

Spektrum

DER WISSENSCHAFT



Medizinforschung
unter dem Einfluss
der Pharmaindustrie

JUNI 2013

NANOKAPSELN

Winzige Wunderkugeln für
Medizin und Elektronik

MAGISCHER ATOMKERN

Das Geheimnis
von Zinn-100

ASTRONOMIE

Von der Staubscheibe
zum Planeten

Die Geburt der Kunst

Kreativität entstand viel früher
als bisher gedacht



7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E



DAS GANZE SPEKTRUM:

UNSERE SPEZIALREIHEN



JETZT IM
ABO
BESTELLEN
UND 15%
SPAREN

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandspporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

www.spektrum.de/spezialabo



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Von Forschern und Firmen

»**M**ein Essen zahl ich selbst.« So lautet der Name einer Initiative, der sich auch in Deutschland immer mehr Ärzte anschließen, um dem Einfluss der Industrie auf den eigenen Berufsstand entgegenzuwirken. Denn in der Medizinforschung geht es nicht nur um das Wohl von Patienten, sondern auch um viel Geld. So wurden im deutschen Gesundheitswesen laut zuständigem Bundesministerium 2011 knapp 294 Milliarden Euro ausgegeben; das entsprach rund 11,6 Prozent des Bruttoinlandsprodukts. Nicht zuletzt fließen die Mittel in Medikamente und Apparate, deren Hersteller gute Erlöse erzielen wollen.

Vor allem bei verschreibungspflichtigen Arzneimitteln versuchen Unternehmen, sanften Druck auf die Mediziner auszuüben – eine international verbreitete Praxis, wie der New Yorker Journalistikprofessor Charles Seife in unserem Brennpunkt »Interessenkonflikte in der Medizin« am Beispiel der USA darlegt (ab S. 30). Er heftete sich an die Fersen des einflussreichen Osteoporoseforschers Robert Lindsay, der vom Produzenten des einschlägigen Präparats Premarin über viele Jahre Zuwendungen erhielt. In detektivischer Kleinarbeit legte Seife die vielfältigen Beziehungen zwischen Firma und Forscher offen. Dabei berief er sich auf den 2010 vom US-Kongress verabschiedeten »Physician Payments Sunshine Act«. Laut diesem Gesetz müssen die Hersteller von Medikamenten oder medizinischen Geräten jetzt stets offenlegen, was sie wem spendieren. Doch mit der Transparenz ist es noch nicht weit her, berichtet unser Autor. Sogar die amerikanische Gesundheitsbehörde National Institutes of Health (NIH) behinderte seine Nachforschungen. Ein Skandal, aber keine Überraschung. Denn wie Seife herausfand, werden auch NIH-Mitarbeiter großzügig von Pharmaunternehmen bedacht. Die Interessenkonflikte des eigenen Personals, so der Journalist, behandelt die oberste Gesundheitsbehörde der USA nachlässig. Fazit: Die in großen Teilen unsaubere amerikanische Medizinforschung sei kaum in der Lage, sich selbst zu reinigen.

Natürlich wollten wir auch wissen, wie es in Deutschland um die unabhängige medizinische Forschung bestellt ist. Unter dem eingangs erwähnten Motto »Mein Essen zahl ich selbst« schließen sich seit 2006 Mediziner zusammen, die jedwede Zuwendung von Unternehmen ausschlagen, sei es ein üppiges Honorar oder lediglich ein schickes Abendessen. Wir baten einen Mitstreiter der Initiative zu erläutern, welchen Beeinflussungsversuchen Mediziner hier zu Lande ausgesetzt sind und warum es so schwer ist, dagegen anzugehen. Klaus Lieb, Direktor der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Mainz, kam unserer Bitte nach. Sie finden seine auf reichlich persönliche Erfahrung gestützte Analyse ab S. 36.

Eine aufschlussreiche Lektüre wünscht
Ihr

Carl Hünzel

PS: Diskutieren Sie mit! Wie unabhängig ist die Medizin?
Auf spektrum.de/medizinforschung können Sie Ihre Meinung kundtun.

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Astrophysiker **Thomas Henning** vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg untersucht, wie sich Planeten aus Staub- und Gaswolken bilden können (S. 42).



Fürstentümer sind das Spezialgebiet des baden-württembergischen Landesarchäologen **Dirk Krause**. Von der schwäbischen Heuneburg bis zum Mont Lassois im Burgund erforscht er deren Bedeutung in der frühkeltischen Gesellschaft (S. 64).



Die Kolloidforscher **Katharina Landfester**, **Daniel Klinger** und **Nicolas Vogel** (von links nach rechts) schildern ab S. 86, welche Möglichkeiten hergestellte Nanoteilchen für Medizin und Elektronik eröffnen.

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Eisregen aus Saturnringen • Spezielle Atmung bei Mikroben • Urvögel mit vier Flügeln • Künstliche Nieren • Flinker Laufroboter • Neues Entgiftungsmittel aus Nanopartikeln

11 Bild des Monats

Sediba war kein Sprinter

12 Forschung aktuell

Genom des Neunauges

Einige unserer Gene sind älter als lange geglaubt

Mit Bleiionen zum Urknall

LHC nimmt Quark-Gluon-Plasma ins Visier

Alzheimer: Neuer Verdacht

Die Zellzerstörung beginnt überraschend früh

Organe aus 3-D-Druckern

Ein innovativer Ansatz, künstliche Ersatzorgane herzustellen

SPRINGER'S EINWÜRFE

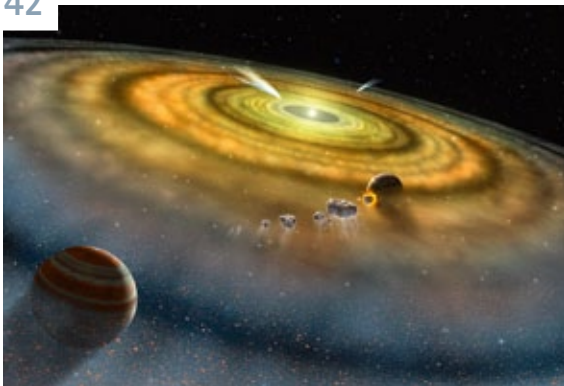
Die (allzu) kleine Welt der Hirnforscher

Statistisch steht die Neurowissenschaft auf tönernen Füßen

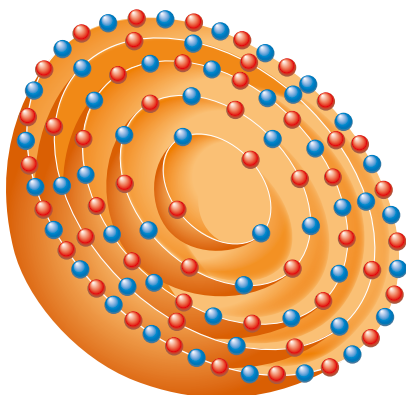
36



42



56



BIOLOGIE & MEDIZIN

► BRENNPUNKT: INTERESSENKONFLIKTE IN DER MEDIZIN

30 Marionetten der Industrie

Charles Seife

Medizinforscher und Gesundheitsbeamte in den USA erhalten Geld von Pharmafirmen. Sind sie noch unabhängig?

36 Mein Essen bezahle ich selbst!

Klaus Lieb

Ein deutscher Mediziner analysiert die Interessenkonflikte von Ärzten und Pharmaindustrie und schlägt Lösungen vor.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SERIE »RÄTSEL DER ASTRONOMIE« TEIL 3

► 42 Aus Staub geboren

Thomas Henning

Bei der Geburt von Planeten geht es ziemlich wild zu.

SCHLICHTING!

54 Der Cappuccino-Effekt

H. Joachim Schlichting

Luftbläschen in einer schwingenden Flüssigkeitssäule verändern die entstehenden Töne unerwartet stark.

► 56 Die doppelte Magie des Zinn-100

Thomas Faestermann

Wie ordnen sich Protonen und Neutronen im Atomkern an? Ein Beschleunigerexperiment brachte Aufschluss.

MENSCH & KULTUR

64 Druiden, Ritter, Fürstinnen

Dirk Krausse

Archäologische Grabungen der letzten Jahre erhärten das Bild einer aristokratisch geprägten keltischen Gesellschaft.



► TITELTHEMA

22 Die Geburt der Kreativität

Heather Pringle

Zu Erfindern und Künstlern wurden Menschen nicht erst vor 40 000 Jahren, als der *Homo sapiens* in Europa erschien. Afrikanische Kulturen liefern viel ältere Zeugnisse von Kreativität. Die ersten Anfänge finden sich sogar bei noch früheren Menschen.

78



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

72 Wie intelligent ist die künstliche Intelligenz?

Brian Hayes

Bislang zeigt die KI nur, wozu geistlose Maschinen im Stande sind – das aber zunehmend erfolgreich.

ERDE & UMWELT

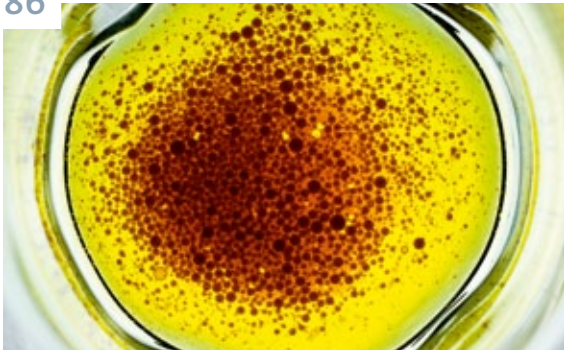


78 Schutz für Tier und Mensch

Brendan Borrell

Ein weltweit einmaliges Biotop in Indonesien erfordert einen heiklen Interessenausgleich zwischen Fischern und Naturschützern.

86



► 86 Wunderkugeln aus Wasser und Öl

Daniel Klingler, Nicolas Vogel und Katharina Landfester

Aus Miniemulsionen entstehende winzige Kunststoffpartikel lassen sich in Medizin und Elektronik einsetzen.

TECHNIK & COMPUTER

Nach S. 94 folgt eine 28-seitige Sonderpublikation der VolkswagenStiftung.

95 Rezensionen

Ursula Wolf: Ethik der Mensch-Tier-Beziehung • *Frank Wittig*: Die weiße Mafia • *Wolfgang Korn*: Mesopotamien • *Günther Bloch, Elli H. Radinger*: Affe trifft Wolf • *Hanno Charisius, Richard Friebe, Sascha Karberg*: Biohacking u. a.

85 Wissenschaft im Rückblick

Von der schnellen Stromkur zum Überschallflieger

102 Vorschau

Titelmotiv: Universität Tübingen / Hilde Jensen
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



Jagdunfall oder Schamane

Urgeschichtler und Filmemacher Marc Azéma zeigte, dass unsere steinzeitlichen Vorfahren es schon verstanden, Tiere in Bewegung darzustellen (»Höhlenkino in der Eiszeit«, April 2013, S. 66).

Die »Schachtszene« aus der Höhle Lascaux (Dordogne, Alter: 19 000 Jahre).

Martin Schmauder, Esslingen: Schön, dass Sie wieder einmal ein prähistorisches Thema aufgreifen. Der Artikel ist sehr gut und beleuchtet das Thema auf ansprechende Weise. Meine kleine Kritik bezieht sich ausschließlich auf die Interpretation der »Schachtszene« von Lascaux durch Marc Azéma. Hier möchte ich alternativ an die große Deutung von Joseph Campbell erinnern, die er in »Mythologie der Urvölker – Die Masken Gottes« ausführt. Praktisch keine der Menschendarstellungen in den Bildhöhlen Europas sind normale Personen, Jäger oder Ähnliches. Immer sind es wundersame Mensch-Tier-Mischungen, die man ohne große geistige Verbiegungen als Schamanendarstellungen bezeichnen darf. Ich erinnere etwa an den Mundbogen spielenden Tiernischen von Trois Frères oder die »Wolperdingermenschen«, die aus verschiedensten Tierteilen zusammengesetzt sind, zum Beispiel in Trois Frères oder auch in Lascaux. Und auch der

»Mensch« aus der Schachtszene von Lascaux hat keinen menschlichen Kopf, sondern einen Vogelkopf, der beispielsweise auf die schamanische »Reise« hindeuten mag.

Schwangere verhungern nicht

Wie lange ein Fötus im Mutterleib bleibt, hängt laut einer neuen Untersuchung von dem durch die Schwangerschaft strapazierten mütterlichen Stoffwechsel ab. (»Rettende Geburt«, April 2013, Forschung aktuell, S. 14).

Josef Peter Kosek, Gütersloh: Die zentrale Aussage des Originalartikels, wonach die Schwangerschaftsdauer nicht von der Relation von Kindsgröße zu mütterlicher Gebärmutter und dem Beckenausgang, sondern von dem Gleichgewicht des Metabolismus zwischen Kind und Mutter abhängt, ist in dieser apodiktischen Form sicher nicht richtig. werdende Mütter zehren in den letzten Monaten der Schwangerschaft nicht aus, selbst wenn ihr Stoffwechsel zu dieser Zeit katabol sein sollte. Sie nehmen durchschnittlich 12 bis 16 Kilo-

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: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. rer. nat. habil. Reinhard Breuer
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: Erika Eschwei
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
Verlagsleiter: Richard Zinken
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: Claudia Krysztofki, Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke, 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 des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70).

