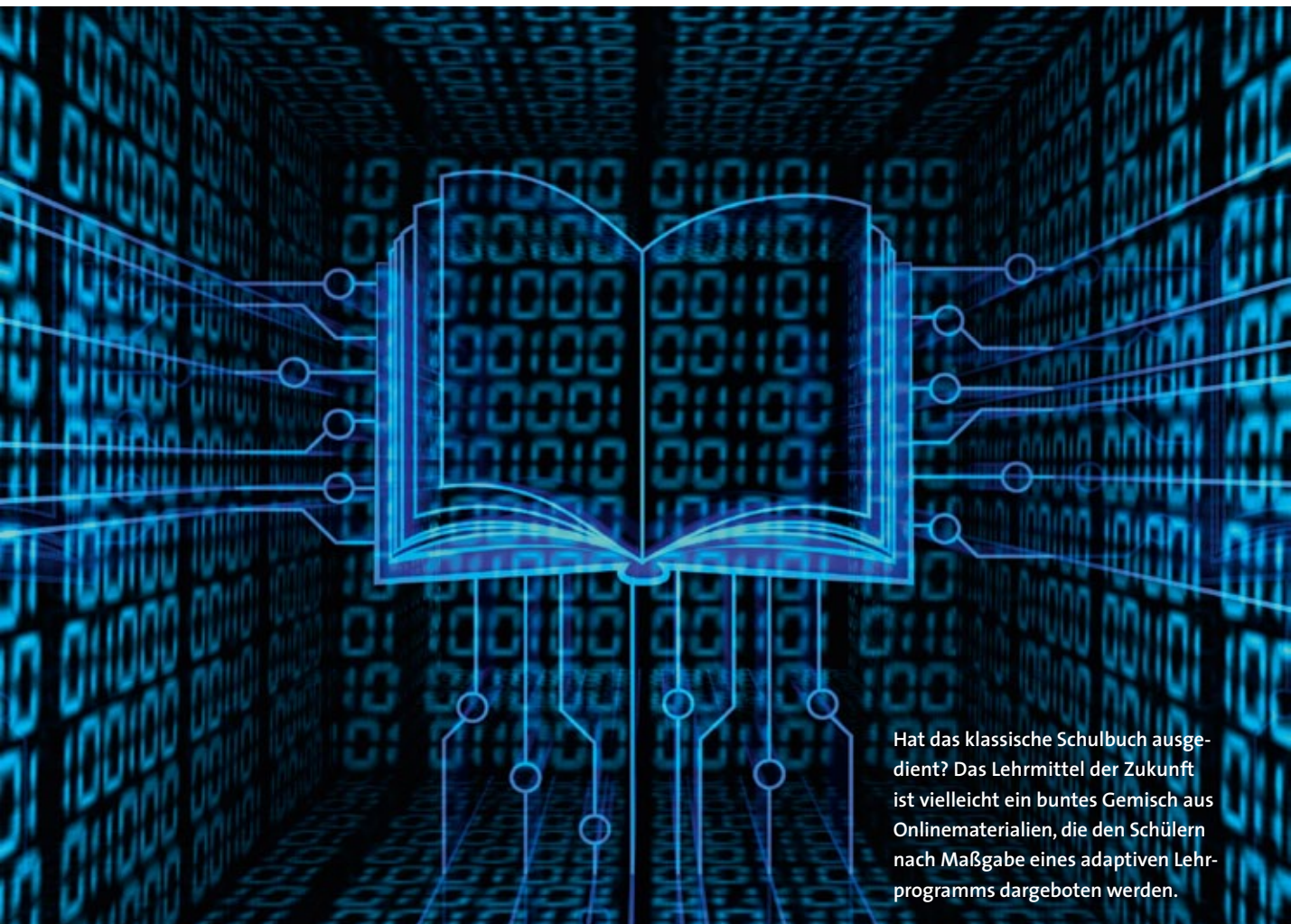
die herkömmliche Vorlesung bevorzugen, aber er scheint sich umzustellen. Zudem hält die Software für die Lehrkräfte ein besonderes Bonbon bereit: Sie übernimmt den größten Teil der Notengebung.

Die Entscheidung der Arizona State University, auf computergestütztes Lernen umzustellen, war zumindest teilweise aus der Not geboren. Die mit über 70 000 Studenten größte staatliche Universität der USA hat wie jede Einrichtung des öffentlichen Bildungswesens mit einschneidenden Veränderungen zu kämpfen. In den letzten fünf Jahren wurde die staatliche Förderung halbiert. Gleichzeitig schreiben sich immer mehr Studenten ein, und ein erschreckend hoher Anteil bringt nicht genug Vorkenntnisse von der Schule mit. »Wir versuchen eine Unmenge von Leuten auszubilden, die bisher nie zu unserer Zielgruppe gehört haben«, erklärt Al Boggess, der Direktor des mathematischen Instituts. »Die Politiker sagen: ›Bildet sie aus. Förderunterricht? Ihr schafft das schon. Und sie sollen in vier Jahren ihren Abschluss haben. Und außerdem kürzen wir eure Gelder.«

Big Data übernimmt die Bildung

Vor zweieinhalb Jahren begaben sich die Leiter der ASU auf die Suche nach einer wirksameren Methode, Studenten durch das Grundstudium zu schleusen – insbesondere in Kursen wie Mathematik, an denen unverhältnismäßig viele scheitern. Wenige Monate nachdem Jose Ferreira, Gründer und Chef des Start-up-Unternehmens Knewton aus New York, seine adaptive Lernsoftware in einer Präsentation vorgestellt hatte, unternahm die Universität einen gewagten Schritt. Im Herbst 2011 setzte sie ohne große Diskussion oder Vorwarnung 4700 Studenten in computergesteuerte Mathematikurse. Ein Jahr später waren es schon 7600 Personen in drei Anfängerkursen mit Knewton-Software, die von 50 Dozenten betreut wurden. Bis zum kommenden Herbst will die ASU das System um sechs Kurse und damit auf 19 000 weitere Studenten ausdehnen.

Die Arizona State University hat die datengestützten, personalisierten Lernmethoden ungewöhnlich rasch und kon-



Hat das klassische Schulbuch ausgedient? Das Lehrmittel der Zukunft ist vielleicht ein buntes Gemisch aus Onlinematerialien, die den Schülern nach Maßgabe eines adaptiven Lehrprogramms dargeboten werden.

ISTOCKPHOTO / ALENGO

sequent eingeführt; aber sie ist damit keineswegs allein. Bildungseinrichtungen aller Art suchen nach ähnlichen Hilfsmitteln im Kampf mit steigenden Schülerzahlen, sinkender Finanzierung und höheren Erfolgsanforderungen. Öffentliche Schulen in 45 US-Bundesstaaten und der Hauptstadt Washington führen gegenwärtig mit großer Eile neue, anspruchsvollere Lernziele für Englisch und Mathematik ein, die »Common Core State Standards«. Für die Umsetzung benötigen alle diese Schulen nicht nur neue Lehrmittel, sondern auch Tests. Etwa die Hälfte von ihnen wird online und adaptiv sein; das heißt, ein Computer wird die Fragen auf die Fähigkeiten jedes einzelnen Schülers abstimmen und aus den Antworten die Note berechnen. Weitere adaptive Programme, mit denen Schulen derzeit experimentieren, reichen vom Rechnen und Lesen in Grundschulen bis zur Vorbereitung auf die Prüfungen im »Advance Placement«, einem Programm, das College-Kurse für begabte Schüler anbietet.

Auch in anderen Teilen der Welt fasst die Technologie Fuß. Die für 2015 geplante Fassung des Pisa-Tests (Programme for International Student Assessment) der OECD, dem alle drei Jahre 15-Jährige in bisher mehr als 70 Ländern unterzogen werden, wird adaptive Komponenten enthalten, die schwer

messbare Fähigkeiten wie etwa die zum kooperativen Problemlösen bewerten sollen.

Befürworter des adaptiven Lernens argumentieren, die neue Technik bringe endlich den individuellen Unterricht für alle zu bezahlbaren Kosten, weg von der fabrikartigen Massenabfertigung, die seit 200 Jahren das Bildungssystem der westlichen Länder dominiert. Kritiker entgegnen, dass gerade das datengestützte Modell die Schulen in Lernfabriken zu verwandeln drohe. Die zunehmende Digitalisierung sei nichts weiter als der Versuch profitorientierter Unternehmen, unter dem Etikett »Reform« Lehrern und Schülern ihre Produkte aufzudrücken. Was die Computer jetzt gerade mit Mühe lernten, nämlich die Stärken und Schwächen jedes Schülers einzuschätzen und ihm daraufhin die richtigen Lernmittel und Aufgaben an die Hand zu geben, das beherrschten die menschlichen Lehrer schon seit mehreren hundert Jahren. Statt genau diese Kernkompetenzen an den Computer zu delegieren, sollte man das Geld lieber dafür ausgeben, gute Lehrer auszubilden, sie einzustellen und ihnen akzeptable Arbeitsbedingungen zu bieten.

Zwar beteuern die Softwareanbieter, dass es ihnen nur um die Zukunft der Kinder gehe, aber sie bestreiten nicht, dass hier auch ein großes Gewinnpotenzial liegt. Dutzende

von Firmen drängen auf den milliardenschweren Markt für Lehrtechnologie. Vom Kindergarten bis zum Highschool-Abschluss, jenem Bereich, der in den USA unter der Bezeichnung K-12 zusammengefasst wird, werden bereits 20 Prozent der Lehrinhalte digital vermittelt, so Adam Newman von der Marktanalysefirma Education Growth Advisors. Bislang mache adaptive Lernsoftware mit etwa 50 Millionen Dollar nur einen kleinen Teil davon aus, aber das könne sehr rasch mehr werden. »Das Konzept der Adaptivität ist mehr im Bereich K-12 zu Hause als in der höheren Bildung«, so Newman. »Das liegt daran, dass der Schwerpunkt bei K-12 schon seit Jahren auf differenzierenden Lehrmethoden liegt. Das ist auch ohne Technik eine Form der Adaptation.«

Entscheidungssträger im Hochschulbereich erwärmen sich allmählich ebenfalls für dieses Thema. In einer kürzlich durchgeführten Meinungsumfrage zur höheren Bildung stuften 66 Prozent aller Hochschulpräsidenten das Thema adaptive Lern- und Prüfungstechnologien als »viel versprechend« ein. Die Stiftung des Microsoft-Gründers Bill Gates vergibt im Rahmen ihres »Adaptive Learning Market Acceleration Program« je 100 000 Dollar an zehn Colleges und Universitäten für die Entwicklung adaptiver Kurse unter der Bedingung, dass sich drei Semester lang mindestens 500 Teilnehmer für einen solchen Kurs einschreiben.