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: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 34 vom 01.01.2013.
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: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
 Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



gramm bis zum Ende der Schwangerschaft an Gewicht zu, wobei dies zur Hälfte einerseits auf den Zuwachs von Gewicht der Gebärmutter, Plazenta, Fruchtwasser, Kind, Brust- und Blutvolumen der Mutter und andererseits auf Zuwachs an Fettgewebe und auf eingelagertes Wasser im Organismus der Mutter zurückzuführen ist. Schwangere würden nicht verhungern, auch wenn das Kind noch einige Monate länger auszutragen wäre. Sie haben bei der Geburt nach neun Monaten erhebliche Energiereserven gespeichert.

Schließlich verweisen die Autoren darauf, dass die Gehirngröße der Feten weniger als 30 Prozent jener der Erwachsenen ausmacht, wogegen etwa Schimpansen 40 Prozent an Gehirngröße im Vergleich zu erwachsenen Schimpansen mit auf die Welt bringen. Würde das Gehirn der Kinder bei Geburt 40 Prozent der Größe jenes von Erwachsenen ausmachen, so wären dies knapp 600 Milliliter Organmasse statt jetzt 450 Milliliter oder 12 Zentimeter Kopfdurchmesser statt derzeit 9 Zentimeter. Bei modernen Menschen würden weder die Gebärmutter noch die Geburtswege einen derartigen Massenzuwachs unbeschadet aushalten. Die Anatomie der Frau müsste dafür erheblich anders aussehen. Dass zudem der Geburtstermin, genetisch bedingt, tief greifende hormonelle Veränderungen bei der Frau voraussetzt und der Gebärmuttermund sich erst dadurch öffnet, ist in dem Originalartikel mit keinem Wort erwähnt.

Walter Weiss, Kassel: Könnte die Kausalität nach den mitgeteilten Einzelerhebungen nicht auch genau umgekehrt sein? Der Zeitpunkt der Geburt steht demnach fest (zum Beispiel wegen der Enge des Beckens der Mutter oder anderer Gründe, aber nicht wegen des Aufbrauchens der Reserven der Mutter), und bis zu diesem Zeitpunkt kann die Mutter so viel Energie in das Kind investieren, wie ihr zur Verfügung steht. Bei einem späteren Zeitpunkt würde die Mutter entsprechend mehr haushalten müssen, bei einem früheren könnte sie noch stärker »powern«. Deshalb über-

zeugen mich die von den Forschern gezogenen Schlüsse durchaus nicht.

Hilfsmittel – und nicht Ersatzteil

Schon vor 2300 Jahren verwendete in Westchina ein schwer behinderter Mann eine hölzerne Gehhilfe, berichtete Hakan Baykal (»Der Mann mit dem Holzbein«, April 2013, Forschung aktuell, S. 12).

Hans Mathias Zündorf, Erkelenz: Bei dem im Artikel beschriebenen und abgebildeten Holzbein handelt es sich um eine Orthese, nicht um eine Prothese, wie sie im Text mehrmals bezeichnet wird. Eine Prothese ist ein Ersatzstück eines Körperteils wie der 1885 in Capua im Grab eines Mannes gefundene hölzerne Unterschenkel, während eine Orthese ein beigegebenes Hilfsmittel zur besseren Funktion, zur Entlastung und Ähnlichem ist.

Synodische Umlaufzeit

Für astronomische Berechnungen nutzten die Maya nicht nur den Lauf der Erde, sondern auch den der Venus, erläuterte Klaus-Dieter Linsmeier (»In vielen Schritten zur Schrift«, März 2013, S. 62).

Lutz Muche, Freiberg: Im Artikel steht: »... dass fünf Venusjahre fast genauso lange dauerten wie acht Erdjahre ...« Ein Venusjahr ist aber 224,5 Tage, also rund 0,615 Erdjahre lang. Gemeint ist stattdessen wohl die synodische Umlaufzeit von 583,9 Tagen, also die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden unteren Konjunktionen. Fünf solcher Perioden der Venus entsprechen fast genau acht Erdjahren.

Überschrift suggeriert Kreationismus

Möglicherweise entstand die heftige Immunreaktion bei Allergien, um sich etwa gegen Tiergifte zu wehren, so drei Forscher von der Yale University (»Der Sinn der Allergie«, März 2013, S. 34).

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

Florian Finke, Köln: Durch den Begriff »Sinn« suggeriert die Überschrift einen »Plan« und damit ein kreationistisches Weltbild. Vom naturwissenschaftlich-naturalistischen Standpunkt aus ist die Annahme eines »Plans« mindestens unnötig (weil zusätzlich und ohne Erklärungskraft) und somit zu vermeiden. »Grund« wäre hier der korrekte Ausdruck.

Erratum

»Giganten im All«, Mai 2013, S. 30
Die Masse des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxis ist auf S. 32 mit 4,1 Millionen Sonnenmassen angegeben, richtig ist wie in der Bildlegende 4,1 Milliarden. Hans-Henning Lange aus Siegen hat uns darauf hingewiesen.

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
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

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

ASTRONOMIE

Eisregen aus den Saturnringen

Aus den Ringen des Saturns fällt Wassereis in seine Atmosphäre. Davon sind Astronomen um James O'Donoghue von der University of Leicester (England) überzeugt, nachdem sie den Himmelskörper mit dem Keck-II-Teleskop untersucht haben.

Die Forscher benutzten den Nahinfrarotspektrographen des Teleskops, um die Ionosphäre des Saturns zu untersuchen – jenen Teil seiner Atmosphäre, der stark ionisiert ist. Dort

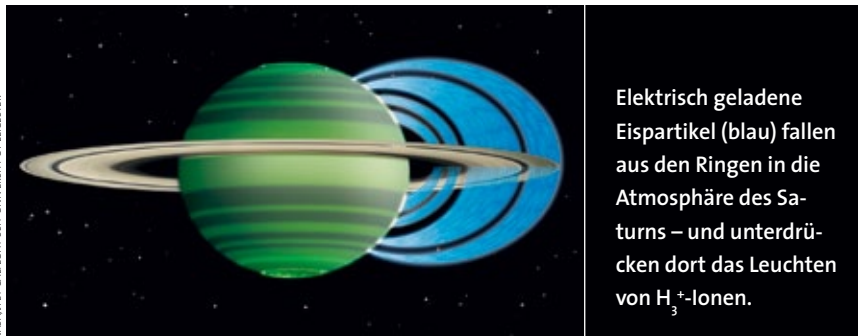
fahndeten sie nach dem typischen Emissionslicht von dreiatomigen Wasserstoffionen (H_3^+). Den Beobachtungen zufolge herrscht in manchen Breitengraden ein deutlich intensiveres H_3^+ -Leuchten als in anderen.

Auffällig ist, so die Autoren, dass sich diese Regionen mit den Lücken im Ringsystem verbinden lassen – und zwar über die Magnetfeldlinien des Saturns. Das sei kein Zufall. Die Saturnringe bestehen größtenteils aus Wassereis-

körnchen. Diese können sich, etwa durch Einwirkung des Sonnenwinds, elektrisch aufladen. Als ionisierte Partikel fallen sie dann entlang der Magnetfeldlinien in die Atmosphäre des Planeten. Dort tauschen sie elektrische Ladungen mit H_3^+ -Ionen aus, was deren Leuchten unterdrückt. Weil die Lücken zwischen den Saturnringen nur wenig Material enthalten, stürzt von dort auch kaum Eis auf den Planeten – und die entsprechenden Gebiete behalten ihr intensives H_3^+ -Leuchten bei.

Falls die Forscher Recht haben, könnten die Saturnringe erst vor relativ kurzer Zeit entstanden sein. Denn wenn sie ständig Wasser an den Planeten verlieren, sollten sie eine begrenzte Lebensdauer haben. Für eine konkrete Altersbestimmung müsste jedoch erst geklärt werden, wie groß der Wasserverlust genau ist.

Nature 496, S. 193–195, 2013



Elektrisch geladene Eispartikel (blau) fallen aus den Ringen in die Atmosphäre des Saturns – und unterdrücken dort das Leuchten von H_3^+ -Ionen.

Spektrum DIE WOCHE

Mehr aktuelle Studien und Analysen lesen Sie jeden Donnerstag in

Spektrum DIE WOCHE

- Krebsforschung: Ersehnte Serientäter
- Teilchenphysik: KATRIN – Die Feinwaage für Neutrinos
- Ökosysteme: Der Kollaps fällt aus

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

BIOCHEMIE

Spezieller Energiestoffwechsel bei Mikroben

Niederländische Forscher haben einen Mikroorganismus aus der Gruppe der Archäen entdeckt, der Chlorate und Perchlorate (Salze der Chlor- und Perchlorsäure) zur Energiegewinnung nutzt, indem er sie »veratmet«, also chemisch reduziert. Die Wissenschaftler vermuten, dass diese Form der Atmung evolutionär sehr alt ist.

Die Wärme liebende Mikrobe *Archaeoglobus fulgidus* gedeiht unter anderem an heißen Unterseequellen. Bisher war sie als Sulfatatmer bekannt. Wie das Team um Alfons Stams von der Universität Wageningen, Niederlande, nun feststellte, veratmet sie auch Chlorate und Perchlorate. Dabei entstehen oxidierende und giftige Chlorite. *A. fulgidus* lässt sie mit bestimmten Schwefelverbindungen (Sulfiden) reagieren und macht sie auf diese Weise unschädlich.

Seit Längerem kennt man Bakterien, die (Per-)Chlorate veratmen. Jedoch verfügen sie – im Gegensatz zu *A. fulgidus* – über Enzyme, mit denen sie die giftigen Chlorite zu Chloriden umwandeln, wobei molekularer Sauerstoff entsteht. Die Forscher nehmen deshalb an, dass Archäen die (Per-)Chlorat-Atmung schon vor sehr langer Zeit erlernt haben und dass Bakterien diesem Stoffwechselweg später Chlorit abbauende Enzyme hinzufügten. Womöglich geschah das sogar, bevor die ersten fotosynthetisch aktiven Organismen auftauchten. Die (Per-)Chlorat atmenden Mikroben hätten dann zu den ersten Lebewesen gehört, die stark oxidierende Verbindungen in ihren Energiestoffwechsel mit einbezogen – was den Siegeszug der Photosynthese vielleicht erst ermöglichte.

Science 340, S. 85–87, 2013

EVOLUTION

Urvögel flogen mit vier Flügeln

Als die ersten Vögel vor rund 150 Millionen Jahren den Himmel eroberten, nutzten sie dazu oft vier statt zwei Flügel. Das belegen elf gut erhaltene Fossilien, die Xu Xing von der Linyi University (Shandong, China) und seine Kollegen aus Ablagerungen der Unterkreidezeit in China ausgegraben haben.

Die Versteinerungen weisen deutliche Abdrücke von Beinfedern auf, wie sie zuvor nur von vogelähnlichen Dinosauriern wie *Microraptor* und *Sinornithosaurus* bekannt waren. Bei einem der Fossilien erreichten die Federn sogar eine Länge von mehr als fünf Zentimetern. Zudem besaßen sie steife Fahnen, gekrümmte Schäfte und waren flach – alles Eigenschaften, die dafür sprechen, dass sie zum Fliegen dienten. Das unterscheidet sie von den Flaumfedern, die man noch heute an den Beinen einiger Greifvögel sieht.

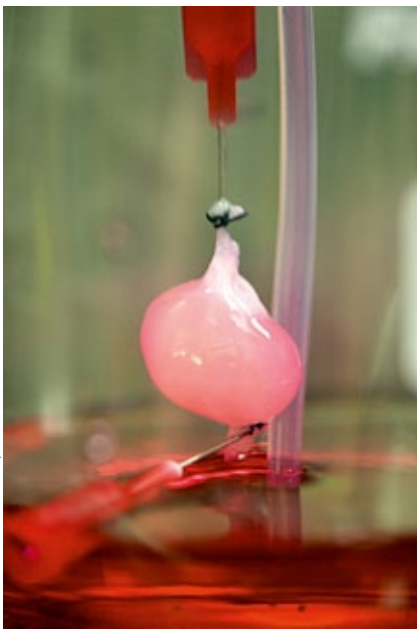
Da die elf Fossilien zu verschiedenen Arten und Gattungen gehören, stellten Hinterflügel in der Unterkreidezeit offenbar keine Seltenheit dar. Anscheinend waren sie unter den frühen Vögeln weit verbreitet und leisteten wohl zumindest beim Gleitflug gute Dienste. Freilich ist nicht ausgeschlossen, dass es damals auch Vögel mit nur zwei Schwingen gab.

Science 339, S. 1309–1312, 2013

SHANDONG TIANYU MUSEUM OF NATURE



Fossil eines urtümlichen Vogels aus der Gattung *Sapeornis*. An seinen Beinen sind Abdrücke von Federn erkennbar (Pfeile).



Eine künstliche Rattenniere wächst im Kulturgefäß heran. Sie besteht aus dem Zwischenzellgewebe (»extrazelluläre Matrix«) einer früheren Niere, das mit verschiedenen Stammzellen neu besiedelt wurde.

ORGANERSATZ

Funktionsfähige Niere aus der Retorte

Mediziner versuchen schon seit Langem, Nieren im Labor zu züchten. Einem Forscherteam um Harald Ott vom Massachusetts General Hospital (USA) ist das nun mit Rattennieren gelungen. Die künstlichen Organe produzieren tatsächlich Harn – sowohl in künstlicher Umgebung als auch im Empfängertier.

Die Forscher durchspülten Rattennieren mit einer Reinigungslösung und wuschen so alle Zellen heraus. Übrig blieb ein zellfreies Gerüst mit der Form des Organs, einschließlich der Blutgefäße. Dieses Gerüst besiedelten die Forscher mit zwei Arten von Stammzellen. Durch die Nierenarterie injizierten sie menschliche Nabelschnurendothelzellen, welche die Blutgefäße auskleideten. Durch den Harnleiter spritzten sie Nierenstammzellen des Empfängertiers, aus denen das eigent-

liche Organewebe hervorging. Nachdem solche »wiederbelebten« Nieren in künstlicher Umgebung bewiesen hatten, dass sie Harn bilden, transplantierte das Team sie in lebende Ratten. Auch dort funktionierten die Organe.

Etwa 8000 Patienten warten in Deutschland auf eine Spenderniere. Gelänge es, das neue Verfahren auf menschliche Organe anzuwenden, hätte das große Vorteile. Insbesondere könnte man die künstlichen Nieren aus den Zellen der Patienten züchten, was das Risiko von Organabstoßungen vermindern würde. Jedoch müsse das Verfahren weiter verbessert werden, bevor man es beim Menschen einsetzen könne, schreiben die Forscher. Denn die künstlichen Rattennieren erreichen bislang nur einen Teil der Filtrationsleistung gesunder Organe.

Nature, 10.1038/nm.3154, 2013

ROBOTIK

Schnell über den Sand – dank gebogener Füße

Auf lockeren, sandigen Böden zu laufen, fällt Robotern bislang schwer. Jetzt haben Forscher um Daniel Goldman vom Georgia Institute of Technology (USA) ein Modell konstruiert, das sich rasch durch solches Gelände bewegt. Dem Plastikkameraden nützen dabei seine speziell geformten Füße, die wie ein c aussehen.

Die Forscher entwickelten ein mathematisches Modell, mit dem sich vorhersagen lässt, welche Kräfte auf die Extremitäten einer Laufmaschine wirken, die über Sand, Schotter oder ähnliche Untergründe marschiert. Unter anderem hängen diese Kräfte davon ab, in welchem Winkel die Füße aufsetzen und wie tief sie in den

Boden eindringen. Gestützt auf das Modell, suchten die Wissenschaftler nach Gliedmaßenformen und Schrittfrequenzen, die eine möglichst effiziente Fortbewegung versprochen. Dabei kam heraus, dass aufwärts-gebogene Füße besonders gut abschneiden.

Für Praxistests stattete das Team einen Roboter mit verschiedenen Füßen aus und ließ ihn durch körniges Substrat laufen. Die dabei gemessenen Kräfte stimmten gut mit den rechnerisch vorhergesagten überein. Auch bestätigte sich, dass die Maschine mit c-förmigen Extremitäten besonders flink unterwegs war. Roboter, die auf lockeren Untergründen zurechtkommen, könnten bei Rettungseinsätzen und planetaren Erkundungsmissionen von Nutzen sein.

Science 339, S. 1408–1412, 2013



GEORGIA TECH PHOTO / GARY MEEK

Sieht dynamisch aus und ist es auch: Wenn dieser Roboter seine gebogenen Füße schwingt, erreicht er ein beachtliches Tempo – obwohl der Boden leicht nachgibt.

NANOTECHNOLOGIE

Winzpartikel beseitigen Gift im Blut

Viele Bakterien-, Schlangen- und Skorpiongifte wirken, indem sie die Zellmembran roter Blutkörperchen durchlöchern, was die Zellen zerstört. Verantwortlich dafür sind Poren bildende Eiweiße, die sich in die Membran einlagern und winzige Kanäle bilden. Medizinische Gegenmaßnahmen setzen bislang darauf, diese Giftstoffe gezielt auszuschalten – etwa durch Antikörper, die spezifisch die Toxinmoleküle binden und neutralisieren. Der Nachteil dabei ist, dass die Behandlung präzise auf die jeweilige Vergiftungsart zugeschnitten sein muss.

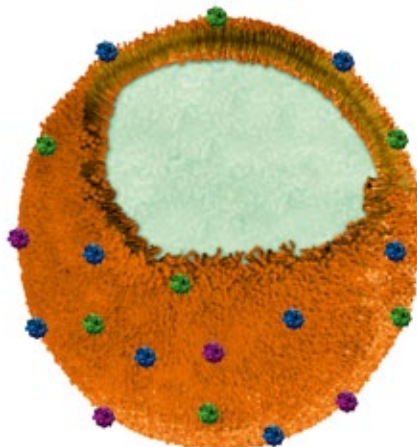
Forscher um Liangfang Zhang von der University of California in San Diego haben nun ein Entgiftungsverfahren entwickelt, das gegen mehrere Toxine hilft. Sie stellen Nanopartikel aus einem leicht abbaubaren Polymer her, umhüllen sie mit Membranmaterial von roten Blutkörperchen und injizieren sie ins Blut der Vergiftungs-

opfer. Dort präsentieren sich die Partikel den toxischen Molekülen als Ziel und halten sie davon ab, echte Blutkörperchen zu zerstören. Ein Großteil der Poren bildenden Stoffe lagert sich in die Membranen der künstlichen Nanopartikelchen ein, bleibt dort gefangen und wird später mit den Partikeln zusammen in der Leber abgebaut.

Um die Wirksamkeit des Verfahrens zu zeigen, spritzten die Forscher Mäusen ein Bakterientoxin in tödlicher Dosis. Hatten sie den Tieren zuvor die Nanopartikel injiziert, überlebten 89 Prozent der Nager die Vergiftung. Verabreichten die Forscher das Entgiftungsmittel erst nach Toxingabe, blieben immerhin noch 44 Prozent am Leben. Weitere Versuche ergaben, dass die Nanopartikel sehr verschiedene Gifte unschädlich machen können.

Nature Nanotechnology 8,

S. 170–174, 2013



LUCAS MANDENGIERING / NATURE NANOTECHNOLOGY 2013

Einige zehn Nanometer groß sind die neuen Entgiftungspartikel. Sie bestehen aus einem Polymer (grün) und der Zellmembran von roten Blutkörperchen (orange). Die Toxinmoleküle (kleine Kugeln) lagern sich in Letzterer ein.

SEDIBA WAR KEIN SPRINTER



Australopithecus sediba (Mitte), ein knapp zwei Millionen Jahre alter Verwandter des Menschen (SdW 9/2012, S. 22), konnte zwar aufrecht gehen, aber nicht über längere Strecken rennen. Sein Brustkorb ist ähnlich geformt wie der von Schimpansen (rechts das Skelett eines Männchens), mit

hochgestelltem Schultergelenk und so bestens zum Klettern geeignet. Freies und Energie sparendes Armschwingen wie beim Menschen mit dessen zylinderförmigem Brustkorb (links das Skelett einer kleinen Frau) war ihm nicht möglich.

Science 340, S. 109–236, 2013

Neunaugen-Genom gibt Einblicke in die Wirbeltierevolution

Die urtümlichen, kieferlosen Neunaugen haben gemeinsame Vorfahren mit allen »moderneren« Wirbeltieren einschließlich des Menschen. Jetzt wurde ihr Genom analysiert – und es weist einige verblüffende Gemeinsamkeiten mit unserem auf.

VON AXEL MEYER

Auf den ersten Blick sehen Neunaugen aus wie Aale. Doch mit denen sind sie gleich weit entfernt verwandt wie mit den Säugetieren. Genau genommen handelt es sich noch nicht einmal um Fische. Denn die Neunaugen stellen die einzigen Überlebenden einer uralten evolutionären Linie der Wirbeltiere dar, die als so genannte Rundmäuler keine Kiefer aufweisen. Ihre Vorfahren trennten sich schon vor über 500 Millionen Jahren von der Linie, aus der die wirklichen Fische hervorgingen – und von der auch die landlebenden Wirbeltiere abstammen.

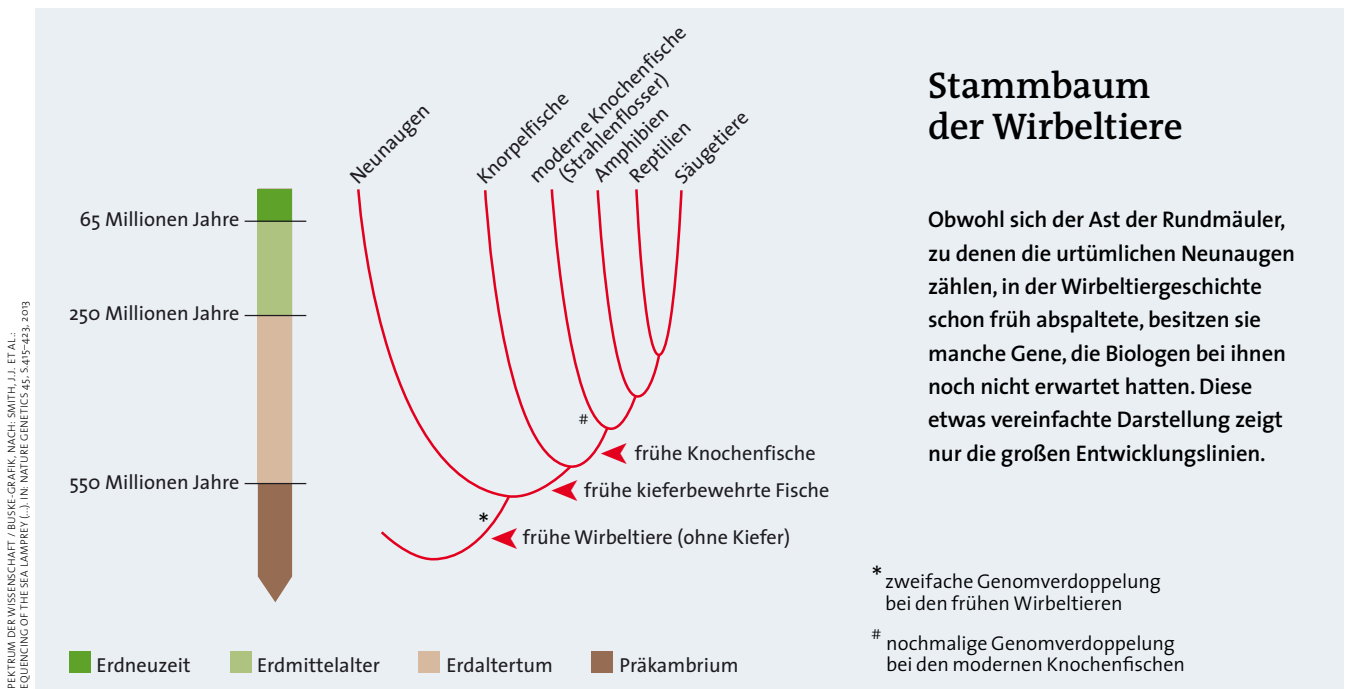
Die Rundmäuler (*Cyclostomata*) sind mit etwa 25 Arten von Neunaugen und etwa 43 Arten von Schleimaalen die nächsten lebenden Verwandten der

Wirbeltiere mit Kiefern. Dies machte es für Evolutionsforscher und Genetiker besonders spannend, das Genom des Meerneunauges (*Petromyzon marinus*) zu entziffern und näher in Augenschein zu nehmen (*Nature Genetics* 45, S. 415–421, 2013). An dem Projekt beteiligten sich weltweit über 50 Wissenschaftler aus fast 40 Laboren, darunter auch meines an der Universität Konstanz.

Dass Neunaugen Wirbeltiere sind, zeigen unter anderem ihr knorpeliges inneres Skelett sowie die Struktur ihres Gehirns. Dieses liegt in einer Schädelkapsel geschützt und ist schon deutlich in drei Abschnitte aufgeteilt, die verschiedene Aufgaben erfüllen. Vieles an ihnen ist jedoch sehr urtümlich geblieben, etwa das Kiemenskelett, das noch

aus sieben Kiemenbögen besteht. Einer davon entwickelte sich bei den Fischen unter anderem zu den Kieferknochen und trug später bei den Landtieren zu den Gehörknöchelchen bei. Bei Neunaugen ersetzen ein mit hornartigen Zähnen bewehrter Saugmund sowie eine Raspelzunge die fehlenden Kiefer. Damit heften sie sich an Fischen fest und nehmen von ihnen Blut und Körpersäfte auf (siehe auch SdW 1/2013, S. 16). Außerdem besitzen diese Rundmäuler noch keine paarigen Brust- und Bauchflossen wie richtige Fische – woraus bei den Landtieren die vier Gliedmaßen entstanden –, sondern nur oben und unten einen mittigen Flossensaum.

Trotzdem zeigt das Erbgut von Neunaugen den neuen Studien zufolge be-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: SMITH, J.J. ET AL.: SEQUENCING OF THE SEA LAMPREY (...), IN: NATURE GENETICS 45, S. 415-423, 2013



Neunaugen gehören zu einem sehr alten Wirbeltierast. Ihren Namen verdanken sie den sieben Kiemenlöchern vor Auge und Nasenloch.