Die Wissenschaft von der Adaptivität

»In etwa 20 Jahren wird praktisch jeder Kurs eine adaptive Komponente enthalten«, meint Peter Stokes, ein Experte für digitale Bildung an der Northeastern University in Boston. Er hält das für eine gute Sache, auch weil es eine bisher nie da gewesene Gelegenheit biete, das Lernen mit wissenschaftlichen Mitteln zu untersuchen. Insbesondere an Hochschulen haben nur »sehr, sehr wenige Dozenten eine formale Ausbildung in Wissensvermittlung«, sagt er. »Wir machen irgendetwas und glauben, dass es funktioniert. Aber wenn wir mit wissenschaftlichen Mitteln nachmessen, merken wir, dass das jeder empirischen Grundlage entbehrt.«

Nach allgemeinem Konsens nennt man eine Lernsoftware »adaptiv«, wenn sie permanent die Denkgewohnheiten eines Schülers auswertet und das Material automatisch daran anpasst. Was aber »echt adaptiv« ist, darüber streiten sich die Anbieter naturgemäß heftig. Nach Meinung einiger zählt die Einfachversion, die lediglich die nächste Frage danach auswählt, ob die letzte richtig beantwortet wurde, also einem schlichten binären Entscheidungsdiagramm folgt, heute nicht mehr dazu. Vielmehr müsse eine ernst zu nehmende adaptive Software für jeden Benutzer ein psychometrisches Profil erstellen und fortlaufend Erkenntnisse über dessen Lernfortschritt sammeln.

Dazu muss der Hersteller einer adaptiven Software zunächst alle Konzepte in einer Unterrichtseinheit strukturiert miteinander verknüpfen. Jedes Mal, wenn ein Schüler ein Video ansieht, eine Erklärung liest, eine Übungsaufgabe löst oder in einem Test seine Kreuzchen macht, geht eine Meldung an einen Server. Daraus ermittelt ein weiteres Programm

AUF EINEN BLICK

DATENGESTÜTZTER UNTERRICHT

- 1 Zunehmend wird der klassische Unterricht in den USA durch das Arbeiten mit **adaptiver Lernsoftware** ersetzt.
- 2 Ein solches Lehrprogramm erstellt aus dem Verhalten des Lernenden ein **psychometrisches Profil** und passt daraufhin den dargebotenen Lehrstoff und die Übungen an seine Person und seinen Leistungsstand an.
- 3 Die Erfassung der Schulkarriere jedes Schülers in einer zentralen Datenbank ist an **massiven Datenschutzbedenken** gescheitert.

nicht nur den Leistungsstand des Schülers, sondern zum Beispiel auch, um wie viel das Betrachten dieses speziellen Videos die Punktzahl bei jener speziellen Testfrage im Durchschnitt erhöht. Weitere Algorithmen vergleichen den Schüler mit Tausenden oder Millionen seinesgleichen und suchen nach Mustern. Vielleicht stellt sich heraus, dass sich Schüler X mit demselben Begriff schwertut wie andere Schüler mit einem bestimmten psychometrischen Profil, dass diesen anderen aber Lerneinheit Y auf die Sprünge geholfen hat. Daraufhin wird die Software dem Schüler X Lerneinheit Y ans Herz legen. Anhand von Milliarden Datenpunkten zu Millionen Lernenden und mit ausreichend Rechenkapazität und Erfahrung sollten diese Algorithmen alle möglichen Vorhersagen treffen können. Wenn das System Sie gut genug kennt, weiß es, dass für Sie die beste Zeit, die Sache mit den Exponenten endlich zu begreifen, zwischen 9.42 Uhr und 10.03 Uhr liegt.

Ulrik Juul Christensen, Chef des Unternehmens Area9, kann auch mit etwas allgemeingültigeren Erkenntnissen aufwarten. Derzeit lernen etwa zwei Millionen Schüler und Studenten, in Kursen oder allein, Dutzende von Themen mit Hilfe der adaptiven Software LearnSmart, für die seine Firma die Datenanalyse durchführt. Nach dem Ergebnis seiner Forschungen behalten wir ein neues Wort oder Faktum am besten, wenn wir es just zu dem Zeitpunkt zum zweiten Mal vorgelegt bekommen, in dem es gerade aus der Erinnerung zu verschwinden droht. Um diesen kritischen Moment möglichst genau zu treffen, berechnet die Lernsoftware von Area9 mit Hilfe von Algorithmen die individuelle Vergesskurve jedes einzelnen Lernenden.

Rückschlüsse

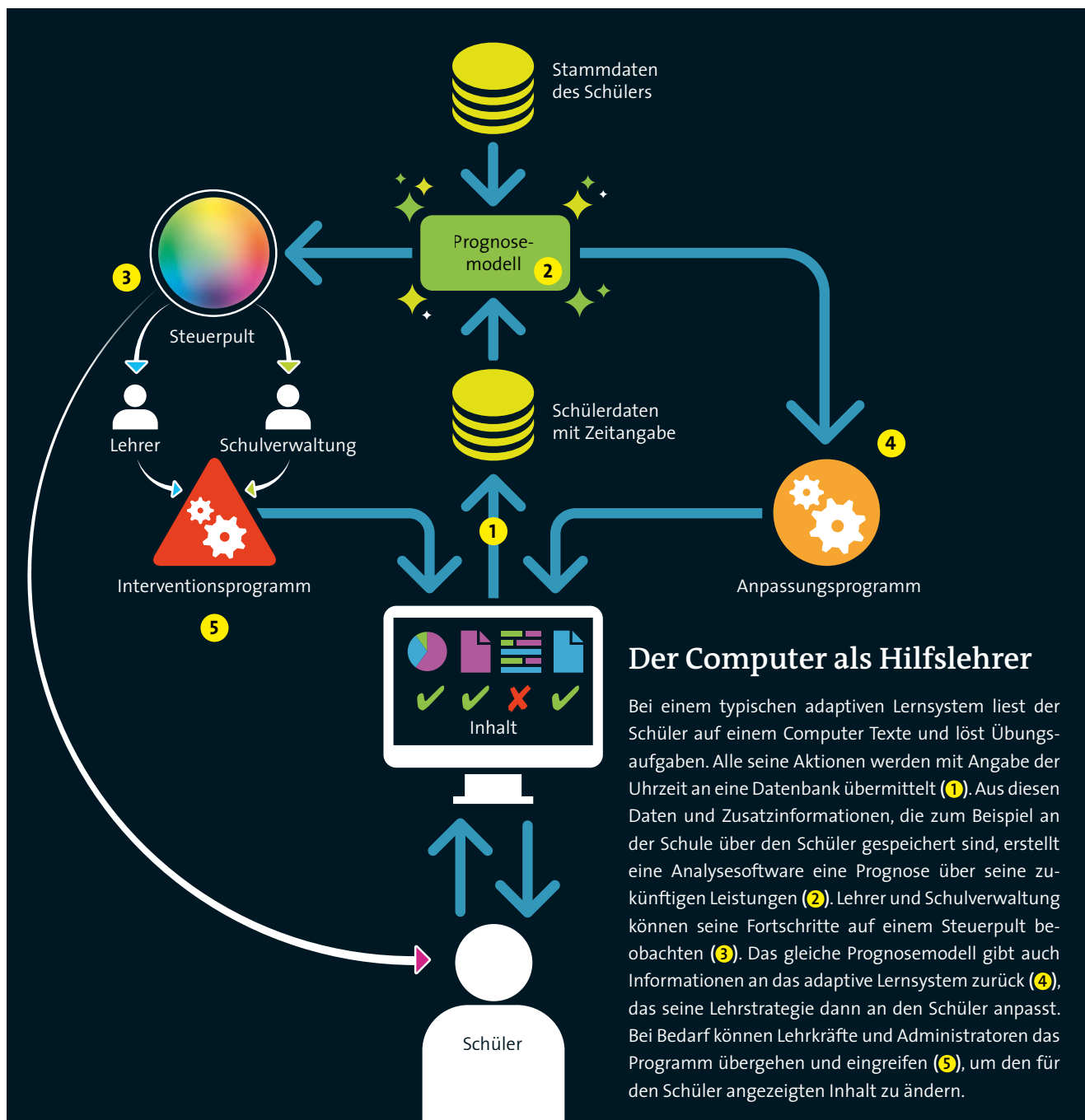
Kaum ein menschlicher Lehrer kann eine solch vorausschauende Lehrstrategie für sich in Anspruch nehmen. Christensen lehnt jedoch die Vorstellung ab, dass Computer Lehrer jemals ersetzen könnten. »Ich halte uns nicht für so dumm, dass wir die Bildung unserer Kinder Computern überlassen würden«, meint er.

Das Computerlernen trifft nicht auf allgemeine Zustimmung. Im März letzten Jahres reichte der Geschichts- und Sozialkundelehrer Gerald J. Conti von der Westhill High School in Syracuse (New York) seine Kündigung ein – und veröffent-

lichte deren Text auf seiner Facebook-Seite. Offenbar traf die dort formulierte beißende Kritik einen Nerv; jedenfalls verbreitete sie sich mit Windeseile durchs Internet. »In ihrer Gier nach Bundeszuschüssen«, schrieb er, »haben unsere [Bundesstaats-]Gesetzgeber uns verraten und unsere Kinder an Privatunternehmen wie Pearson Education verkauft«, den Giganten unter den Bildungsverlagen, der sich zur Entwicklung von Produkten mit Knewton zusammengetan hat. »Mein Beruf leidet unter einer Atmosphäre des Misstrauens, in der es Lehrern untersagt ist, Klausuren und Tests selbst zu entwerfen oder zu bewerten.« Conti zufolge führt »Big Data« nicht zu personalisiertem Lernen für alle, sondern zu einer

Bildungs-Monokultur: »Die MINT-Fächer [Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften, Technik] beherrschen das Feld. »Datengesteuerte« Bildung strebt nur nach Einheitlichkeit, Standardisierung, Tests und einem sklavischen Festhalten an den oberflächlichen Common Core Standards.«

Conti ist mit seinem Widerstand gegen eine technikorientierte, testbetonte Bildungsreform nicht allein. Im Januar 2013 stimmten die Lehrer der Garfield High School in Seattle für einen Boykott des MAP-Tests (Measures of Academic Progress), mit dem in ausgewählten Schulbezirken landesweit die Leistungen von Schülern bewertet werden sollten. Nach einer Auseinandersetzung mit den örtlichen Schulbehörden



ANNO GHELI, NACH U.S. DEPARTMENT OF EDUCATION, TECHNOLOGY ENHANCING TEACHING AND LEARNING THROUGH EDUCATIONAL DATA MINING AND LEARNING ANALYTICS, AN ISSUE BRIEF, WASHINGTON, D.C. 2012

Big Brother ausgebremst

Grenzenloses Datensammeln für den computergesteuerten Unterricht?

Am Anfang stand die reine Menschenfreundlichkeit. Die Stiftung des Microsoft-Gründers Bill Gates und seiner Frau Melinda wollte etwas Gutes tun – der Menschheit im Allgemeinen und den amerikanischen Schulkindern im Besonderen. Denen bleiben nämlich bislang die Segnungen des computergesteuerten Unterrichts weitgehend vorenthalten, weil die Schülerdaten in einer Vielfalt inkompatibler Formate vorliegen. Die Anbieter von Lernsoftware müssten also ihre Ware an die Eigenheiten der jeweiligen Schule anpassen, was zu erträglichen Kosten nicht machbar ist.

Also taten sich die Bill and Melinda Gates Foundation und die ehrwürdige Carnegie Corporation of New York, eine Stiftung, die seit 1911 »den Fortschritt und die Verbreitung von Wissen und Verständnis« fördert, zusammen und spendierten 100 Millionen Dollar Anschubfinanzierung für ein Projekt namens »Shared Learning Collaborative«, das später in eine gemeinnützige Firma (»non-profit corporation«) namens »inBloom« umbenannt wurde. Das Unternehmen stellte Speicherplatz für Schülerdaten in einer »Cloud« bereit, einem Computerverbund, der von dem Onlinehändler Amazon betrieben wird, und zwar in einem einheitlichen Format, so dass Anbieter von Lernprogrammen ohne Schwierigkeiten auf Daten aus allen beteiligten Schulen zugreifen konnten.

Anfang 2013 schloss inBloom Kooperationsabkommen mit den Schulbehörden von neun amerikanischen Bundesstaaten – und war allem Anschein nach völlig überrascht, als die Eltern der Schüler massenhaft Sturm gegen die Datensammlung liefen. Auf Grund der Proteste stiegen sechs der neun Bundesstaaten wieder aus dem Projekt aus. Im Staat New York, der ursprünglich geplant hatte, die Dienste von inBloom flächendeckend in Anspruch zu nehmen, wurden in den vergangenen Monaten die Datenschutzbestimmungen so verschärft, dass die Firma offensichtlich ihre Geschäftsgrundlage schwinden sah. Jedenfalls kündigte sie am 21. April dieses Jahres die – vorläufige – Einstellung ihres Betriebs an. Der mit landesüblichem Überschwang formulierte Abschiedsbrief des Vorstandsvorsitzenden Iwan Streichenberger (www.inbloom.org) läuft auf die Aussage hinaus, man sei seiner Zeit voraus gewesen und werde am »Aufbau der öffentlichen Akzeptanz« noch viel zu arbeiten haben.

Wer die europäische Datenschutzdiskussion mitverfolgt hat, kann über so viel Naivität nur fassungslos den Kopf schütteln. Noch ist auf der Website von inBloom die komplette Beschreibung der mehreren hundert Datenfelder verfügbar, welche die Schulen mit Einträgen über ihre Schüler füllen sollten. Neben den üblichen Einträgen wie Name, Geburtsdatum, Adresse, bisher besuchte Schulen und erzielte Noten finden sich Kästchen, in denen man detailliert Fehlzeiten – aufgeschlüsselt

nach entschuldigt und unentschuldigt –, Disziplinarmaßnahmen samt auslösendem Fehlverhalten und die familiäre Situation zu Hause ankreuzen kann. Der »Datenrucksack«, den die inBloom-Leute bereitgestellt haben, enthält nicht nur die Bewertung jeder einzelnen Hausaufgabe, sondern praktisch alles, was das Kind im Lauf seiner Schulzeit angestellt hat.

Ein echter »Big Brother«-artiger Bösewicht ist nicht auszumachen. Anscheinend hat inBloom die Schulen gefragt, was sie über ihre Schüler zu speichern pflegen, und dann eine Datenstruktur geschaffen, in der das alles Platz hat. Die naheliegende Frage nach dem Zweck der umfassenden Schnüffelei hat inBloom nicht beantwortet; eine solche Antwort wäre auch schwergefallen. Welcher Anbieter adaptiven Lernmaterials würde wohl einen Sinn darin sehen, eine Lerneinheit »Bruchrechnung für gewaltbereite Kinder« zu entwickeln?

Es gab ein Datenschutzgesetz für Schülerdaten, den »Family Educational Rights and Privacy Act« (FERPA) von 1974. Eigens für dieses Großprojekt hatte das Bildungsministerium 2011 die Ausführungsbestimmungen aufgeweicht – und wurde dafür von der Bürgerrechtsgruppe EPIC (Electronic Privacy Information Center) verklagt.

Die Firma inBloom rühmt sich ihrer Datensicherungsmaßnahmen: Bei ihnen seien die Schülerdaten besser geschützt als auf jedem Schulserver. Das kann sogar stimmen. Aber man stelle sich einen Geheimdienst vor, der Daten aller Art auf Vorrat sammelt: Vielleicht möchte man ja in 20 Jahren die Tatsache, dass Herr X zu Schulzeiten häufig gekifft hat, gegen ihn verwenden. Dafür lohnt es nicht, in das Computersystem jeder Kleinstadtsschule einzubrechen; in die Cloud aber schon.

Zusätzlich war dem Ruf der Firma abträglich, dass sie Anträge einzelner Eltern, die Daten ihres Kindes aus dem Datenpool zu löschen, ablehnte und keine klare Antwort auf die Frage gab, wer genau welche Zugriffsrechte erhalten sollte. Allem Anschein nach wollte man sich die Menge der zahlenden Kunden, allen voran die Anbieter von Lernsoftware, nicht einschränken lassen.

Nach dem Ende von inBloom sehen auch die Befürworter von Projekten wie einer nationalen Patientendatenbank ihre Chancen schwinden – zu Recht. Aber wie wäre es, wenn diese Leute, statt öffentlich Tränen zu vergießen, nach Abhilfe suchen würden? Es gibt durchaus Möglichkeiten, Daten zu aussagekräftigen Statistiken zusammenzufassen, ohne dabei Einzelpersonen bloßzustellen.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Christoph Pöppe

setzten die Lehrer ihren Boykott fort, der sich bald auf weitere Schulen in Seattle ausbreitete. Lehrkräfte in Chicago und andernorts veranstalteten Solidaritätskundgebungen. Immerhin wurde Mitte Mai desselben Jahres den Highschools in Seattle freigestellt, den MAP-Test durch eine andere Beurteilung zu ersetzen.

Solche Proteste würden die Verfechter des datengestützten Lernens wenig beeindrucken, wenn sie stichhaltig belegen könnten, dass ihre Methoden den herkömmlichen überlegen sind. Aber das gelingt ihnen nicht – zumindest bis jetzt nicht. Selbst Darrell M. West, ein Befürworter des adaptiven Lernens und Gründer des Zentrums für technische Innovation an der Denkfabrik Brookings Institution in Washington, hält die bisherigen empirischen Beweise für »vorläufig und nebelhaft«.

Wollte man alte und neue Methoden korrekt vergleichen, müsste man alle »Nebeneffekte« herausrechnen. Aber deren gibt es viele: Die Klassengrößen haben sich verändert; es gibt »flipped classrooms«, das heißt in Umkehrung des bisherigen Verfahrens finden die Hausaufgaben in der Klasse und das Lernen zu Hause oder zumindest zu einer vom Schüler gewählten Zeit statt; vielleicht liegt ein Lernfortschritt ja an einem gut gemachten Video und nicht daran, dass dieses Video nach Maßgabe einer adaptiven Lernsoftware verabreicht wurde. Die Arizona State University berichtet, dass nach Einführung der Knewton-Software die Bestehensquote im Mathematik-Förderkurs von 56 auf 78 Prozent angestiegen sei. Gleichzeitig aber wurden die Richtlinien geändert: Studenten der Universität dürfen die Kurse nun ohne zusätzliche Kosten wiederholen oder auf zwei Semester strecken.

Angst vor dem Datenkraken

Doch selbst wenn die adaptiven Technologien nachweislich hervorragende Ergebnisse liefern würden, bleiben immer noch Datenschutzbedenken. Viele Menschen finden eine flächendeckende Sammlung psychometrischer Daten erschreckend. Das bekam die Firma inBloom drastisch zu spüren. Das Unternehmen stellte im Wesentlichen externen Speicherplatz für Daten von Schülern – Name, Adresse, Telefonnummer, Noten, Fehlzeiten und Ähnliches – in einem Format bereit, das Lernprogramme von Drittanbietern verarbeiten können. Als inBloom im Februar 2013 die Arbeit aufnahm, waren die Eltern entrüstet. Die Angst vor einer »nationalen Datenbank« mit Schülerinformationen ging um. Kritiker erklärten, Unternehmen würden über inBloom die vertraulichen Daten ihrer Kinder abgreifen, um damit – für teures Geld – eine Lösung für ein Problem anzubieten, das es gar nicht gibt. Am Ende sah sich inBloom gezwungen, den Betrieb einzustellen (Kommentar links).

Solche Bedenken mag man für übertrieben halten; aber die Pläne der Befürworter gehen noch wesentlich weiter. Ein aus den Daten erstelltes Profil eines Schülers soll ihn seine gesamte Schullaufbahn begleiten – und sogar darüber hinaus. Die Bildungsreforminitiative »Digital Learning Now« votiert in einem Arbeitspapier vom Herbst 2012 für die Ein-

führung eines »Datenrucksacks«. Ein digitales Zeugnisheft würde bereits im Kindergarten angelegt, so dass die Kinder schon zum ersten Schultag »Daten über ihre Lernvorlieben, ihre Motivation, ihre persönlichen Erfolge und ihre Leistungen im Lauf der Zeit« mitbringen. Während der Schulzeit würde der Rucksack mit allen Einzelheiten gefüllt, und am Ende, bei einer Bewerbung um einen Studien- oder Arbeitsplatz, könnte man doch bequem die gesammelten Ergebnisse als Referenzen vorzeigen. Bereits heute pflegen in Japan Manager, die mit der adaptiven Lernsoftware iKnow Englisch gelernt haben, ihre Punktzahlen im Lebenslauf aufzuführen.

Es ist nicht abzusehen, ob besorgte Eltern und frustrierte Dozenten den Vormarsch von Big Data im Bildungswesen aufhalten können. »Es wird kommen«, meint Eva Baker, die Direktorin des Zentrums für Bewertungsforschung der University of California in Los Angeles, »nicht nur ein bisschen, sondern massiv. Und zwar auch, weil es billiger sein wird als Lehrerfortbildungen.«

Das heißt nicht, dass Lehrer verschwinden. Es heißt auch nicht, dass die Schulen immer testbesessener werden. Im Gegenteil: Mit zunehmendem Methodenfortschritt verschwimmt der Unterschied zwischen Lehren und Testen. In einem rundum adaptiven Klassenzimmer werden Schüler ununterbrochen bewertet. Jeder Tastendruck und jeder Mausklick geht in ein Lernprofil ein. Die eine alles entscheidende Klausur mitsamt dem zugehörigen Nervenstress würde durch eine permanente Beobachtung ersetzt.

Lange zuvor werden wahrscheinlich viele Bedenken dem Generationswechsel zum Opfer gefallen sein. Was uns heute so fremd erscheint, wird den nächsten Jahrgängen so normal vorkommen wie heute schon Arnetia Hawkins und ihren Kommilitonen. Auch die Lehrer könnten sich daran gewöhnen. Zumindest Phil Regier, der stellvertretende Verwaltungsdirektor der Arizona State University, ist davon überzeugt: »Ich denke, eine deutliche Mehrheit der Dozenten würde das als einen guten Schritt ansehen. Davon abgesehen werden in drei Jahren 80 Prozent von ihnen nichts anderes mehr kennen.« ~

DER AUTOR



Seth Fletcher ist Redakteur bei »Scientific American«.