DREAMSTIME / TATIANA BABAKOVA

reits manche wesentlichen Charakteristika der anderen Wirbeltiere. Genomforscher wissen schon länger, dass diese ihr Genom irgendwann in ihrer frühen Evolution zweimal verdoppelt haben müssen. Sie halten dies für das vielleicht prägendste Ereignis in der Evolution der Wirbeltiere – unter anderem deswegen, weil die zusätzlichen Gene im weiteren Verlauf oft neue Anpassungen ermöglichten. Zu welcher Zeit die zweifache Verdoppelung geschah – ob vor oder nach dem Abzweigen der Neunaugen von der Stammlinie der Wirbeltiere –, war allerdings noch umstritten. Die Untersuchungen des kompletten Genoms des Meerneunauges bewiesen nun, dass auch die Neunaugen schon diese genomische Charakteristik zeigen. Den Analysen zufolge dürfte sich die Genomvergrößerung also bereits bei den gemeinsamen Ahnen der beiden Abstammungslinien ereignet haben – ein für die Evolutionsforschung wichtiger Befund, weil er die Herkunft und weitere Entwicklung mancher Genfunktionen erhellt. Von den ursprünglich nun jeweils vier Genkopien ging zwar in den verschiedenen Evolutionslinien jeweils ein Großteil wieder verloren, aber Spuren der ursprünglichen Vervielfachung lassen sich in den Genomen von Neunaugen und modernen Wirbeltieren noch nachweisen.

Aus Datenvergleichen kann man nun ebenfalls herleiten, wie das Genom

des gemeinsamen Vorfahren ausgesehen haben könnte. Dessen grundsätzliche Architektur wurde bei den Wirbeltieren offenbar schon sehr früh angelegt – auch das eine wichtige Erkenntnis.

Das Meerneunauge hat rund 26 000 Gene, ähnlich viele wie der Mensch. Verdoppelte Gene behielten bei ihnen die ursprüngliche Anordnung bemerkenswert oft bei, obwohl sonst etliche ihrer Gene heute den Analysen zufolge auf den Chromosomen an anderen Orten liegen als bei den ganz frühen Wirbeltieren. Ihr Genom wurde im Verlauf von 500 Millionen Jahren zwar stark umgebaut, dennoch gibt es genügend Genabfolgen, die sich nicht verändert haben. Letztere müssen also nach aller Erfahrung besonders wichtig sein, wie beispielsweise die Anordnung der Gene in den Hox-Gen-Clustern. Diese Erbfaktoren steuern unter anderem Gene für die frühe Embryonalentwicklung.

Es fällt auf, dass Neunaugen unter den Nukleotidbasen ihrer DNA außergewöhnlich viel Guanin und Cytosin aufweisen, nämlich insgesamt 46 Prozent. In manchen Abschnitten mit für Proteine kodierenden Genen sind es sogar rund 60 Prozent. Normal wären 5 oder 10 Prozent weniger. Das wirkt sich auf die Zusammensetzung von Proteinen aus. Was diese Besonderheit letztlich bedeutet, ist aber noch nicht klar.

Vergleiche mit Genomen anderer Wirbeltiere und mit Wirbellosen zeigen

nun auch, welche Gene bereits bei den frühen Wirbeltieren oder ihren unmittelbaren Vorfahren neu hinzugekommen waren. Unter den Erbanlagen, die bisher als spezifisch für Wirbeltiere mit Kiefern galten, finden sich tatsächlich viele schon beim Neunauge. In diese Fraktion fallen 263 Gene des Menschen aus 224 Genfamilien. Somit entstanden immerhin 1,2 bis 1,5 Prozent unserer Erbanlagen früher neu an der Basis der Wirbeltiere als bisher gedacht.

Vom Flossensaum zu den Gliedmaßen

Der gemeinsame Vorfahre wies andererseits anscheinend auch bereits manche genetischen Grundlagen für Merkmale auf, die sich erst bei modernen Wirbeltieren ausbildeten. Durch eine weitere Evolution dieser Gene entstanden später beispielsweise Kiefer; aus anderen die umhüllten, schnell leitenden, langen Nervenfasern (Axone); oder etwa das adaptive Immunsystem, das lernt, bestimmte Erreger gezielt anzugreifen. Überhaupt hat sich das Immunsystem von Neunaugen trotz einiger gemeinsamer Grundlagen teils in eine andere Richtung entwickelt, auch wenn es den T- und B-Lymphozyten ähnelnde Zellen aufweist, die »erlernte« Immunität vermitteln.

Selbst einige der genetischen Regulatoren für paarige Gliedmaßen sind bereits im Neunaugen genom erkenn-

bar. Im Prinzip wurden dafür sogar weitgehend die gleichen Elemente, die beim Neunauge für die Ausbildung des Flossensaums an Bauch und Rücken zuständig sind, verwendet und nur abgeändert. Allerdings fehlt dem Rundmaul für das Wachstum paariger Gliedmaßen ein wichtiges Steuerelement für das so genannte *Shh*-Gen. Letzteres ist seinerseits ein zentrales Steuergen für verschiedene körperliche Entwicklungen, das auch an der Ausbildung von Gliedmaßen entscheidend mitwirkt. Die eigentliche Voraussetzung für zwei Brust- und zwei Bauchflossen, die Vor-

gänger von Armen und Beinen, entstand demnach erst später.

Etliche Mitglieder der evolutionär neuen Genfamilien sind für das Nervensystem wichtig, das bei den Wirbeltieren ja eine ganz große Bedeutung für die weitere Evolution hatte. Viele dieser Gene hängen mit Neuropeptiden und Neurohormonen zusammen, verhelfen also zu differenzierteren und genaueren Nervensignalen. Allerdings haben sich wohl weniger die betreffenden Gene selbst verändert als vielmehr ihre Steuerung und ihre Interaktionen, als die Leistungen von Nervensystem und

Gehirn in der weiteren Wirbeltierevolution wuchsen.

Die Erforschung des Neunaugen-genoms wird noch lange weitergehen. Nur ein Beispiel von vielen unerwarteten Entdeckungen: Als frühe Embryonen verzichteten die Tiere ab einem bestimmten Zeitpunkt auf rund 20 Prozent ihres Erbmaterials. Noch rätselt die Wissenschaft, warum und wie dieser Verzicht bewerkstelligt wird.

Axel Meyer hat an der Fakultät für Biologie der Universität Konstanz den Lehrstuhl für Zoologie und Evolutionsbiologie inne.

TEILCHENPHYSIK

Mit Bleiionen zurück zum Urknall

Am LHC bei Genf schicken Wissenschaftler nicht nur Protonen, sondern auch schwere Bleiionen in den Beschleunigerring. Indem sie deren Kollisionen vermessen, wollen sie das Quark-Gluon-Plasma besser verstehen – den exotischen Materiezustand, der unmittelbar nach dem Urknall herrschte.

VON GEORG WOLSCHIN

Den ersten großen Erfolg verbuchte der Large Hadron Collider (LHC), als Forscher mit seiner Hilfe 2012 ein neues elementares Teilchen dingfest machten, mutmaßlich das lange gesuchte Higgs-Boson. Doch die Jagd nach neuen Teilchen ist nicht die einzige Aufgabe der LHC-Wissenschaftler am europäischen Forschungszentrum CERN. Sie wollen auch einen Materiezustand untersuchen, wie er kosmologischen Modellen zufolge bis etwa zehn millionstel Sekunden nach dem Urknall das Universum bestimmte: das Quark-Gluon-Plasma oder QGP (siehe auch SdW 5/2011, S. 86).

Um es zu erzeugen, schießen Teilchenphysiker statt leichter Protonen schwere Bleiionen aufeinander. Bei der folgenden Kollision entsteht ein »Feuerball«: ein räumlich ausgedehnter Bereich sehr hoher Energiedichte, erfüllt von einem komplexen System aus elementaren und stark miteinander wechselwirkenden Teilchen. Diese um-

fassen mehrere Sorten von Quarks – von ganz leicht bis sehr schwer –, entsprechenden Antiquarks sowie Gluonen, die Trägerteilchen der starken Kernkraft.

Bei bisherigen Experimenten existiert das Plasma gerade einmal rund 10^{-23} Sekunden lang, expandiert in dieser Zeit sehr rasch und kühlt dabei ab. Bei rund 170 Megaelektronvolt – Teilchenphysiker messen Temperatur in Energieeinheiten – »frieren« die Quarks und Gluonen des Plasmas dann zu Teilchen und Antiteilchen aus, die vom Kollisionspunkt wegfliegen und von Detektoren gemessen werden. Bei diesen Partikeln handelt es sich wieder um gewöhnliche Materie, in der die Quarks durch Gluonen auf engstem Raum zusammengehalten werden: um Mesonen, die aus je einem Quark und einem Antiquark bestehen, sowie um Baryonen – darunter Protonen und Neutronen –, die sich aus je drei Quarks zusammensetzen. Im Plasma können sich die-

se Quarks hingegen weitgehend frei bewegen, weil die dort herrschende hohe Energiedichte ihre starke Bindung aufbricht.

Was geschieht im »Feuerball«?

Angesichts der komplexen Materie gilt jeder kleine Fortschritt im Verständnis des QGP als großer Erfolg. Besonders wichtige Einsichten gewinnen die Forscher, wenn sie »heiße« Systeme mit »kalten« vergleichen. So finden sie heraus, welche Effekte allein auf die hohe Temperatur im Feuerball zurückzuführen sind. Räumlich ausgedehnte heiße Systeme bilden sich allerdings nur, wenn schwere Ionen wie etwa Blei oder Gold miteinander kollidieren; dann wird die Energiedichte in einem größeren Raumbereich so hoch, dass ein Plasma aus Quarks und Gluonen entsteht. Bei Proton-Proton- oder Proton-Schwerion-Stößen ist die heiße Kollisionszone dagegen zu klein, als dass sich nachweisbar ein QGP bilden würde.

Die aktuellsten Daten zu dieser Frage haben die Forscher in den ersten Wochen des Jahres gewonnen. Am 14. Februar ging der LHC dann wie geplant in seine rund zweijährige Wartungspause. Untersucht wurden kalte Systeme, die man durch Proton-Blei-Kollisionen erzeugte. Sie sollen eine Art Standard schaffen, mit dem die Forscher anschließend das heiße Plasma vergleichen können.

An den Experimenten nahmen alle vier großen LHC-Detektoren teil; einer davon namens ALICE ist sogar speziell für Schwerionenmessungen konzipiert. Während drei der Instrumente vor allem Teilchen registrieren, die sich bei der Kollision nahezu senkrecht vom Partikelstrahl entfernen, misst das vierte, LHCb, solche in Vorwärtsrichtung, also bei vergleichsweise kleinen Streuwinkeln. Besonders interessant sind »zentrale« Kollisionen, bei denen die Teilchen nahezu mittig aufeinandertreffen. Denn dabei wird am meisten Bewegungsenergie in Ruhemasse sowie in Bewegungsenergie neuer Teilchen umgewandelt.

Inzwischen gilt als weitgehend gesichert, dass sich das bei Blei-Blei-Stößen am LHC mutmaßlich erzeugte QGP ähnlich wie eine Flüssigkeit sehr geringer Viskosität verhält, in der kaum Reibung zwischen den Teilchen auftritt. Tatsächlich gleicht die gemeinsame Ausbreitung der beim Zusammenprall entstandenen Teilchen, der so genannte kollektive Fluss, jener einer Flüssigkeit. Viele Eigenschaften des Mediums lassen sich daher gut mit hydrodynamischen

Modellrechnungen für fast ideale Fluide erklären.

Neben dem kollektiven Fluss vermessen die Physiker auch Teilchenjets, die aus dem QGP herausschießen, sowie so genannte Quarkonia, darunter die Υ -Mesonen. Letztere entstehen gleich zu Beginn der Kollision aus einem Bottom- und einem Antibottom-Quark, die selbst im Plasma meist stark aneinander gebunden bleiben. Wird aber ein Υ -Meson von einem Gluon getroffen, bevor es in einen Detektor gelangt, kann es dissoziieren, also auseinanderbrechen. Dann liegen die Messraten von Υ -Mesonen unter den erwarteten Werten. Weil die Dissoziationsrate mit der Gluonendichte wächst und diese wiederum mit steigender Temperatur, erlauben die niedrigeren Raten sowohl Rückschlüsse auf die mittlere Temperatur als auch auf die Gluonendichte im Plasma.

Bereits im September 2012 führten die LHC-Forscher einige Stunden lang Pilotexperimente durch, während derer sie Protonen und Bleiionen bei einer Schwerpunktenergie von 5 Teraelektronvolt aufeinanderschossen. Von Mitte Januar bis Mitte Februar 2013 war der LHC dann speziell für Proton-Blei-Messungen reserviert; dabei wurden 30 000-mal mehr Daten als im September erhoben. Bei Redaktionsschluss war ihre Auswertung aber noch nicht abgeschlossen – die Forscher diskutierten zunächst die Daten aus der Pilotzeit.

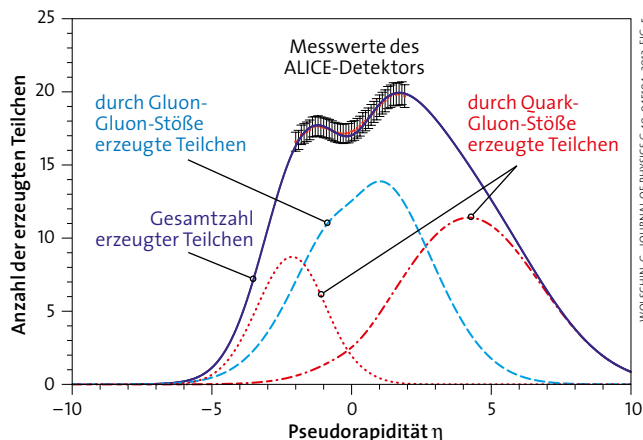
Die grundlegende Messgröße, nämlich Anzahl und Winkelverteilung (ge-

nauer: Pseudorapiditätsverteilung) der erzeugten geladenen Mesonen und Baryonen, konnten die Wissenschaftler des ALICE-Teams dabei jedoch schon feststellen (*Physical Review Letters* 110, 032301, 18. Januar 2013). Während bei zentralen Blei-Blei-Stößen, also in einem heißen System, etwa 1600 geladene Teilchen fast genau senkrecht zum Strahl (bei »midrapidity«) davonfliegen, fanden sich bei Proton-Blei-Reaktionen nur 17. Anders als bei Blei-Blei-Kollisionen ist die Verteilung der erzeugten Teilchen nun auch asymmetrisch: In Richtung des ankommenden Bleistrahls entstehen mehr Teilchen als in Gegenrichtung (siehe Diagramm unten). Dass ihre Verteilung in Gegenrichtung zudem steiler abfällt, ist theoretisch vorausgesagt; die laufenden Auswertungen werden zeigen, ob sich dies bestätigt.