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/aug2013/learn-smart
Beispiel einer adaptiven Lerneinheit zum Ausprobieren: Hauptstädte der Bundesstaaten der USA

Diesen Artikel, weitere Literatur und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1288614



Giulia Enders

Darm mit Charme**Alles über ein unterschätztes Organ**

Mit Illustrationen von Jill Enders

Ullstein, Berlin 2014

285 S., € 19,99

MEDIZIN

Das verkannte Tabu-Organ

Unser Darm prägt nicht nur unsere Gefühlswelt, sondern beeinflusst überhaupt unsere Gesundheit maßgeblich.

Was haben Depressionen, Allergien, Übergewicht, Selbstmordgedanken, Autounfälle und Schizophrenie mit unserem Darm zu tun? Vieles! Denn die Bakterien in unserem Verdauungsorgan helfen nicht nur beim Verwerten der Nahrung, sondern beeinflussen direkt unser Gemüt und unser Immunsystem.

Wichtig für eine gute Gesundheit sei eine ausgewogene Darmflora mit möglichst wenigen »schlechten« und möglichst vielen »guten« Bakterien, schreibt die junge Medizindoktorandin Giulia Enders in diesem Buch. Mit Antibiotika ließen sich die Ersteren bekämpfen und mit prä- und probiotischen Lebensmitteln die Letzteren fördern. Enders widmet sich auch den Bakterien auf unserer Haut. Übertriebene häusliche Sauberkeit und zu häufiges Waschen des eigenen Körpers schaden ihnen und

damit uns. »Spült man den schützenden Fettsfilm (der Haut) zu oft ab, setzt man seine Haut wehrlos der Umgebung aus«, erläutert die Autorin. Bei zu häufigem Duschen vermehren sich Bakterien, die üble Gerüche verursachen, und verdrängen geruchsneutrale Mikroben – mit der Folge, dass man beim Schwitzen stärker riecht.

Enders, die derzeit am Institut für Mikrobiologie und Krankenhaushygiene in Frankfurt am Main forscht, gibt in ihrem Erstlingswerk einen umfassenden Einblick in die Welt unserer mikrobiellen Untermieter. Sie beantwortet, was in puncto Sauberkeit als normal und gesund gelten kann, sie erklärt den Sinn von Spuckverboten, gibt hilfreiche Tipps gegen Verstopfung und andere Verdauungsprobleme und erörtert, warum Pupsen eine gesunde Pflicht ist. Ihr Themenspektrum erstreckt sich von der Entwicklung des Darms im Fötus über die Aufnahme der ersten Bakterien während der Geburt, über die frühkindliche Prägung des Immunsystems, Darmkrankheiten und Verdauungsprobleme bis hin zur Wirkung von Antibiotika. Aus ihrem Buch geht gut nachvollziehbar hervor, warum man den Darm zu Recht als zweites Gehirn bezeichnen kann.

Zu den zahlreichen Mikroorganismen, die unseren Darm besiedeln, gehört auch *Escherichia coli* – hier auf einem Elektronenmikroskopbild.

Dem Werk mangelt es nicht an unterhaltsamen, aufschlussreichen Anekdoten. So beschreibt Enders, der russische Immunologe Ilja Metschnikow (1845–1916) habe schon Anfang des 20. Jahrhunderts geahnt, wie wichtig bestimmte Bakterien für uns sind. Er mutmaßte, das Geheimnis des langen Lebens bulgarischer Bergbauern liege in den Lederbeuteln begründet, in denen sie ihre Milch beförderten. Bei längerem Transport wurde die Milch darin sauer, bewirkt durch »gute« Bakterien, und somit zu einer Art probiotischem Getränk. Dessen Verzehr ließ – wie Metschnikow annahm – die Bauern sehr alt werden. An anderer Stelle erläutert Enders, warum der »Abgang« von Wein so individuell schmeckt. Schuld daran seien wiederum Mikroben, diesmal jene auf der Zunge. Sie fingen bereits während der Nahrungsaufnahme damit an, die Nährstoffe abzubauen. Da sie dafür Zeit bräuchten, entfalte sich der Geschmack des Weins teils erst verzögert und bringe den Nachgeschmack hervor.

Im verständlichen Vermitteln wissenschaftlicher Erkenntnisse kann die Autorin reichlich Erfahrung vorweisen. Mit dem Vortrag »Darm mit Charme«, der zum Youtube-Hit avancierte, gewann sie 2012 den ersten Preis des Science Slam in Freiburg. Auch ihr Buch ist leicht zu verstehen, witzig und sympathisch. Fakten belegt Enders ausführlich mit Literaturverweisen. Ein besonderer Pluspunkt sind die Zeichnungen ihrer Schwester Jill, die den Band unterhaltsam und teils ulkig bebildern.

Alles im allem kann man »Darm mit Charme« als gelungenes Werk bezeichnen. Mitunter ist der Inhalt allerdings derart vereinfacht, dass darunter die Korrektheit leidet, etwa wenn die Autorin schreibt, die Blutgruppe käme durch Darmbakterien zu Stande. Trotzdem hat man nach der Lektüre das Gefühl, sich selbst und den Darm ein wenig besser zu verstehen und bewusster mit dem Körper umgehen zu können.

Sophia Guttenberger

Die Rezensentin ist Biologin und arbeitet als Journalistin in Nabburg.



FOTO: ERIC ERBE, KOLORIERUNG: CHRISTOPHER POOLEY / USDA-ARS, EMU



Konrad Vössing

Das Königreich der Vandalen

Geiserichs Herrschaft und das Imperium Romanum

Philipp von Zabern, Darmstadt 2014

207 S., € 24,95

GESCHICHTE

Meister der Anpassung

Bis heute werden die Vandalen mit blinder Zerstörungswut in Verbindung gebracht – dabei waren sie alles andere als kulturfeindliche Marodeure.

Die Stämme, die im Zuge der Völkerwanderung seit dem 3. Jahrhundert das Römische Reich heimsuchten und es schließlich zu Fall brachten, gelten bis heute als barbarische Horden. Dies trifft auf die Goten zu mit ihrem Anführer Alarich, auf die Hunnen mit ihrem König Attila – und insbesondere auf die Vandalen unter Führung Geiserichs, die geradezu archetypisch für Zerstörungswut stehen, leitet sich doch der Begriff »Vandalismus« von ihnen ab. Diesen miserablen Ruf verdanken sie dem französischen Geistlichen Henri Baptiste Grégoire (1750–1831), der den Bildersturm der Jakobiner mit der Wortschöpfung »vandalisme« geißelte. Der Begriff wurde schnell zum geflügelten Wort.

Konrad Vössing, Althistoriker an der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität Bonn, zeichnet ein anderes Bild von dem angeblich so destruktiven Volk. Die Vandalen waren ihm zufolge keine blindwütigen Zerstörer, sondern passten sich klug den Verhältnissen an, regierten als Staatengründer mit politischem Fingerspitzengefühl und besaßen einen Sinn für Kunst.

Vor dem Hintergrund des spätrömischen Verfalls und der Völkerwanderung beleuchtet der Autor sehr fesselnd die Geschichte der Vandalen – von den Anfängen des germanischen Volks bis zu seinem Untergang im Jahr 534. Ursprünglich siedelten die Vandalen im Großraum zwischen Oder, Bug und oberem Dnjestr, auf heute polnisch/ukrainischem Gebiet. Sie waren eine von

vielen germanischen Stammesgemeinschaften, ethnisch und kulturell bunt zusammengewürfelt, und gehörten im 5. Jahrhundert jener Völkerlawine an, die sich durch halb Europa wälzte und den Untergang des weströmischen Imperiums besiegelte. Die Vandalen marschierten durch Gallien und Hispanien (Iberische Halbinsel) bis nach Nordafrika, wo sie sich in der römischen Provinz Africa proconsularis, im heutigen Tunesien, eine neue Heimat eroberten.

Das Imperium als Vorbild

Dort errichteten sie nach 429 unter ihrem charismatischen Führer Geiserich ein florierendes Königreich, das mehr als 100 Jahre bestand – bis der oströmische General Belisar es im Jahr 534 zerstörte. In diesem Zeitraum erwiesen sich die vermeintlich kulturlosen Barbaren als außerordentlich geschickt. Innenpolitisch agierten sie maßvoll, legten eine erstaunliche religiöse Toleranz an den Tag und sorgten für relativ stabile Verhältnisse in ihrem Reich, obwohl sie nur die Minderheit der Bevölkerung stellten. Die Vandalen machten sich die altansässige Beamtenschicht dienstbar, nutzten den römischen Verwaltungsapparat und zeigten sich auch sonst sehr anpassungsfähig an die römische Kultur.

Dafür spricht nicht nur, dass vandalische Emporkömmlinge wie der Heerführer Stilicho in die römische Herrschaftskaste integriert wurden, sondern auch, dass die heidnischen Eroberer

zum christlichen Glauben übertraten und den römischen Lebensstil annahmen. Bereitwillig gaben sie sich dem provinzialrömischen Wohlleben hin, badeten in Wellnessanlagen, tafelten in luxuriösen Villen zu Tische liegend aus kostbarem Essgeschirr, veranstalteten Wagenrennen, übernahmen die lateinische Sprache, versahen ihre germanischen Namen mit lateinischen Endungen und ließen – wie zuvor die Römer – in Mosaiken ihre neue Leidenschaft in Szene setzen: die Jagd.

Trotz aller Affinität zum Imperium segelten die Vandalen 455 von Nordafrika aus übers Mittelmeer, um Rom zu plündern, was bei zeitgenössischen Chronisten Empörung auslöste. Zwar nahmen die »Barbaren« bei ihrem zweiwöchigen Raubzug alles mit, was nicht niet- und nagelfest war, doch praktizierten sie nicht das, was heute einen Täter zum »Vandalen« macht: blindwütige Zerstörung. Dafür schätzten sie die römischen Kunstwerke viel zu sehr. Dennoch beschädigten sie mit dieser Plünderung ihren Ruf unumkehrbar.

Das Vandalenreich kollabierte, als im 6. Jahrhundert die Mauren seine Grenzen bedrängten und der oströmische Kaiser Justinian von Konstantinopel aus die »byzantinische Rückeroberung« Nordafrikas einleitete. Mit diesem Versuch, die Region wieder mit dem Römischen Reich zu vereinen, endete das vandalische Experiment. Den letzten König Gelimer schickte General Belisar nach Kleinasien in den Ruhestand, die überlebenden Soldaten verfrachtete er als Kriegsgefangene nach Konstantinopel und gliederte sie in sein Heer ein. Die übrigen Vandalen gingen in der Bevölkerung Nordafrikas auf.

Vössings ausgezeichnetes Buch eröffnet dem Leser einen vorurteilsfreien Blick auf diesen germanischen Stamm, der den ersten souveränen »Barbarenstaat« auf römischem Boden etablierte. Ein empfehlenswertes Werk für alle Interessierten.

Theodor Kissel

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



Pedro G. Ferreira

Die perfekte Theorie

*Das Jahrhundert der Genies und
der Kampf um die Relativitätstheorie*

aus dem Englischen von

Norbert Juraschitz und Friedrich Pflüger

C.H.Beck, München 2013

320 S., € 24,95

PHYSIK

Einsteins großer Wurf

Der Astrophysiker Pedro Ferreira erzählt die Geschichte der allgemeinen Relativitätstheorie.