Ein möglicher Hinweis auf das Quark-Gluon-Plasma

Das Interesse der Forscher gilt vor allem dem Unterdrückungsfaktor R . Er sinkt in dem Maße, in dem Prozesse in der Kollisionszone die Bildung von Mesonen verhindern. Passiert bei einer Kollision, an der Schwerionen beteiligt sind, physikalisch nichts anderes, als wenn einfach nur viele Protonen aufeinanderprallen, ist R gleich 1. Hat R einen niedrigeren Wert, müssen zusätzliche Effekte im Spiel sein. Möglicherweise ist dann ein QGP entstanden, das auf unterschiedliche Weise die Zahl der entstehenden Teilchen gegenüber den erwarteten Werten reduziert.

Treffen Protonen auf Bleiionen, fliegen kürzeste Zeit später zahlreiche geladene Teilchen aus der Kollisionszone. Dieses Diagramm, das auf Berechnungen des Autors und auf Daten des ALICE-Teams beruht, stellt ihre Zahl als Funktion der Pseudorapidität η dar: ein dimensionsloses Maß für den Streuwinkel der erzeugten Teilchen ($\eta = 0$ entspricht einem Streuwinkel von 90 Grad, siehe auch Skizze S. 16). In Richtung des Bleistrahls ($\eta > 0$) werden mehr Teilchen erzeugt als in Richtung des Protonenstrahls ($\eta < 0$); die Flanken der Verteilung sind der Theorie zufolge unterschiedlich steil.



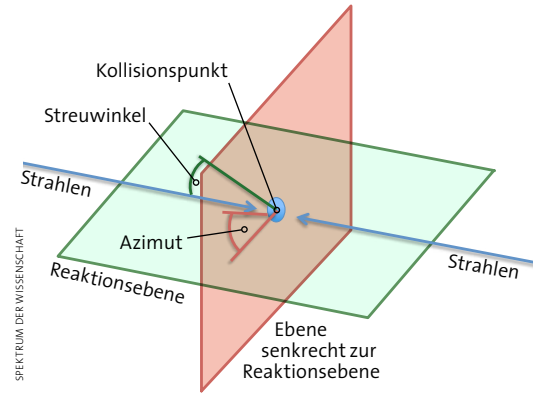
Zumindest in einem bestimmten Impulsbereich geschieht bei Proton-Blei-Kollisionen in recht guter Näherung tatsächlich nicht viel anderes als bei der Kollision eines Protons mit vielen Protonen nacheinander (blaue Punkte im Diagramm unten auf der Seite). Bei Stößen, bei denen sich Bleiionen streifend treffen, macht das Plasma bereits seinen Einfluss geltend – allerdings nicht sehr stark, weil es noch relativ kalt ist (grüne Punkte). Treffen Bleiionen hingegen zentral aufeinander, »unterdrückt« das sich bildende heiße QGP die Teilchenentstehung deutlich (rote Punkte). Für Theoretiker ist damit unter anderem klar, dass für die niedrigen R -Werte keine Prozesse im kalten System verantwortlich sein können; Ursache der gemessenen Unterdrückung muss das heiße System sein.

Ein weiteres Resultat der jüngsten Experimente sind unerwartete Strukturen in der Verteilung der gemessenen Teilchen. Bei ihren Analysen greifen die Forscher je zwei Teilchen heraus, bestimmen deren Streu- und Azimutwinkel – also die Richtung, in die sie vom Kollisionspunkt wegfliegen – und berechnen anschließend die Differenz zwischen den Streuwinkeln sowie zwischen den Azimutwinkeln. Dann untersuchen sie, ob der Teilchenfluss in bestimmte

Richtungen stärker unterdrückt wird als in andere, indem sie die Erzeugungsraten von Teilchenpaaren als Funktion der beiden Winkeldifferenzen auftragen (Grafik rechte Seite).

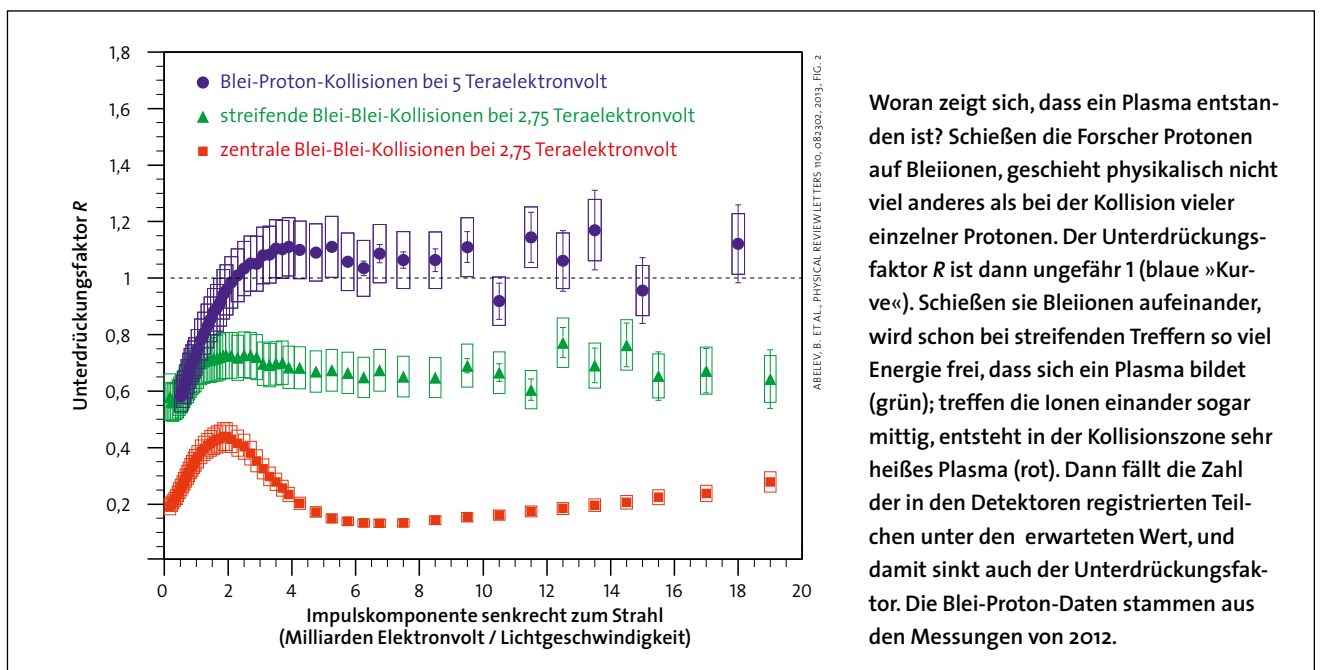
Tatsächlich taucht im Diagramm ein »Grat« auf – eine Form ähnlich der eines schmalen Bergrückens –, den viele Simulationen nicht vorhergesagt hatten. Ein solcher Grat war bereits vor einigen Jahren bei Gold-Gold-Kollisionen am US-amerikanischen Schwerionenbeschleuniger RHIC in Brookhaven (New York) und später bei Blei-Blei-Kollisionen am LHC beobachtet worden. Die Theoretiker interpretierten ihn zunächst als Folge von Wechselwirkungen zwischen Teilchen im QGP, die während dessen Expansion über einen vergleichsweise großen Raumbereich hinweg herrschen.

Die Überraschung war daher groß, als CMS-Forscher 2010 ganz ähnliche Effekte auch in Proton-Proton-Reaktionen bei sieben Teraelektronvolt fanden, obwohl sich bei diesen überhaupt kein Plasma bilden sollte (*Journal of High Energy Physics* 1009, 91, September 2010). Bei den Proton-Blei-Experimenten im September 2012 fand die CMS-Gruppe dann erneut einen Grat (*Physics Letters B* 718, S. 795–814, 8. Januar 2013).

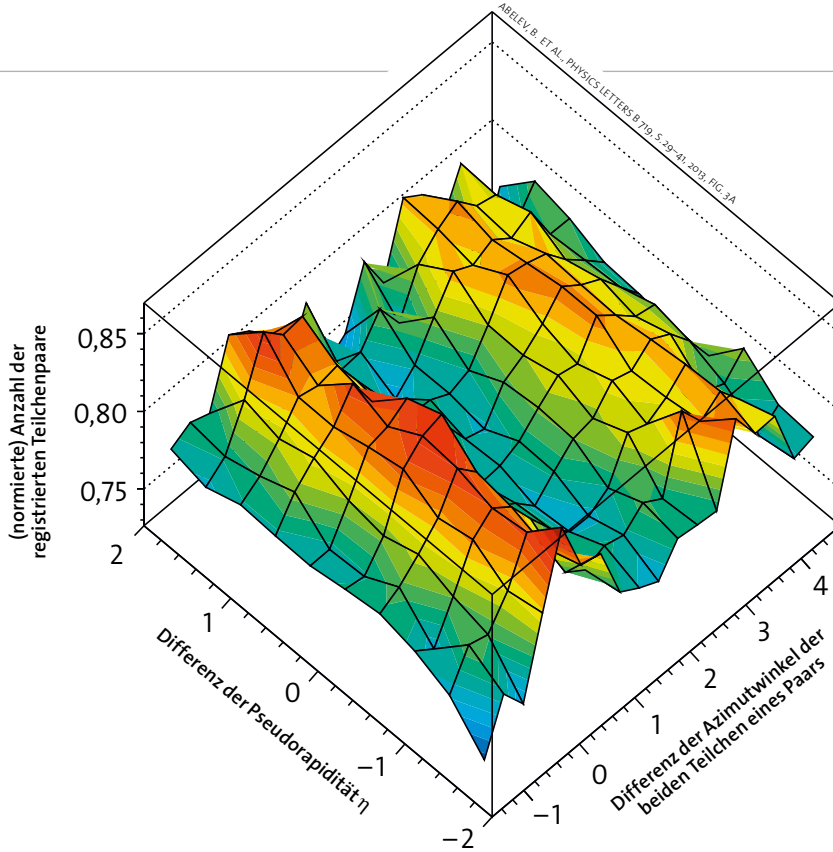


Im Februar 2013 präsentierten die ALICE-Forscher das rechts stehende Diagramm, das die Richtungsverteilung von Teilchenpaaren darstellt. Die beiden auffälligen »Grate« waren von vielen Theorien nicht vorhergesagt worden und bedürfen nun einer Erklärung. Die Grafik oben zeigt, wie die Forscher den Azimut- und den Streuwinkel definieren.

Erstaunlicherweise ist der Effekt ähnlich stark ausgeprägt wie in Blei-Blei-Experimenten, obwohl beide nach heutigem Verständnis zu deutlich verschiedenen Ergebnissen führen sollten. Die ALICE- und ATLAS-Teams bestätigten die Resultate mittlerweile durch neue Auswertungen und fanden außerdem erstmals einen zweiten Grat, dessen Entstehungs-



Woran zeigt sich, dass ein Plasma entstanden ist? Schießen die Forscher Protonen auf Bleiionen, geschieht physikalisch nicht viel anderes als bei der Kollision vieler einzelner Protonen. Der Unterdrückungsfaktor R ist dann ungefähr 1 (blaue »Kurve«). Schießen sie Bleiionen aufeinander, wird schon bei streifenden Treffern so viel Energie frei, dass sich ein Plasma bildet (grün); treffen die Ionen einander sogar mittig, entsteht in der Kollisionszone sehr heißes Plasma (rot). Dann fällt die Zahl der in den Detektoren registrierten Teilchen unter den erwarteten Wert, und damit sinkt auch der Unterdrückungsfaktor. Die Blei-Proton-Daten stammen aus den Messungen von 2012.



ursache ebenfalls noch unklar ist. Um die Grate zu erklären, werden nun verschiedene Ansätze untersucht; einige davon hängen mit den hohen Gluondichten zu Beginn der Kollisionen zusammen.

Die Theoretiker haben also auch in der Wartungspause des LHC alle Hände voll zu tun. Und weit darüber hinaus, denn insgesamt sammelten die Experi-

mentatoren am Genfer Beschleuniger schon mehr als 35 000 Terabyte Daten: unter anderem zum Quark-Gluon-Plasma, zum Higgs-Teilchen und zur Asymmetrie von Materie und Antimaterie im Universum. Ein großer Teil davon ist noch gar nicht ausgewertet.

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

MEDIZIN

Neue Tatverdächtige bei Alzheimer

Krankhafte Ablagerungen im Gehirn galten lange als Schuldige am Neuronensterben bei der Alzheimerdemenz. Doch neueren Studien zufolge beginnt die Zellzerstörung bereits viel früher.