Was zeichnet eine erfolgreiche physikalische Theorie aus? Wie kann ihre Entwicklung spannend nacherzählt werden? Die Antwort gibt Pedro Ferreira, Professor für Astrophysik an der University of Oxford, in seinem jetzt auf Deutsch erschienenen Buch. Ferreira erzählt dort die Geschichte der allgemeinen Relativitätstheorie, angefangen von ihrer erstaunlichen Entstehung über die frühen Irritationen, die sie unter Physikern hervorrief, über ihre experimentelle Bestätigung bis hin zu ihrer heutigen und künftigen Bedeutung. Zwar versucht er dabei zentrale physikalische Ideen zu veranschaulichen, doch im Wesentlichen geht es ihm um die Menschen hinter der Theorie.

Am Beginn steht die Entdeckung durch den Physiker Albert Einstein (1879–1955). Sein Ziel war es, die scheinbare Unvereinbarkeit der newtonschen Bewegungsgesetze und der maxwellischen Gleichungen des Elektromagnetismus zu überwinden. Dies gelang ihm mit der speziellen Relativitätstheorie. Darin werden Raum und Zeit nicht mehr getrennt und als absolute Größen betrachtet, sondern zu einer »Raumzeit« zusammengefasst. Doch Einstein erkannte, dass der Entwurf nicht vollständig war, da er die Schwerkraft nicht berücksichtigte. Durch eine Verallgemeinerung der Theorie gelang es ihm, Gravitation mittels der Raumzeitgeometrie zu beschreiben. Eine entscheidender Gedanke dabei kam dem Physiker während der Arbeit im Berner Pa-

tentamt: »Wenn sich eine Person im freien Fall befindet, dann spürt sie ihr eigenes Gewicht nicht.« Ferreira macht klar, dass Einsteins Genialität in seiner physikalischen Intuition lag – die ihn allerdings später auch öfter irren ließ.

Mit fremden Ausdrücken jonglieren

Einstein war klar, dass er zum Ausformulieren seiner Theorie »eine neue Art von Sprache brauchte«. Hierfür musste er die relativ neue Differentialgeometrie verinnerlichen und anwenden können. Ferreira vergleicht das Unterfangen damit, ohne Vorkenntnisse das altindische Sanskrit zu lernen und dann einen Roman in dieser Sprache zu schreiben. Die ersten experimentellen Belege für die allgemeine Relativitätstheorie lieferte 1919 der Astrophysiker Arthur Eddington (1882–1944), indem er die darin vorhergesagte Ablenkung von Lichtstrahlen durch die Sonne nachwies. Später wurde aber bezweifelt, dass seine damaligen Beobachtungen genau genug dafür gewesen waren.

In den folgenden Passagen umreißt Ferreira, wie führende Physiker darum rangen, Einsteins Ideen zu durchdringen und ihre Konsequenzen zu erkennen. Unter anderem geht es um den russischen Physiker Alexander Friedmann (1888–1925), der auf Grundlage der einsteinschen Gleichungen die Möglichkeit eines dynamisch veränderlichen Universums herleitete. Auch der belgische Priester und Wissenschaftler Georges Lemaître (1894–1966) wird

vorgestellt, der 1927 wohl als Erster die Grundzüge eines expandierenden Kosmos ausarbeitete und somit entscheidende Impulse zur späteren Urknalltheorie lieferte.

Weiterhin geht aus der allgemeinen Relativitätstheorie die Existenz Schwarzer Löcher hervor, denen sich ebenfalls ein Schwerpunkt im Buch widmet. Nachdem die Physiker Robert Oppenheimer (1904–1967) und Hartland Snyder (1913–1962) solche Objekte bereits 1939 beschreiben konnten, brach das Interesse an den »Massemonstern« in den 1940er und 1950er Jahren ab. Ihre Eigenschaften erschienen vielen – auch Einstein selbst – als zu kurios. Erst mit dem Physiker John Archibald Wheeler (1911–2008), der Schwarzen Löchern ihren Namen gab, nahm die Schwarzschildphysik wieder Fahrt auf.

Das Buch beleuchtet noch viele weitere Physiker und deren Prägung durch die allgemeine Relativitätstheorie: etwa Stephen Hawking und Roger Penrose (Singularitäten-Theorem, Informationsparadoxon und Urknalltheorie), James Peebles (Standardmodell der Kosmologie mit dunkler Energie und Materie) und Bruce DeWitt (Verhältnis der Relativitäts- zur Quantentheorie). Den Bemühungen, Relativitätstheorie und Quantenmechanik zu vereinen, etwa in der Stringtheorie, geht Ferreira im letzten Teil seines Buchs nach.

Alles in allem liefert der Autor eine umfassende, erhellende Darstellung. Obwohl er auf eine Vermittlung der eigentlichen Physik fast vollständig verzichtet, schafft er es, das Publikum mit seiner offensichtlichen Leidenschaft für das Thema anzustecken. Allerdings kann man angesichts der vielen Exkurse zu wichtigen Persönlichkeiten hin und wieder den Überblick verlieren. Zudem stören die häufigen Superlativformulierungen. Davon abgesehen geht das Lesen meist mühelos voran, zumal die Übersetzung aus dem Englischen erfreulich gut gelungen ist.

Roland Pilous

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

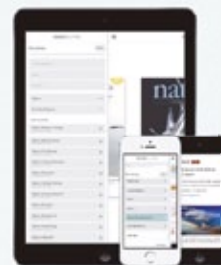
CUTTING EDGE

NATURE
NATURE BIOTECHNOLOGY
NATURE CELL BIOLOGY
NATURE CHEMISTRY
NATURE CLIMATE CHANGE
NATURE COMMUNICATIONS
NATURE GENETICS
NATURE IMMUNOLOGY
NATURE MATERIALS
NATURE MEDICINE
NATURE METHODS
NATURE NANOTECHNOLOGY
NATURE NEUROSCIENCE
NATURE PHOTONICS
NATURE PHYSICS
NATURE STRUCTURAL AND MOLECULAR BIOLOGY
BIOLOGICAL CHEMICAL EARTH MEDICAL PHYSICAL

Download the *Nature Journals* app for iPad, iPhone and iPod touch and gain access to over 30 cutting-edge Nature-branded titles. Subscribe to any journal in the app for just \$35.99*, or access all open access articles and news content for free. Tap in and discover more.

nature.com/appforall

*Apple exchange rates apply. Full access is also available through an existing personal or mobile subscription. Limited time offer available on all journals except *Scientific Reports*. iPad, iPhone and iPod touch are trademarks of Apple Inc.





Armin Reller, Heike Holdinghausen

Der geschenkte Planet

Nach dem Öl beginnt die Zukunft, Westend, Frankfurt a.M. 2014. 255 S., € 15,99

Wenn ein Professor für Ressourcenstrategie und eine taz-Redakteurin gemeinsam ein Buch über die künftige Energiepolitik schreiben, ist mit einem spannenden Ergebnis zu rechnen. Und tatsächlich – sie nehmen den Leser mit auf eine sowohl anregende als auch nachdenklich stimmende Reise. Sie beleuchten das Für und Wider von Energiepflanzen wie Raps, Biomasse wie Holz und stellen aktuelle Forschungsansätze vor – etwa die Nutzung der Fotosynthese von Algen und Bakterien, um Methan oder Wasserstoff zu gewinnen. Zudem beleuchten sie historische Hintergründe der Energiepolitik und umreißen deren wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Manche Leser mögen die vielen kulturgeschichtlichen Schlenker in dem Buch unnötig finden, doch steigern diese den Lesegenuss und zeugen zudem von intensiver Recherche der Autoren. Man erhält Einblick in die Komplexität des Themas, lernt eine Menge über regenerative Energieträger und bekommt Ideen präsentiert, wie die Zukunft aussehen könnte. **BETTINA PABEL**



Josef Schwickerath

Mobbing erfolgreich bewältigen

In vier Schritten aus der Mobbingfalle, Beltz, Weinheim und Basel 2014. 163 S., € 19,95

Ob direkte Angriffe oder zermürbende Psychospiele, ob von Kollegen ausgehend oder vom Chef: Das zielgerichtete Schikanieren von Mitarbeitern ist traurige Realität in unserer Arbeitswelt. Steigende Belastungen, Stellenabbau und ein wachsender Anteil befristeter Verträge erschweren solidarisches Zusammenarbeiten, verursachen Stress und bieten reichlich Nährboden für Konflikte. Werden daraus systematische Demütigungen, spricht man von Mobbing. Etwa drei bis vier Prozent der Angestellten in Deutschland leiden darunter, werden unglücklich und manchmal ernsthaft krank. Doch es gibt Wege, mit dem Problem umzugehen – Josef Schwickerath zeigt sie auf. Klar gegliedert, treffsicher formuliert und mit anschaulichen Fallbeispielen angereichert, erklärt der erfahrene Psychotherapeut, wie man Mobbing erkennt, welche Umstände dazu führen, wer in welcher Form daran beteiligt ist und was man dagegen tun kann. Ein hervorragendes Sachbuch und zugleich ein nützlicher Ratgeber. **MIRIAM BERGER**



Manuel Lauterbach, Christine Kumerics

Vulkane, Schluchten, Höhlen

Geologische Naturwunder in Deutschland, Primus, Darmstadt, 2014. 176 S., € 39,95

Die promovierten Geologen Manuel Lauterbach und Christine Kumerics stellen 16 geologisch interessante Orte in Deutschland vor. Sie beschreiben stark frequentierte Naturwunder wie die Bastei im Elbsandsteingebirge und den Königsstuhl auf Rügen, aber auch weniger bekannte Orte wie den Magnetberg bei Darmstadt. Das Buch eignet sich für geologisch Interessierte, die gern wandern und charakteristische Landschaftsgebilde aufsuchen, um mehr über Gebirge und Gesteine zu erfahren. Zahlreiche Fotos regen zu Erkundungstouren an, und die beigefügten Karten sowie GPS-Koordinaten können dabei als gute Hilfsmittel dienen. Die Kapitel fügen sich zwar in eine übergeordnete Struktur ein – vom ältesten zum jüngsten Naturwunder –, lassen sich aber auch unabhängig voneinander lesen. Ein Anhang mit Zeittafel und Glossar ergänzt die Texte und macht das Buch zum nützlichen Nachschlagewerk. **FENJA SCHMIDT**



Hans-Jörg Gilomen

Wirtschaftsgeschichte des Mittelalters

C.H.Beck, München 2014. 128 S., € 8,95

Der Autor, emeritierter Geschichtswissenschaftler, umreißt die Ökonomie des Mittelalters. In vier Abschnitten behandelt er die ausgehende Antike sowie das Früh-, Hoch- und Spätmittelalter. Er geht auf Eigentums- und Herrschaftsverhältnisse ein und widmet sich allen wichtigen Wirtschaftszweigen einschließlich Pflanzenanbau und Viehzucht, Salzgewinnung und Handwerk, Bergbau und Metallverarbeitung. Technische Neuerungen wie die Windmühle erörtert er ebenso wie die Verbreitung der Dreifelderwirtschaft, die Zunahme des Geldumlaufs und das Entstehen des Bankensektors. Besonders interessant sind jene Abschnitte, in denen es um die Bedeutung der Sklaven geht – auch und gerade auf kirchlichen Gütern – sowie um die wirtschaftlichen Auswirkungen der Pestepidemien. Empfehlenswert für alle, die sich knapp und dennoch umfassend informieren möchten. **FRANK SCHUBERT**



Die Zelle

Unser geheimes Universum

polyband / WVG 2014

Laufzeit 150 Minuten,

DVD ca. € 17,99

WISSENSCHAFTSHISTORIE

Streifzug durch die Biologiegeschichte

Eine dreiteilige BBC-Dokumentation stellt Forscher und Entdecker vor, die wesentliche Beiträge zur Zellbiologie geleistet haben.