VON GERLINDE FELIX

Was verursacht den Untergang von Hirnzellen bei Alzheimerpatienten? Bisher hielten Forscher die charakteristischen Ablagerungen aus verklumpten Proteinen, die sich bei dieser Erkrankung im Gehirn anhäufen, für

die Verantwortlichen: zum einen so genannte Beta-Amyloid-Plaques außerhalb von Neuronen, zum anderen Tau-Protein-Knäuel (Neurofibrillenbündel) in den Nervenzellen selbst. Doch in letzter Zeit zeichnet sich zunehmend



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) 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 CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das Spektrum.de-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. Spektrum.de und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-943702-22-4

www.spektrum.de/recherche



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

ab, dass Nervenzellen bei dieser Demenzform noch aus ganz anderen Gründen absterben, und zwar bereits bevor sich solche Verklumpungen breitmachen.

Schon länger haben Wissenschaftler den Verdacht, dass gerade die Vorläufermoleküle der Ablagerungen giftig wirken, nämlich in löslicher Form vorliegende Beta-Amyloid-Oligomere und Tau-Protein-Moleküle. Die Oligomere bestehen aus mehreren Beta-Amyloid-Molekülen, die ihrerseits aus 39 bis 42 Aminosäuren aufgebaut sind. Beta-Amyloid-Moleküle entstehen bei der schrittweisen Spaltung des Vorläuferproteins APP. Wie sich inzwischen immer klarer zeigt, werden die beiden Molekülsorten erst im Verein richtig gefährlich. Viele Einzelheiten dieses Wechselspiels sind jedoch noch rätselhaft (siehe auch: »Kleine Proteine, große Erkenntnisse« und »Beta-Amyloid und Tau – ein Duo infernale«. In: Alzheimer, SdW Spezial Biologie-Medizin-Kultur 3/2012, S. 44 und 56).

Auf einen verblüffenden Zusammenhang stießen kürzlich der Alzheimerforscher George S. Bloom von der University of Virginia in Charlottesville und seine Mitarbeiter (*Journal of Cell Science* 10.1242/jcs.1125880, 2013). Ausgereifte Neurone teilen sich normalerweise nicht mehr, doch bei der Alzheimerdemenz fallen sie aus der Rolle. In der Hirnrinde Betroffener fanden Forscher schon vor Längerem Nervenzellen, die sich offensichtlich auf eine Teilung vorbereiteten. Allerdings vollziehen sie die dann doch nicht, sondern sterben merkwürdigerweise ab, nachdem sie eine Zeit lang sozusagen auf halbem Weg verharren. Offenbar geht ein beträchtlicher Teil der bei der Alzheimerdemenz vor dem Tod verlorenen Nervenzellen, die für das Gedächtnis und das Denken verantwortlich sind, auf diese Weise zu Grunde.

Das gleiche Phänomen tritt bei »Alzheimermäusen« auf, die gentechnisch so verändert wurden, dass sie zwangsläufig ähnliche Symptome und neuronale Ausfälle entwickeln wie Alzheimerpatienten. Auch deren Hirnneurone treffen Vorbereitungen zur Teilung,

sterben dann aber nach einiger Zeit – mit den bekannten Folgen wie Gedächtnis- und Orientierungsverlust. Vor ein paar Jahren ließ sich an Zellkulturen nachweisen, dass Beta-Amyloide für den Vorgang unabdingbar sind.

Wie Bloom und sein Team nun in Studien an Alzheimermäusen feststellten, muss auch lösliches Tau-Protein vorhanden sein, damit der unerwünschte Teilungsprozess einsetzt. Schon bei sechs Monate alten Tieren fanden die Forscher viele Hirnneurone, die »verbotenerweise« in die erste, vorbereitende Phase für eine Zellteilung eingetreten waren. Dies geschah aber nicht, wenn die Mäuse das Protein auf Grund eines molekularen Eingriffs nicht herstellen konnten. Ebenso verhielten sich in Kultur gezüchtete Zellen aus der Hirnrinde dieser Mäuse.

Molekularer Hinweis auf drohende Alzheimerdemenz?

Blooms Arbeitsgruppe beschreibt die Vorgänge im Hintergrund genauer. Zunächst sorgen lösliche Beta-Amyloid-Oligomere dafür, dass drei spezielle Enzyme – die Proteinkinasen fyn, PKA und CaMKII – aktiviert werden. Hierfür ist kein Tau-Protein erforderlich. Aufgabe dieser Enzyme ist es, an Proteine Phosphatgruppen anzuhängen. Der Vorgang dient in der Regel dazu, ein Protein seinerseits zu aktivieren oder aber gezielt abzuschalten. Und zwar werden lösliche Tau-Proteine an drei definierten Stellen mit dem Phosphat bestückt (bezeichnet als Y18, S409, S416 – genau in dieser Reihenfolge).

Neurone mit solchermaßen veränderten Tau-Proteinen leiten nun Maßnahmen zu einer Zellteilung ein. Auch bei Mäusen ohne Tau-Proteine aktivieren Beta-Amyloide die erwähnten Proteinkinasen. Die Nervenzellen verbleiben aber in ihrem Normalzustand. Deswegen könnte der Nachweis von Tau-Proteinen mit Phosphatgruppen an den betreffenden Positionen zukünftig möglicherweise als Marker für eine drohende Alzheimererkrankung dienen.

Dennoch ist dieser Weg zum Zelltod bei der Alzheimerdemenz nur einer von mehreren. Lösliche Beta-Amyloide und

Tau-Proteine können, wie man schon etwas länger weiß, zum Beispiel gemeinsam für einen Verlust von Synapsen sorgen – jenen Kontaktstellen zwischen Nervenzellen, die in ausgeklügelte Weise Signale übertragen. Wenn sich lösliches Beta-Amyloid anhäuft, wandern phosphorylierte Tau-Proteine in die Dendriten, also die Signale empfangenden Fortsätze von Neuronen. Das verändert den Kalziumioneneinstrom über die Zellmembran (ein Teilprozess der Signalleitung) massiv, was die Zelle schwer beschädigt. In welcher Form Verwüstungen im Gehirn angerichtet werden, hängt offenbar von verschiedenen Eigenheiten der Amyloide ab: etwa von der Art und räumlichen Anordnung der Einzelmoleküle in einem Oligomer, der Konzentration der Oligomere sowie auch von der Dauer, die Neurone ihnen ausgesetzt sind.

Die große Frage hinter den neuen Entdeckungen ist, was die Hirnzellen überhaupt veranlasst, ihre Teilung einzuleiten. Forscher der Universität Bochum um Thorsten Müller, Katrin Marcus und Helmut Meyer entdeckten dazu kürzlich einen mutmaßlichen Puzzlestein (*Journal of Cell Science* 10.1242/jcs.121004, 2013). Sie fanden in einem Zellkulturmodell eigenartige Kugelstrukturen in den Zellkernen. Diese bestanden unter anderem aus zwei Proteinen, die gewöhnlich bei der Zellteilung mitwirken. Eines davon, FE65 genannt, wird normalerweise vom Vorläuferprotein APP der Beta-Amyloide in der äußeren Zellmembran verankert. Unter bestimmten Bedingungen wandert FE65 aber in den Zellkern, wodurch sich auch die Menge des zweiten Proteins, BLM, erhöht. Die Forscher vermuten nun, dass die Vorläufer der Amyloide mit dem Protein FE65 nicht korrekt zusammenarbeiten. Möglicherweise bekommen die Nervenzellen wegen der in ihrem Kern anwesenden Proteine das falsche Signal, sich zu teilen. Das versuchen sie zwar, schaffen es aber nicht und sterben letztlich ab. Welche Rolle die Tau-Proteine hierbei spielen, ist noch nicht bekannt.

Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Markt Wartenberg.

Organe aus dem 3-D-Drucker

Funktionsfähige Organe künstlich herzustellen, ist ein Wunschtraum der Mediziner. Dazu müssen sie synthetisches Gewebe mit körpereigenen Blutgefäßen verknüpfen.

VON KATHERINE HARMON

Auf TED-Konferenzen – TED steht für »technology«, »entertainment«, »design« – tauschen Fachleute der unterschiedlichsten Gebiete ihre Visionen aus, frei nach dem Motto: »Ideen, die es wert sind, verbreitet zu werden.« Doch der Vortrag von Anthony Atala vom Wake Forest Institute for Regenerative Medicine im Jahr 2011 war selbst für TED-Standards sensationell. Von den Zuschauern zunächst unbenutzt, summte im Hintergrund eine Apparatur aus Fläschchen und Düsen geheimnisvoll vor sich hin. Plötzlich, mitten im Vortrag, zoomte eine Kamera

auf das Innere des Geräts. Dort bewegte sich eine Schiene vor und zurück, als würde sie etwas weben. Was dahintersteckte, erfuhren die Besucher erst nach und nach: Die Maschine deponierte nach Art eines 3-D-Druckers lebende Zellen Schicht für Schicht auf einer Plattform. Das Verfahren ähnelt dem Prinzip von Tintenstrahldruckern – nur verwendet das Gerät statt Tinte einen Brei aus lebenden Zellen. Atalas Apparatur produzierte so schließlich eine lebensgroße menschliche Niere.

Für viele Menschen wäre ein einfacher und schneller Weg zur Herstellung

von Organen ein Segen. Allein in Deutschland warten derzeit mehr als 10 000 Patienten auf eine Organspende. Aber die Niere, die Atala vor zwei Jahren druckte, war noch nicht so weit, dass er sie einem Menschen hätte implantieren können. Es fehlten zwei entscheidende Elemente: funktionierende Blutgefäße und Tubuli, die für das Filtrieren von Urin wichtig sind. Ohne solche inneren Kanäle haben große Organe wie die Niere keine Chance, genügend essenzielle Nährstoffe und Sauerstoff zu bekommen und Abfallprodukte aus dem Inneren der Zellen zu entsorgen.

ANZEIGE



MOBILITÄT

Gefördert durch Erdgas aus Norwegen

Unter allen fossilen Brennstoffen ist Erdgas der emissionsärmste und darüber hinaus auch hoch effizient: egal ob bei der Stromerzeugung, bei der Beheizung von Privathaushalten, als Kraftstoff für Verkehrsmittel oder als Energielieferant für Deutschlands Industrie. Mit Erdgas aus Norwegen kann Deutschland seinen Energiebedarf kosteneffektiv decken. Erfahren Sie mehr auf statoil.de/erdgas



Statoil

Die (allzu) kleine Welt der Hirnforscher

Statistisch steht die Neurowissenschaft auf tönernen Füßen.

Der Large Hadron Collider bei CERN braucht rund eine Billion Proton-Proton-Kollisionen, um wenigstens eines der lange gesuchten Higgs-Partikel zu produzieren. Darum dauerte es Jahre, bis die Physiker mit ausreichend hoher statistischer Wahrscheinlichkeit den Nachweis des Teilchens bekannt geben durften.

Von derart gigantischem Aufwand können Neurowissenschaftler nur träumen. Nicht einmal die gesamte Erdbevölkerung ergäbe eine vergleichbare Testbasis für Hirnforscher, und dass die irdische Fauna für Tierversuche solchen Ausmaßes nicht zur Verfügung steht, ist gewiss gut so.

Nun wird man gleich einwenden, die im Gehirn gesuchten Effekte träten viel häufiger auf und seien weniger schwer nachweisbar als ein exotisches Teilchen im Beschleuniger. Das mag sein. Dennoch täten die Neuroforscher gut daran, den Umfang ihrer Datenerhebung drastisch zu erweitern. Denn die Stichproben, auf die sie ihre Behauptungen stützen, sind in den meisten Fällen viel zu klein.

Diese beunruhigende These vertritt ein Team um die Psychologin Katherine S. Button von der University of Bristol (*Nature Reviews Neuroscience* 14, S. 365, 2013). Ein Koautor ist der Mediziner John P. A. Ioannidis von der Stanford University School of Medicine in Kalifornien, der schon vor Jahren mit dem Artikel »Why Most Published Research Findings Are False« (Warum die meisten publizierten Forschungsergebnisse falsch sind) Furore machte (*PLOS Medicine* 2, e125, 2005).

Kernbegriff von Buttons Analyse ist die statistische »Power« oder Aussagekraft. Die gibt an, wie sicher ein experimentelles Verfahren einen echten Effekt nachzuweisen vermag. Eine Power von 20 Prozent bedeutet, dass das fragliche Verfahren nur 20 von 100 tatsächlich vorhandenen Effekten findet. Umgekehrt aber entdeckt es jede Menge vermeintlich signifikante Effekte, die in Wirklichkeit gar nicht existieren. Um das Ergebnis der Untersuchung vorwegzunehmen: Die statistische Aussagekraft der im Jahr 2011 publizierten neurowissenschaftlichen Fachartikel lag zwischen mageren 8 und 31 Prozent – wobei Button betont, selbst dies gelte nur unter extrem optimistischen, also für die untersuchten Artikel günstigen Annahmen.

Methodisch scheint die Button-Studie selbst unangreifbar zu sein. Das Team zog in einer Art Metauntersuchung zweiter Ordnung 49 Metaanalysen heran, die 2011 in den Neurowissenschaften angestellt wurden, und berechnete aus deren Ergebnissen in Kombination mit den Daten der 730 zu Grunde liegenden Einzelstudien die statistische Power für jede dieser Einzeluntersuchungen. So kam am Ende der genannte Durchschnittswert von 20 Prozent heraus, plus minus rund 10.