Die Dokumentation »Die Zelle – unser geheimes Universum« erzählt von der Erforschung der kleinsten Einheiten von Lebewesen. In insgesamt drei Episoden besucht Wissenschaftsjournalist Adam Rutherford die Schauplätze wichtiger wissenschaftlicher Durchbrüche. Dabei schildert er etwa, wie der holländische Textilhändler Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723) die Einzeller entdeckte, wie der Physiologe Friedrich Miescher (1844–1895) erstmals Nukleinsäuren beschrieb und wie Wissenschaftler heute daran arbeiten, die ersten künstlichen Zellen zu erschaffen.

In Gesprächen mit Forschern und in nachgestellten Experimenten bringt Rutherford den Zuschauern die Wissenschaft nahe. Er schaut durch das private Reisemikroskop des britischen Botanikers Robert Brown (1773–1885) und liest in Büchern aus Charles Darwins persönlicher Bibliothek. Auf einem staubigen Dachboden in Berlin demonstriert er, wie Robert Remak vor mehr als 100 Jahren Hühnerembryonen präparierte und darin Zellteilungen beobachtete. Von den dabei gewonnenen Erkenntnissen profitierte der deutsche Arzt Rudolf Virchow (1821–1902). Weiterhin besucht Rutherford aktive Forscher wie den Schweizer Molekularbiologen Walter Gehring, der bekannt geworden ist durch seine Analysen homöotischer Gene und der dazugehörenden Homöoboxen.

An anderer Stelle stellt Rutherford den Versuchsaufbau des US-Biologen Stanley Miller (1930–2007) vor, mit dem dieser zeigte, dass unter den Bedingungen der irdischen Uratmosphäre spontan organische Lebensbausteine entstehen konnten. Auch das DNA-Modell aus Blech und Draht der berühmten Biochemiker James Watson und Francis Crick kommt vor, ebenso die Röntgenaufnahme ihrer Kollegin Rosalind Elsie Franklin (1920–1958), die den beiden Forschern entscheidende Hinweise auf die Doppelhelixstruktur des Erbmoleküls gab.

Die Dokumentation vermittelt gekonnt die Faszination von Wissenschaft und Entdeckerdrang. Rutherford überzeugt in seinem Auftreten. Er gibt dem Publikum eine Ahnung davon, wie aufregend es für die frühen Zellforscher gewesen sein muss, weit gehend auf sich gestellt und ohne teure Ausrüstung wissenschaftliche Durchbrüche zu erzielen. Zwar bekommen die Zuschauer kaum Animationen, mikroskopische Aufnahmen und anderes Bildmaterial zu sehen. Da die Dokumentation aber mehr von Personen handelt und weniger von komplexer Molekularbiologie, die es zu veranschaulichen gilt, fällt dies nicht ins Gewicht.

Nils Gensert

Der Rezensent studiert Wissenschaft – Medien – Kommunikation am Karlsruher Institut für Technologie.



Christiane Gelitz (Hrsg.)

Profiler & Co

Kriminalpsychologen auf den Spuren des Verbrechens

Ein Ehemann, der seine Frau erwürgt. Eine Krankenschwester, die ihre Patienten ermordet. Kriegsverbrecher, die Lust am Töten haben.

Im Dienste der Wahrheit arbeiten Polizei und Gerichte mit Psychologen und Hirnforschern zusammen. Wissenschaftler und Journalisten schildern, welche Methoden den Strafverfolgern beim Ermitteln helfen – Profiling, Computerprogramme, Verhörtechniken, Aussageanalyse, Lügendetektoren.

Fundiert und eindrücklich ergründen die Autoren Motive und Hintergründe von Verbrechen, erstellen psychologische Täterprofile und analysieren die Ursachen von Gewalt.

Auch die Bedeutung psychologischer und neurobiologischer Befunde für die Rechtsprechung wird beleuchtet. Wissenschaftler und Journalisten erzählen dazu wahre Geschichten aus der kriminologischen Forschung und Praxis.

2013. 172 Seiten, 16 Abb., kart.

€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)

ISBN 978-3-7945-2962-9

Jetzt bestellen!

Internet: www.schattauer.de/shop
E-Mail: order@schattauer-shop.de



 **Schattauer**
www.schattauer.de



Jürgen Trabant
Globalesisch oder was?
Ein Plädoyer für Europas Sprachen
 C.H.Beck, München 2014
 234 S., € 18,95

LINGUISTIK

Niedergang der Mehrsprachigkeit

Langfristig wird Englisch alle anderen europäischen Sprachen verdrängen, glaubt der Linguist Jürgen Trabant.

Erst kürzlich schrieb der Literaturwissenschaftler Karl-Heinz Göttert in dem Buch »Abschied von Mutter Sprache« (siehe SdW 12/2013, S. 99), die Befürchtung, das Deutsche werde vom Englischen niedergewalzt, sei übertrieben. Jetzt, nur wenige Monate später, legt der Romanist und Sprachwissenschaftler Jürgen Trabant ein »Plädoyer für Europas Sprachen« vor – gibt darin aber die Sache, für die er eintritt, im Grunde schon für verloren.

Der Autor warnt vor einem »intellektuellen Desaster«

Politische Bekenntnisse zur Mehrsprachigkeit, so Trabant, seien nur Sonntagsredenprosa; gemeint sei letztlich immer nur Einsprachigkeit: Englisch. Was uns Deutschen und anderen Europäern bevorstehe, sei die Diglossie, also die gesellschaftliche Zweisprachigkeit, in der wichtige Diskurse in Wissenschaft oder Wirtschaft in einer »Welt-sprache« (Englisch natürlich) geführt würden, während einheimische Sprachen nur noch in privatem Kontext gepflegt und darum auf lange Sicht aussterben würden. Als symptomatisch dafür könnte gelten, dass der Autor bis 2008 als Professor für Sprachwissenschaft am Institut für Romanische Philologie der Freien Universität Berlin firmierte, heute aber als Professor of European Multilingualism an der Jacobs University Bremen lehrt.

So also das düstere Bild, das Trabant von unserer sprachlichen Zukunft

malt – zu düster, will mir scheinen. Seine Aussage, das Deutsche sei eine verschwindende kleine Sprache »wie das Bretonische und Okzitanische«, ist wohl auch dann überzogen, wenn man nicht die Zahl der Sprecher, sondern den Willen zur »Bewahrung des Deutschen in hohen Diskursen« zum Maßstab nimmt. Im Übrigen finden besagte »hohe Diskurse« nicht nur in Wissenschaft und Wirtschaft statt, sondern auch in Schulen, auf Ämtern oder vor

Gerichten. Davon, dass dort bald kein Deutsch mehr gesprochen werden soll, ist keine Rede. Genau das wäre aber der Fall, wenn der von Trabant gewählte historische Vergleich, die französische Revolution, zutreffen würde: Die Akteure dieses Umsturzes betrieben die sprachliche Gleichschaltung Frankreichs recht brachial.

Hier zu Lande wird englischsprachige Literatur immer noch ins Deutsche übersetzt, englischsprachige Film- und Fernsehproduktionen immer noch synchronisiert. Trabant räumt selbst ein, dass im skandinavischen Raum im Berufsleben viel stärker auf das Englische zurückgegriffen werde, was aber beispielsweise die Schweden bislang nicht dazu bewogen hat, ihre Sprache aufzugeben. Soll man also Trabants Plädoyer abhaken als apokalyptisches Raunen eines Professors jenseits der Pensionierungsgrenze, der den Bedeutungsver-

lust seines geliebten Französisch nicht so recht verwinden kann?

Nein. Denn Trabant nimmt zielsicher die blinden Flecken aktueller Muttersprachendiskussionen ins Visier, wie es vermutlich nur einer kann, der in der Historie des Sprachdenkens so versiert ist wie er. Überzeugend legt er dar, dass Sprachen mehr sind als »transnationale Ressourcen in einer globalisierten Welt«, wie Vertreter des »sprachsoziologischen Kapitalismus« behaupten. Laut Trabant stellen regionale Sprech- und Schreibweisen nicht nur oberflächlich verschiedene Manifestationen einer universellen Sprache dar, sondern haben je eigene Weltsichten, Konzeptualisierungen und Denkweisen im Gepäck, deren Verlust ein »intellektuelles Desaster« wäre. Es komme nicht nur darauf an, was gesagt wird, sondern wesentlich auch, wie es gesagt wird. Demnach sitzen die großen Sprachvereinfacher und -vereinheitlicher einem Irrtum auf, wie der Autor schreibt, wobei er beeindruckend viele Zeugen aus Philosophie und Linguistik als Beleg anführt.

Besonders anregend erscheinen Trabants Ausführungen zur Mehrsprachigkeit, für die sich auch schon Göttert ausgesprochen hatte. Ihr Wert bestehe eben gerade nicht darin, eine Sprache quasi muttersprachlich zu erlernen und dann locker darin parlieren zu können, wie es dem Ideal heutiger Fremdsprachendidaktik entspricht. Wertvoll sei an der Mehrsprachigkeit vielmehr, sich der Mühe zu unterziehen, andere in ihrer Fremdheit zu verstehen. Und das bedeute: weniger selbst reden und mehr zuhören sowie lesen. Dass man auf Deutsch von jemandem sagt, er »könne« eine Sprache, auf Englisch aber, er »spreche« sie, ist in diesem Zusammenhang nicht ganz belanglos.

Eine Mehrsprachigkeit, die nur zum Ziel habe, sich europaweit eine Pizza bestellen zu können, sei keine, schreibt der Autor. Denn dafür reiche in der Tat das Englische aus. Trabant schwebt eine »hermeneutische« Mehrsprachigkeit vor, die sich des Englischen für praktische Belange und für berufliche Zwecke bedient, zusätzlich aber eine weitere

Sprache als »langue fraternelle«, als »Herzessprache« pflegt – als kulturelle Aneignung über reine Kommunikationsbedürfnisse hinaus. Das entspricht in mancher Hinsicht dem alten Ideal des Bildungsbürgertums.

Trabant beharrt auf dem Wert literarischer Traditionen, doch fragt man sich, ob diese heute wirklich noch kulturelle Identitäten begründen, und wenn ja, für wen. Möglicherweise folgt die sprachliche Vereinheitlichung ja nur aus einer kulturellen. In diesem Fall wäre, was der Autor vorschlägt, gewissermaßen bloß ein Kurieren von Symp-

tomen. Dass jedenfalls seine Vorstellung europäischer Mehrsprachigkeit kaum flächendeckend durchzusetzen sein wird, weiß er. Daher rührt auch sein Pessimismus. Doch unabhängig davon, ob er mit seinen düsteren Prognosen Recht behält oder nicht: Lesenswert ist sein in schlichter Eleganz und mit zartem Zynismus abgefasstes Plädoyer unbeding.

Vera Binder

Die Rezensentin ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften, Klassische Philologie, der Universität Gießen.



Florian Freistetter

Die Neuentdeckung des Himmels

Auf der Suche nach Leben im Universum

Hanser, München 2014

256 S., € 18,90

ASTROBIOLOGIE

Die unendliche Geschichte von den Außerirdischen

Ein weiteres Buch widmet sich der Möglichkeit extraterrestrischen Lebens – besticht dabei aber durch Faktentreue und sachliche Analysen.

Das Thema »Leben im Universum« stößt immer wieder auf breites Interesse. Kaum ein Tag vergeht, an dem nicht n-tv oder ähnliche Sender die x-te Wiederholung eines Beitrags über Aliens ausstrahlen. Das meiste davon gehört in die Rubrik Sciencefiction. Zum Glück gilt dies nicht für das vorliegende Buch von Florian Freistetter. Der promovierte Astronom und bekannte Wissenschaftsautor konzentriert sich auf empirisch belegte Fakten. Im Titel seines Werks klingt an, dass die Suche nach Exoplaneten, also nach Planeten außerhalb unseres Sonnensystems, in den zurückliegenden 20 Jahren überraschende und spektakuläre Ergebnisse erbracht hat. Diesen Befunden entspre-

chend geht es in dem 250-seitigen Buch vorwiegend um die Voraussetzungen, unter denen extraterrestrisches Leben nach heutigem Kenntnisstand bestehen kann. Die wichtigste Bedingung ist zweifellos die Existenz von Planeten, die um Sterne kreisen.

Das erste Kapitel bietet eine interessante Rückschau. Mutig diskutiert der Autor das heikle Thema »Religion gegen Wissenschaft« und zieht einen weiten Bogen von den alten Griechen bis in die Neuzeit. Dabei zeigt sich, wie aufgeschlossen Philosophie und Wissenschaft mit der Frage nach außerirdischem Leben umgegangen sind – und wie ideologisch eingengt dagegen die Vertreter der (christlichen) Religion ar-

JAHRGANGS-CD-ROM 2013



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland);

So erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/recherche

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com



ESA, AOES MEDIALAB

gumentiert und leider auch gehandelt haben. Ein unrühmlicher Höhepunkt christlich-dogmatischen Wirkens war die öffentliche Verbrennung des italienischen Philosophen und Astronomen Giordano Bruno (* 1548) im Jahr 1600. Er wurde wegen seiner Vorstellungen, wo-

Wir leben in einem Universum voller Planeten; die Entdeckung einer »zweiten Erde« scheint nur eine Frage der Zeit zu sein

nach das Universum zeitlich sowie räumlich unendlich sei und auch andere bewohnte Planeten enthalte, aus der Kirche ausgestoßen, einem weltlichen Gericht überstellt und hingerichtet. Die Kirche brauchte 400 Jahre, bis sie offiziell einräumte, das Urteil sei als Unrecht zu betrachten. Vielleicht hatte der Nachweis zahlreicher Exoplaneten zu diesem Sinneswandel beigetragen?

In den folgenden Kapiteln beschreibt Freistetter den steinigen Weg bis zu diesen Entdeckungen. Schon die Existenz der Planeten Uranus und Neptun, die nur noch durchs Teleskop zu sehen sind, hatte gezeigt, dass mehr da draußen ist als mit bloßem Auge zu erkennen. Leider gelang es zunächst nicht, aus den Bewegungen ferner Sterne zweifelsfrei abzuleiten, dass diese planetare Begleiter besitzen. 1992 war es dann endlich so weit: Forscher wiesen die ersten Exoplaneten nach. Die Be-

Forscher entdecken ständig neue Planeten, die um ferne Sterne kreisen – inzwischen sind fast 2000 solcher Himmelskörper bekannt. Finden wir irgendwann auch einen, der Leben beherbergt?

geisterung – es waren derer gleich zwei! – schlug bei so manchem Beobachter allerdings schnell in Bestürzung um: Das Muttergestirn dieser fernen Welten ist ein Pulsar, ein Supernova-Überrest, und seine Begleiter wohl trostlose Schlackekugeln.

Drei Jahre später entdeckte man zur allgemeinen Beruhigung auch eine »anständige« Sonne nebst Planet, und zwar in Gestalt des Sterns 51 Pegasi und seines Begleiters 51 Pegasi b. Der Fund gelang durch Messung eines Dopplereffekts: Während der Stern sich um den Massenschwerpunkt bewegt, den er und sein Planet gemeinsam haben, verschieben sich aus unserer Perspektive die Spektrallinien in seinem Licht periodisch wiederkehrend. Das war ein wissenschaftlicher Durchbruch, doch

wieder wurden all jene, die auf eine »Schwester der Erde« gehofft hatten, bitter enttäuscht. Um 51 Pegasi kreist ein kolossaler Himmelskörper, der 46 Jupitermassen in sich vereint und nur ein Zwanzigstel des Abstands zu seinem Stern hat wie die Erde zur Sonne. Eine wahrhaft heiße Welt!

Dass dies kein Einzelfall ist, wurde bald klar. Ein »heißer Jupiter« nach dem anderen ging den Forschern ins Netz. Ausführlich beschreibt Freistetter, warum diese Planeten ihre Sterne so eng umrunden und wieso es in unserem Sonnensystem anders zugeht. Indem die Astronomen ihre Dopplermessungen verfeinerten und ihr Methodenspektrum um neue Verfahren erweiterten (Messungen von Planetentransits und Gravitationslinseneffekten), konnten sie schließlich auch kleinere Planeten in größeren Abständen zum Mutterstern nachweisen und gan-

ze Planetensysteme nachweisen. Heute ist klar: Wir leben in einem »Universum der Planeten« und es ist nur eine Frage der Zeit, wann die Suche nach der »zweiten Erde« zum Erfolg führt.

So ganz ohne Sciencefiction kommt Freistetter dann doch nicht aus. Die entsprechenden Passagen sind als »Exkurs« eingeschoben und heben sich durch einen anderen Schrifttyp ab. Hier spekuliert der Autor, was das Zeug hält – wo die Aliens sind und ob sie bereits nach uns suchen, welche Technologie sie wohl besitzen, wie man mit ihnen kommunizieren könnte und ob sie aggressiv sind.

Alles in allem ist »Die Neuentdeckung des Himmels« ein interessantes Buch, das sich durch gut belegte und verständlich präsentierte Fakten von vielen anderen einschlägigen Publikationen abhebt. Es verbindet präzise Beobachtungsergebnisse und sachliche Analysen mit fantasievollen Abschnitten und präsentiert sich dadurch sowohl fundiert als auch spannend. Als Realist kann man der These des Autors nur zustimmen, dass wir höchstwahrscheinlich nicht allein im Universum sind. Irgendwann wird die Wissenschaft das vermutlich beweisen können, was unser Weltbild revolutionär verändern wird.

Wolfgang Steinicke

Der Rezensent ist Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e.V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Weitere Rezensionen finden Sie unter:

www.spektrum.de/rezensionen

1914

Urahn der Pixel

»Dr. A. M. Low, der in London vor dem Institut der Auto-

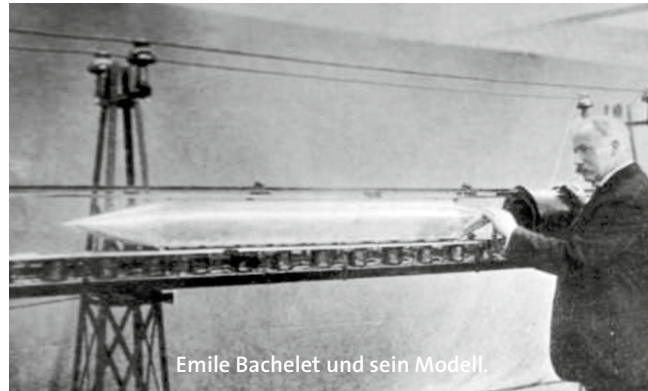
mobilingenieure einen Vortrag hielt, bemerkte, daß er demnächst einen Apparat vorführen würde, mit dessen Hilfe es möglich sei, zu sehen. Durch diese Erfindung werde es z. B. ermöglicht werden, das Bild der Person zu sehen, mit der

man telefoniert. Seit fünf Jahren arbeite er an der elektrischen Uebermittlung von Bildern. Auf eine Strecke von sieben Kilometern habe er Erfolg gehabt. Zu diesem Zwecke hat er einen Schirm aus einzelnen Zellen angefertigt. Diese sind aus Seleni-

um oder einem anderen diamagnetischen Material fabriziert. Eine Rolle läuft mit großer Schnelligkeit über den Schirm und hinterläßt auf diesem verschiedene Lichtwirkungen, die das Bild darstellen.« Central-Zeitung für Optik 19/1914, S. 219

Vordenker des Transrapid

»Aus England kommt die Kunde, dass es Emile Bachelet gelungen ist, eine Schnellbahn im Model auszuführen, die ohne Räder und ohne Gleise durch magnetische Anziehung bewegt wird und imstande ist, eine Geschwindigkeit von 500 Kilometer in der Stunde zu erreichen. Starke Magnete stoßen den Wagen vor sich einige Millimeter nach oben hin ab, so daß er frei in der Luft hängt. In der Fahrtrichtung sind Magnete aufgestellt, die den Wagen anziehen. Hat das Fahrzeug einen passiert, wird der elektrische Strom unterbrochen, der nächste Magnet wird eingeschaltet und zieht das Fahrzeug vorwärts.« Die Welt der Technik 13/1914, S. 257

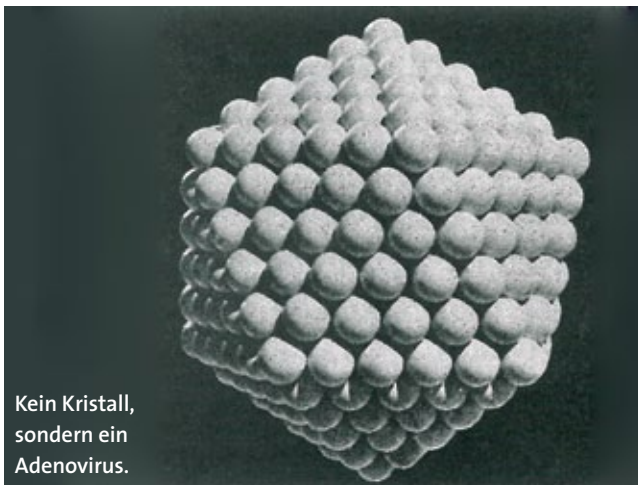


Emile Bachelet und sein Modell.

Die Ästhetik der Viren

»Neue Präparationsmethoden für elektronenmikroskopische Aufnahmen ermöglichen es, Viruspartikel in ikosaedrische, schraubenförmige und komplexe Gebilde einzuteilen. Die Einteilung wurde durch die negative Kontrastierung ermöglicht, welche darauf beruht, daß nicht ein Kontrastmittel auf der organi-

schen Substanz absorbiert wird, sondern vielmehr in die Zwischenräume zwischen den kleinsten Proteineinheiten eindringt. Die damit gewonnenen Bilder zeigen kristallähnliche Strukturen, die teils aus Kugeln, teils aus Stäbchen zusammengesetzt sind.« Naturwissenschaftliche Rundschau 7/1964, S. 273



Kein Kristall, sondern ein Adenovirus.