Das Grundübel ist die unzureichende Größe der Stichproben – nicht allein wegen ihrer statistischen Schwäche. Wer nur wenige Experimente anstellt, um einen Effekt nachzuweisen, wird versucht sein, positive Resultate überzubewerten und negative zu verwerfen; wer hingegen große Datenmengen statistisch auswertet, ist gegen Wunschdenken eher gefeit. Hinzu kommt der Erfolgsdruck, der zum Publizieren positiver Daten anreizt, während aufwändige Kontrollstudien, die vermeintliche Effekte als falsch entlarven, wenig zum Renommee beitragen.

Eine paradoxe Rolle spielt der Tierschutz. Er legt nahe, aus ethischen Gründen möglichst kleine Stichproben zu wählen. So suchen im Durchschnitt nur rund 20 Ratten oder Fische den Weg durch künstliche Labyrinth. Doch welchen Sinn hat es, in vielen allzu klein angelegten und darum statistisch bedeutungslosen Forschungsarbeiten insgesamt doch wieder viele hunderte Tiere zu benutzen – für nichts und wieder nichts?



Michael Springer

Darum versuchten die Forscher, Hohlstrukturen in das Organ zu drucken, indem sie Löcher an zueinander passenden Stellen auf jeder Ebene vorsahen. Doch dabei entstanden Kanäle, die rasch kollabierten, sowie Nahtstellen, an denen das Gewebe unter dem Druck des hindurchströmenden Bluts reißen würde.

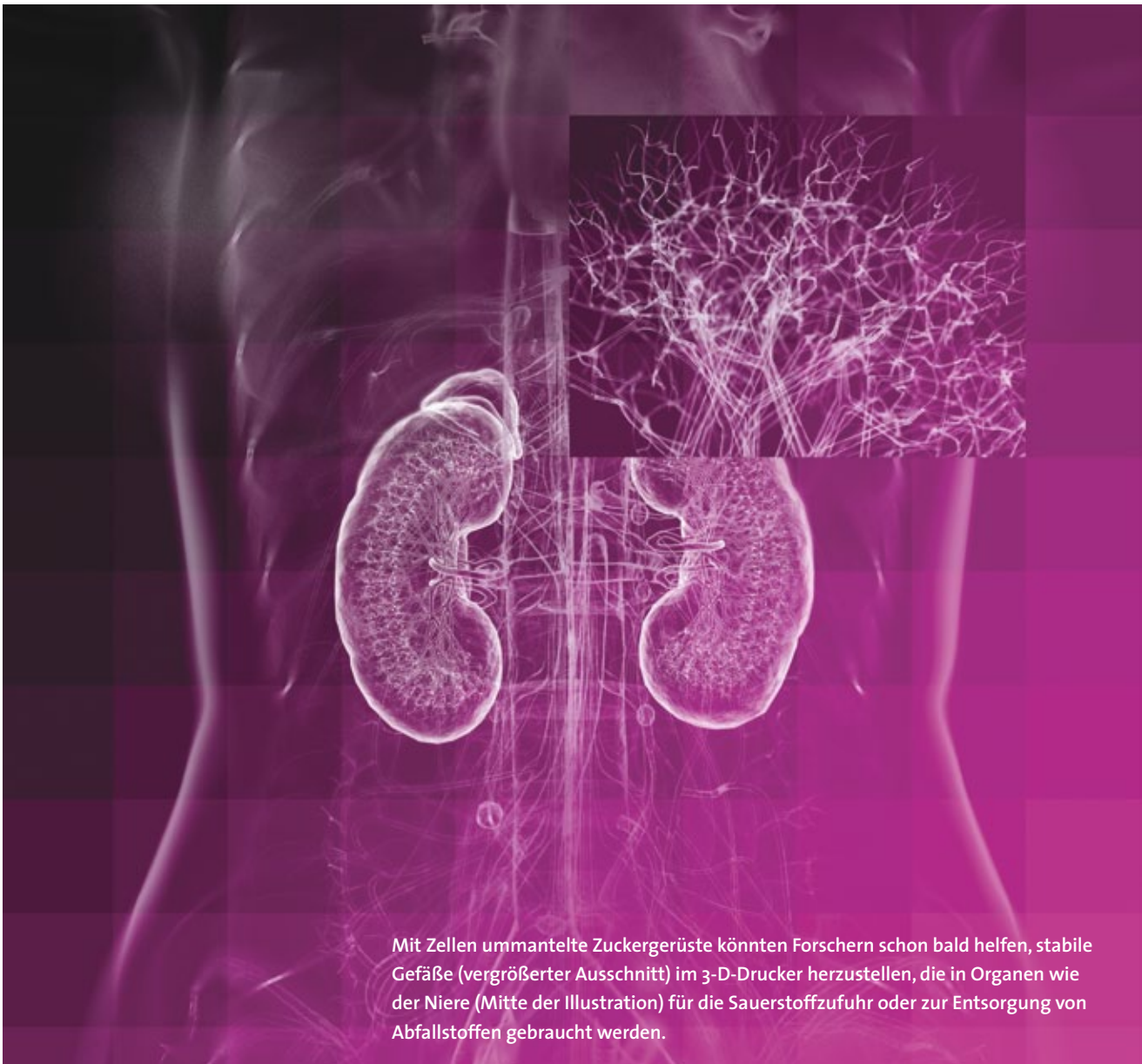
Adergeflecht aus Zucker

Ein Wissenschaftlerteam von der University of Pennsylvania in Philadelphia und vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge hat sich für das Problem nun eine clevere Lösung einfallen lassen. Anstatt ein Organ und seine inneren Gefäße auf einmal nachzubilden, drucken sie zunächst ein Adergeflecht aus Zucker – und bauen erst danach Gewebe aus Zellen um es herum auf. Später wird der Zucker aufgelöst. Zurück bleiben Durchgänge mit fehlerfreier Struktur, die die Druckpulse des hindurchgepumpten Bluts aushalten.

Die Idee kam Jordan Miller, einem der führenden Forscher innerhalb des Projekts, in zwei Etappen. Zuerst beobachtete er bei der Ausstellung Body World, die konservierte menschliche Leichen und Organe zur Schau stellt, wie Präparatoren das Adergeflecht eines großen Organs frei legten. Dazu spritzten sie Silikon in das Gefäßsystem und lösten dann das umgebende organische Gewebe ab.

Eine solche Form zu drucken, sollte funktionieren, überlegte Miller. Das Problem wäre, das Silikon wieder aufzulösen, nachdem das Organ aufgebaut ist. Das ginge nur mit giftigen Chemikalien. Die Lösung kam Miller in einem Restaurant, wo eine elegante Kreation aus Hartzucker sein Dessert krönte. Warum nicht eine Form aus Zucker für die Blutgefäße und andere Kammern von Organen herstellen, die sich mit Wasser wieder auswaschen ließe?

Also wandelten Miller und seine Kollegen einen 3-D-Drucker namens RepRap, dessen Bauanleitung samt Software im Internet frei zugänglich ist, in geeigneter Weise ab. Damit druckten sie aus einem wohldosierten Zuckerge-



Mit Zellen ummantelte Zuckergerüste könnten Forschern schon bald helfen, stabile Gefäße (vergrößerter Ausschnitt) im 3-D-Drucker herzustellen, die in Organen wie der Niere (Mitte der Illustration) für die Sauerstoffzufuhr oder zur Entsorgung von Abfallstoffen gebraucht werden.

misch Fasern verschiedener Größe, deren Durchmesser von 100 Mikrometer bis zu einem Millimeter reichte.

Mit Hilfe dieser Fasern schuf das Team ein idealisiertes Gefäßnetz und überzog es mit einem bioverträglichen Polymer, um zu verhindern, dass sich der Zucker vorzeitig auflöst. Dann umhüllten die Wissenschaftler das Ganze mit Komponenten der extrazellulären Matrix und Endothelzellen, die normalerweise Blutgefäße auskleiden. Schließlich entfernten die Forscher den Zucker mit Wasser. Fertig waren stabile Blutgefäße, gebildet aus lebenden Zellen.

Den Rest übernahmen die Zellen selbst. Genau wie im menschlichen

Körper begannen sie, die Blutgefäße umzuformen, in denen sie sich befanden. Dadurch festigten und verstärkten sie das Gesamtgefüge. An den Enden größerer Gefäße bildeten sie sogar winzige Kapillaren. »Wenn wir den Zellen Raum zur freien Entfaltung lassen, müssen wir die Architektur gar nicht perfekt entwerfen«, sagt Christopher Chen, der das Tissue Microfabrication Lab der University of Pennsylvania leitet. Letztlich könne also der Körper selbst für die Feinheiten eines fast fertigen Organs sorgen, so dass es voll funktionstüchtig wird.

Chen, Miller und ihre Kollegen haben kleine Blöcke von Lebergewebe,

deren Blutgefäße aus Zucker geformt waren, Nagetieren implantiert. Dabei konnten sie zeigen, dass sich die Gefäße des künstlichen Organs mit dem bestehenden Adersystem verbinden. Ihre Gewebestückchen können bisher noch kein komplettes Organ ersetzen, aber es gehört nicht viel Fantasie dazu, sich vorzustellen, wie das Hinzufügen von Leber-, Nieren- oder Bauchspeicheldrüsenzellen zu einem voll ausgebildeten Gefäßnetz eines nicht fernen Tages ermöglicht, auch größere Körperteile in 3-D zu drucken.

Katherine Harmon ist Redakteurin bei »Scientific American«.



Der menschliche Geist hat uralte Wurzeln.

TITELTHEMA: ANTHROPOLOGIE

Die Geburt der Kreativität

Zu Erfindern und Künstlern wurden Menschen nicht erst vor 40 000 Jahren, als der *Homo sapiens* in Europa erschien. Afrikanische Kulturen liefern viel ältere Zeugnisse von Kreativität. Die ersten Anfänge finden sich sogar bei noch früheren Menschen.

Von Heather Pringle

Kaum öffnet der Louvre des Morgens seine Tore, strömen Menschengruppen in den Saal mit der »Mona Lisa«. Leonardo da Vinci vollendete das Bild Anfang des 16. Jahrhunderts. Die durchgeistigte Schönheit und das rätselhafte Lächeln des Antlitzes erzielte er mit einer von ihm erfundenen Maltechnik, die er »sfumato« (verraucht, verschwommen) nannte. Um Linien und Farbübergänge weicher zu zeichnen, als wäre das Bild von einem leichten Nebelschleier eingehüllt, legte er über Jahre bis zu 30 hauchdünne, durchscheinende Schichten auf.

Hinter Schöpfungen wie der »Mona Lisa«, den Meisterwerken eines Mozart oder Michelangelo steht der erfindungsreiche Geist eines Ausnahmekünstlers. Letztlich sind sie höchster Ausdruck einer uralten menschlichen Gabe: des Drangs, zu verbessern, zu erfinden, aber auch zu gestalten und sich auszudrücken.

Wie und wann diese schier unermessliche Erfindungsgabe und Schöpferkraft einst aufkam, das fragen sich Forscher weltweit. Denn unsere Hominidenvorfahren besaßen diese Eigenschaften nicht von Anfang an. Vor ungefähr sechs Millionen Jahren tauchten in Afrika mit den Australopithecinen die ersten Vormenschen auf. Danach hinterließen die frühen Vertreter unserer Abstammungslinie allerdings fast 3,4 Milli-

onen Jahre lang kaum Anhaltspunkte für technische Neuerungen. Vermutlich beschafften sie sich ihre Nahrung weitgehend mit den Händen. Werkzeuge, die sie benutzt haben mögen – etwa Stöcke zum Aufspießen oder zum Ausgraben von Knollen –, sind nicht erhalten.

Irgendwann kamen unsere Vorfahren dann auf die Idee, Schneidgeräte selbst anzufertigen, indem sie vom Wasser rundgeschliffene Kiesel mit Hammersteinen bearbeiteten. Und vor fast 1,8 Millionen Jahren hatten Frühmenschen, nun also bereits Vertreter der Gattung *Homo*, den Faustkeil »erfunden« – eine zweifellos geniale Idee (Kasten S. 25). Dieses handliche Werkzeug war zweiseitig bearbeitet, scharf und spitz, konnte durchaus unterschiedlich aussehen und eignete sich dadurch für viele Zwecke. Danach aber tat sich lange Zeit wieder nur wenig Aufregendes. In diversen Abwandlungen blieb der Faustkeil über 1,6 Millionen Jahre das bezeichnende Steinwerkzeug.

Wann kam die Zeit für neue Ideen, die Erprobung noch nicht da gewesener Technologien und für künstlerischen Ausdruck? Bis vor einigen Jahren hätten viele Experten diese Wende am Anfang des Jungpaläolithikums vermutet, des letzten Abschnitts der Altsteinzeit, der in Europa vor etwa 40 000 Jahren einsetzte. Damals erschien der moderne *Homo sapiens* in Europa. Der Fundlage nach schufen Menschen nun schlagartig erstmals überhaupt Kunstwerke: Sie fädelten Muscheln zu Ketten, zeichneten und malten auf Höhlenwände Tier- und Jagdszenen und schnitzten kleine Figuren – darunter vieles von erstaunlicher Schönheit und Ausdruckskraft –, ja sogar Flöten. Zur gleichen Zeit erfanden diese Menschen offenbar eine Vielzahl neuartiger Gerätschaften aus Stein oder Knochen. Folglich vermuteten Anthropologen und Archäologen, dass damals eine genetische Mutation aufgetreten war, die plötzlich den menschlichen Geist erweiterte und nun völlig andere Denkweisen und Vorstellungswelten ermöglichte: Kreativität.