Nierensteine wegspülen

»Steinkrankheiten der Harnorgane gehören zu den geschichtlich nachweisbar ältesten menschlichen Leiden. Ausgehend von den Kenntnissen über den chemischen Aufbau wurde in den letzten Jahren eine neue Behandlungsmethode entwickelt: die instrumentelle Nierensteinchemolyse. Die anatomischen Verhältnisse der ableitenden Harnwege gestatten einen unmittelbaren Zugang in die Nierenhohlräume, den Bildungsort. Durch diese Kanäle werden Sondensysteme an die Steine herangeführt, so daß eine Dauerbespülung und dadurch eine Auflösung der Konkreme durch geeignete chemische Stoffe möglich ist.« Kosmos 7/1964 S. 346

1964

7000 Jahre Maisanbau

»Die Abstammung des Mais wurde durch neue Ausgrabungen von P. C. Mangelsdorf und Mitarbeitern aufgeklärt. Im Tal von Tehuacàn, Mexiko, wurden in 5 Höhlen die Überreste von Maiskolben verschiedener Entwicklungsstadien gefunden. Die frühesten Kolben entstammen den Kulturschichten von El Riego und Coxkatlàn aus der Zeit zwischen 3400 und 5200 vor Christus. Die Autoren konnten eine lückenlose Entwicklungsreihe von der Wildform herstellen. Im Laufe ihrer siebentausendjährigen Kulturperiode machte die Maispflanze nur eine erhebliche Vergrößerung, aber keine grundsätzliche Formänderung durch.« Naturwissenschaftliche Rundschau 7/1964, S. 280

DER LETZTE KAFFEE

VON ALVARO ZINOS-AMARO UND ALEX SHVARTSMAN

Henry Lindnis maß sein Leben mit dem Kaffeelöffel.

Es begann, als Henry und seine Frau Erin zusahen, wie der Präsident im Fernsehen eine Erklärung abgab.

Erin griff nach Henrys Hand, als sie der düsteren Stimme des Staatsoberhaupts lauschten: Eine Flotte riesiger außerirdischer Raumschiffe näherte sich dem Sonnensystem. In vier Wochen würden sie die Erde erreichen. Man möge Ruhe bewahren.

»Ich mache uns einen Espresso«, sagte Henry.

Espresso reservierten sie für besondere Anlässe.

»Du weißt, Liebling, ich trinke keinen Kaffee mehr«, sagte Erin, ohne ihn anzusehen.

»Wie bitte?«

»Das habe ich angekündigt. Vorige Woche. Als wir bei den Tillmans zum Abendessen waren. Pat hat deutlich erklärt, dass Kaffee den Magen übersäuert.«

Henry konnte sich nicht an die Unterhaltung erinnern. »Du machst dir Sorgen, weil Kaffee der Gesundheit schadet, während uns noch ein Monat zum Leben bleibt?«

Erin rang nach Luft. »Du meinst, das ist eine Invasion?«

»Wenn Aliens uns erforschen wollen oder bloß Kontakt suchten, würden sie ein einzelnes Schiff herschicken. Aber

das ist eine Armada.« Er zeigte auf die körnigen Fernsehbilder, welche die Raumsonden von den Rändern des Sonnensystems übermittelten.

»Du bist immer so pessimistisch.«

»Selbst wenn ich nicht Recht habe, wird es böse enden. Die Menschen werden durchdrehen. Wir müssen sofort die Stadt verlassen. Wir können in der alten Hütte meines Vaters unterkommen.« Er zog seine Hand aus Erins Griff. Nur weil sie im denkbar schlechtesten Moment auf Koffein verzichten wollte, musste er sich nicht auch einschränken. »Ich mache mir einen Espresso. Dann packen wir.«

Bilder der fremden Raumschiffe füllten den Bildschirm. Sie waren hässlich, klobig, von grotesker Größe wie unförmige Inseln, mit gezackten Metallauswüchsen und unbegreiflichen Luken und Türmen und Antennen, wie Insekten aus Kunststoff und Metall. Dunkelgrau vor dem Schwarz des Welt-raums. Und sie kamen näher. Jede Minute. Jede Sekunde.

Erin fügte sich widerwillig; sie murrte und nannte Henry paranoid. Aber sie half ihm packen. Sie beluden den Wagen mit Vorräten und fuhren zu der baufälligen Hütte in Nordkalifornien.

Bald gaben die Nachrichtensprecher im Radio Henrys Sorgen Recht: Überall im Land kam es zu Unruhen und Plün-

derungen. Aus Supermärkten und Lagerhallen wurde weggetragen, was nicht niet- und nagelfest war, und die Leute kämpften um jedes Überbleibsel. Der Präsident verkündete den Ausnahmezustand und berief die Reservisten ein. Und das war nur der Anfang.

Henry und Erin verbrachten drei Wochen in der Hütte, mit nichts als einigen Büchern und einem Radio. Tagsüber vertrieb sich Henry die Zeit mit Fischen und Jagen. Abends sprachen sie miteinander. Oder versuchten es wenigstens. Seit wann waren ihre Unterhaltungen eigentlich so mühsam geworden?

Er machte sich pro Tag zwei Tassen Kaffee und rationierte dann die letzte Packung gemahlener Bohnen. Eigentlich hätte er sich sowieso nur eine Tasse gönnen dürfen, aber Erin verzichtete auf ihre. Wenn wir noch nicht einmal Kaffee zusammen trinken können, dachte Henry, was haben wir dann überhaupt noch gemeinsam? Nach der ersten Woche redeten sie kaum noch miteinander.

Eines Abends hörte Henry Motoren-geräusch. Er sah aus dem Fenster: Ein Kleintransporter näherte sich. Ein Mann und eine Frau stiegen aus.

Henry trat aus der Hütte, mit dem Gewehr im Arm.

»Das ist Privatgelände«, sagte er.

»Wir wollen keinen Ärger«, versicherte der Mann nervös. »Wir suchen bloß einen sicheren Unterschlupf. Es ist gefährlich da draußen. Können wir wenigstens über Nacht bleiben? Es wird dunkel.«

Vom Rücksitz des Transporters starrten ihn zwei kleine Kinder mit großen Augen an.

Henry hob seine Waffe. »Sucht woanders.«

Die Eindringlinge kletterten eilig wieder in ihr Auto.

»Wie kannst du nur so gemein sein«, rief Erin aus der Haustür.

»Unsere Vorräte sind begrenzt, wir können sie nicht mit Fremden teilen«, sagte Henry.

»Der Mann, den ich geheiratet habe, hätte niemals Kinder abgewiesen«, sagte Erin. »Du hast dich verändert.«

»Die Welt hat sich verändert«, widersprach er. »Daran musst du dich gewöhnen.«

Am nächsten Morgen schnürte sie einen Kleiderbeutel. »Ich fahre nach Hause.«

Er versuchte nicht, sie aufzuhalten.

Einen Tag bevor die Außerirdischen den Berechnungen nach die Erde errei-

chen sollten, ging Henry der Kaffee aus. Er brühte seine letzte Portion, atmete ihr feines Aroma tief ein und stellte die Tasse auf den Nachttisch.

Gleich neben die Pistole.

Mit den Jahren hatte ihn der Kaffee vieles gelehrt, und sogar diese letzte Lektion in Mäßigung hatte sich als interessant erwiesen.

Interessant, aber letztlich sinnlos.

Sinnlos wie alles inzwischen ohne jeden Sinn geworden war. Ohne Kaffee. Und ohne Erin.

Henry seufzte laut und verabschiedete sich von seinen Erinnerungen wie von einem alten Bekannten, den man ein letztes Mal trifft. Dann trank er die warme braune Flüssigkeit, Schluck für Schluck und lächelte.

Eine Minute später und rund einen Kilometer entfernt zuckte ein Elch kurz zusammen, als ein Schuss ertönte. Doch weil nichts weiter geschah, setzte er sein Mahl fort, zupfte ein paar Kräuter und genoss das herbe Aroma.

Am nächsten Tag landeten die Außerirdischen und überreichten der Menschheit ihre Geschenke: Die Fähigkeit, Raum und Zeit zu krümmen, bahnbrechende mathematische Theoreme, eine stabile kalte Fusion.

Und eine Röstbohne, die überirdisch gut schmeckte. 

DIE AUTOREN

Alvaro Zinos-Amaro und **Alex Shvartsman** sind amerikanische Science-fiction-Autoren. Im Internet sind sie unter myaineko.blogspot.com und alexshvartsman.com zu finden.

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 506, S. 402, 20. Februar 2014

Im Griff der Dunklen Energie

Seit Forscher 1998 entdeckten, dass das Universum nicht nur expandiert, sondern dies auch immer schneller tut, haben Physiker zahlreiche Modelle entwickelt, um die dafür verantwortliche Dunkle Energie zu erklären. Dabei geht es um nicht weniger als um das Schicksal unseres Kosmos.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; HINTERGRUND: FOTOLIA / STEFAN KUHN



Neue Bedrohung durch Tuberkulose

Mediziner befürchten, dass sich bestimmte Tuberkulosebakterien zu neuen Erregern weiterentwickeln. Diese könnten sich rascher ausbreiten, schwerere Erkrankungen auslösen und mit größerer Wahrscheinlichkeit gegen Antibiotika resistent werden.

Physik im Attosekundenmaßstab

Neuartige Transistoren könnten vielfach höhere Geschwindigkeiten erreichen, indem sie mit Lichtpulsen arbeiten. Das ermöglichen bisher unbekannte Effekte in Kristallen, die Forscher nun mit ultrakurzen, hochintensiven Röntgenimpulsen vermessen.



BRIAN STINE / ASHLEY WHITWORTH

Angkor – Wiederentdeckung einer antiken Großstadt

Angkor Wat im kambodschanischen Urwald ist heute ein beliebtes Touristenziel. Doch einst war sie nur ein Teil von Angkor, der riesigen Hauptstadt des Khmer-Reiches. Aktuelle Ausgrabungsprojekte erforschen den Komplex aus Palästen, Heiligtümern, Wohngebieten, Straßen und Bewässerungsanlagen.



ELEEN HOHMUTH-HEMONICK

Augenlicht für Indiens blinde Kinder

Dank Staroperation lernen selbst noch Jugendliche erstmals Sehen. In einem amerikanisch-indischen Projekt werden die Kinder kostenlos behandelt und geschult – was auch zu unerwarteten wissenschaftlichen Erkenntnissen führt.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig 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.com/newsletter

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

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



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

*Für Printabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* kostenlos!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/digitalabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin



Jeden Donnerstag neu!

- mehr als 40 Seiten News, Hintergründe, Kommentare und Bilder aus der Forschung
- im Abo nur € 0,77 pro Ausgabe
- jederzeit kündbar
- mit exklusivem Artikel aus **nature** in deutscher Übersetzung
- als PDF einfach über E-Mail oder per Link zu beziehen



Lernen Sie **Spektrum – Die Woche** kostenlos kennen:
www.spektrum.de/testwoche