Neuere Befunde, vor allem auch Entdeckungen in Afrika, erzählen jedoch etwas völlig anderes. Denn in den letzten zehn Jahren kamen diverse Zeugnisse aus viel älteren Zeiten zu Tage, die auf Kunst und fortgeschrittene Technologie hindeuten. Die Begabung, Neues zu erfinden, Technologien vo-

AUF EINEN BLICK

WAS DEN MENSCHEN ERFINDUNGSREICH MACHTE

1 Noch vor wenigen Jahren glaubten Archäologen und Anthropologen, dass sich die Menschen bis vor 40 000 Jahren kulturell kaum weiterentwickelt hätten. Umso eindrucksvoller wirkt der **Innovationsschub** an Technologien und Kunst am Anfang des **Jungpaläolithikums** in Europa.

2 Neuen archäologischen **Befunden aus Afrika** zufolge bewies der *Homo sapiens* schon wesentlich früher eine **hohe Erfindungsgabe**. Die Wurzeln finden sich sogar bereits bei seinen Vorläufern.

3 Die Voraussetzungen für die menschliche Kreativität bildeten sich unter dem Einfluss von biologischen und sozialen Faktoren über Hunderttausende von Jahren heran. Dann brachten enge **soziale Vernetzungen** sie zur Blüte.

ranzutreiben und Kunstwerke zu schaffen, besaß der *Homo sapiens* demnach sehr viel früher, als Forscher bisher annahmen. Die Wurzeln der Schöpferkraft scheinen sogar schon bei älteren Menschenarten zu liegen, also vor dem Auftritt des *Homo sapiens* vor knapp 200 000 Jahren. Merkwürdigerweise brach dieses Talent aber zunächst nur selten durch, glommt vielmehr die meiste Zeit unter der Oberfläche. Außerdem trat es augenscheinlich auch nicht plötzlich unvorhergesehen und gleich in vollem Umfang zu Tage. Vielmehr bahnte es sich wohl im Verlauf einiger hunderttausend Jahre auf einem Nährboden mit allerlei biologischen und sozialen Komponenten allmählich an.

Steinzeitliche Matratzen mit eingebautem Insektenschutz

Lange haben Forscher den Gebrauch von Symbolen als entscheidendes Kriterium für geistige Leistungen auf modernem Niveau angesehen, zumal Sprachfähigkeit als Voraussetzung dafür gilt. So beweisen etwa die Höhlenmalereien aus dem Jungpaläolithikum, dass das Denken ihrer Schöpfer dem unseren gleichzusetzen ist. Inzwischen suchen Archäologen aber auch nach anderen Ausdrucksformen von moderner Kognition und modernem Verhalten – sowie nach deren Vorläufern.

Lyn Wadley von der University of the Witwatersrand in Johannesburg (Südafrika) führt zu diesem Zweck seit den 1990er Jahren in der Sibuduhöhle rund 40 Kilometer nördlich von Durban Ausgrabungen durch (siehe Bilder S. 26/27). Vor zwei Jahren stieß sie mit ihren Mitarbeitern auf eine Schicht aus weißlich blassem Pflanzenmaterial. Die spröde, faserige Masse erinnerte an Streu von Schlaf- und Ruhelagern aus viel späteren Zeiten. Genauso gut könnten die Pflanzenteile aber vom Wind in die Höhle geweht worden sein. Um das zu klären, blieb den Forschern nichts anderes übrig, als die Schicht vor Ort einzugipsen, was drei volle Wochen dauerte, und im Labor zu untersuchen.

Die Mühe war jedoch nicht umsonst. Es stellte sich tatsächlich heraus, dass sich Menschen vor 77 000 Jahren in der Sibuduhöhle mit Blättern Lager hergerichtet hatten – fast 50 000 Jahre früher als bisher von anderen Orten bekannt. Das eigentlich Aufregende dabei ist: Sie verwendeten von den vielen Pflanzen, die im Umkreis wuchsen, nur die Blätter einer einzigen Gehölzart, der Kapquitte *Cryptocarya woodii*. Deren Eigenschaften müssen sie gut gekannt haben. Dieser Baum bildet giftige Abwehrstoffe gegen Insekten und deren Larven, etwa gegen Malariamücken. »So eine Bettunterlage ist natürlich praktisch, besonders wenn man nah an einem Fluss lebt«, meint Wadley lakonisch.

Wahrscheinlich verstanden sich die Bewohner der Höhle auch auf die Konstruktion von Tierfallen oder -schlingen, denn dort finden sich zahlreiche Reste kleiner Antilopen. Größere Tiere dürften sie sogar schon mit Pfeil und Bogen erlegt haben. Dafür sprechen Größe und Form von in der Höhle gefundenen steinernen Spitzen sowie daran erkennbare Gebrauchsspuren. Diese Menschen waren versiert genug,

um aus verschiedenen Zutaten neue Werkstoffe zusammenzumischen. Wadleys Arbeitsgruppe entdeckte an den Steinspitzen dunkle Reste von Klebsubstanzen, mit denen man sie vermutlich am Schaft eines Pfeils befestigte. Die chemischen Analysen der Klebstoffe ergaben eine Vielzahl an Komponenten verschiedener Herkunft. Um die Herstellungsverfahren und Zutatenlisten noch besser zu begreifen, mischten die Forscher unterschiedlich große Ockerteilchen mit allen möglichen klebrigen Pflanzensäften und erhitzen die verschiedenen Mixturen über Holzfeuer. Sie konnten nur stauen: Jene Steinzeitmenschen entpuppten sich, wie sie schreiben, als kundige Chemiker, Alchemisten und Pyrotechniker.

An anderen Orten in Südafrika entdeckten Wissenschaftler in den letzten Jahren immer wieder neue Spuren von ähnlich frühen Erfindungen – wie auch von der Verwendung von Symbolik. Besonders Grabungen in Höhlen an der Südküste sorgen oft für Aufsehen. Die Blomboshöhle etwa, wo der Archäologe Christopher Henshilwood von der University of the Witwatersrand bahnbrechende Entdeckungen machte, bewohnten Jäger und Sammler vor rund 72 000 bis 100 000 Jahren (siehe SdW 12/2005, S. 38). Diese Menschen fertigten Knochennadeln – vielleicht, um damit Fellkleidung zu nähen. Sie ritzten Muster in Ockerstücke und schmückten sich mit Ketten aus kleinen schimmernden Muscheln. Sie hatten sogar ein regelrechtes Künstleratelier, wo sie roten Ocker zermahlten, den sie dann in kleinen, aus Abalonemuscheln hergestellten Gefäßen aufbewahrten – die ältesten bekannten Behältnisse überhaupt.

Fundstücke aus einer etwas weiter westlich gelegenen Höhle bei Pinnacle Point sind noch älter (siehe SdW 12/2010, S. 58). Hier erhitzen Menschen vor 164 000 Jahren Steine aus dem Silcret der Gegend (einem Gestein, das beim Verkitten von Sand und Kies durch Kieselsäure entsteht) kontrolliert im Feuer, wodurch diese eine Konsistenz erhielten, in der sie sich viel besser bearbeiten ließen. »Noch vor zehn Jahren hätten wir von solchen Entdeckungen nicht einmal geträumt«, kommentiert Henshilwood.

Trotzdem besaß der moderne Mensch kein Exklusivrecht in Sachen Technologien. Andere Menschenarten leisteten auch schon Beachtliches, etwa die Neandertaler, deren Entwicklungslinie sich vor über einer halben Million Jahren, vielleicht sogar noch deutlich früher, von der des *Homo sapiens* trennte. Ein Team um den Archäologen Paul Peter Anthony Mazza von der Università degli Studi di Firenze erkannte, dass Neandertaler vor etwa 200 000 Jahren ein Birkenrindenpech herstellten, mit dem sie scharfkantige Abschläge – quasi Steinmesser – an Holzgriffe klebten.

Andere Forscher beschrieben im November 2012 ähnliche Fertigkeiten von der südafrikanischen Fundstätte Kathu Pan 1. Sie glauben, dass dort gefundene 500 000 Jahre alte Steinspitzen zu Wurfspeeren gehörten. Jene Menschen könnten Vertreter von *Homo heidelbergensis* gewesen sein, dem letzten gemeinsamen Vorfahren von Neandertaler und *H. sapiens*. Noch viel früher lernten Menschen anscheinend Feuer zu beherrschen: als Wärmequelle und Schutz gegen Raubtie-

Der lange Weg zur Kunst

Als die Kreativität in Afrika vor 90 000 bis 60 000 Jahren und in Europa vor rund 40 000 Jahren explodierte, muss sie schon lange im Menschen gegärt haben. Aber erst damals sorgte die zunehmende Bevölkerungsdichte für die nötigen Voraussetzungen, die eine Kulturentwicklung vorantreiben: kultureller Austausch und soziale Vernetzung im größeren Rahmen.

3,4 Millionen Jahre alt
Tierknochen mit
Schnittspuren
(Dikika, Äthiopien)

2,6 Millionen Jahre alt
Steinwerkzeuge aus
Abschlägen
(Gona, Äthiopien)

1,76 Millionen Jahre alt
Faustkeile, zweiseitig
bearbeitete Steingeräte
(Turkana, Kenia; Bild unten)

1 Million Jahre alt
verbranntes Knochen-
und Pflanzenmaterial:
Zeichen für Beherr-
schung des Feuers
(Wonderwerkhöhle,
Südafrika)



164 000 Jahre alt
hitzebehandelte Steine
zum Herstellen
von Werkzeug
(Pinnacle Point, Südafrika)



500 000 Jahre alt
Steinspitzen, befestigt an
Holzschäften:
zusammengesetzte Geräte,
vermutlich Speere
(Kathu Pan 1, Südafrika)



71 000 Jahre alt
Steinspitzen für Pfeile
(Pinnacle Point, Südafrika;
Bild oben)

75 000–100 000 Jahre alt
Ockerstücke mit
Ritzmustern
(Blomboshöhle, Südafrika;
Bild rechts)



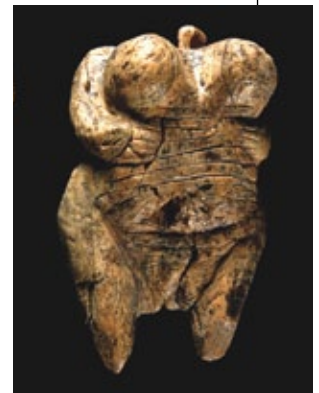
77 000 Jahre alt
»Matratzen« aus
vor Stechinsekten
schützenden Blättern
(Sibuduhöhle, Südafrika)

30 000–40 000 Jahre alt
Nähnadeln
(Kostenki, Russland)

**42 000–43 000
Jahre alt**
Flöten aus
Schwanen-
knochen und
aus Elfenbein
(Geißenklösterle,
Schwäbische Alb;
Bild links)



35 000–40 000 Jahre alt
geschnittene Figuren
(Frauenstatue, Hohle
Fels, Schwäbische Alb;
Bild rechts)



37 000–41 000 Jahre alt
Höhlenmalerei
(El Castillo, Spanien; Bild oben)



BEIHENGE NACH ZEITREIHE: 1 MIT FRODILGON VON PIERRE JEAN TCHUEN © MORGANTROU - HARVEY MILKINS, UNIVERSITY OF TORONTO; 2 MIT FRODILGON VON TOUJE SUZUKI MIT HIROSHI SUKUNO © CHRISTOPHER HENSHAW © UNIVERSITY OF THE WYOMING; 3, 4, 5, 7 UNIVERSITÄT TÜBINGEN / HILDE JENSEN; 6, PEDRO SAUBA, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



MIT FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG

re. Darauf deuten eine Million Jahre alte Pflanzenasche und verbrannte Knochen bei der südafrikanischen Wonderwerkhöhle hin. Damals lebte der *Homo erectus*, eine noch ältere Menschenspezies.

Sogar schon Vorläufer der Gattung *Homo* könnten es zu Wege gebracht haben, primitive Steinwerkzeuge zu fertigen. Ein von dem Paläoanthropologen Sileshi Semaw von der Indiana University in Bloomington geleitetes Team entdeckte in Äthiopien an zwei Stellen am Fluss Kada Gona Steine, die nach Ansicht der Forscher vor 2,6 Millionen Jahren zu Schabern behauen wurden. Sie hätten sich dazu geeignet, das Fleisch von Tierkadavern zu lösen. Das wären die bisher ältesten gefertigten Steinwerkzeuge überhaupt. Sie könnten von *Australopithecus garhi* oder einem seiner Zeitgenossen stammen. Auf uns wirken sie zwar noch reichlich grob und unbeholfen, aber, um aus einer Veröffentlichung der Kognitionsforscherin Liane Gabora von der kanadischen University of British Columbia und des Psychologen Scott Barry Kaufman von der New York University zu zitieren: »In einer Welt mit nichts als durch die Natur geformten Objekten dazu im Stande zu sein, sich etwas auszudenken und das dann in Realität umzusetzen, muss fast magisch gewirkt haben.«

Die geistige Kluft von den ersten Anfängen bis zu den Leistungen des modernen Menschen erscheint dennoch immens. Unstrittig ist, dass dieser große Schritt mit massiven

Veränderungen des Gehirns einherging. Welche Entwicklungen das im Einzelnen waren, untersuchen Forscher unter anderem durch Vergleiche unseres Gehirns mit dem von Menschenaffen sowie auch von früheren Homininen. Deren Schädel fossilen durchleuchten sie mit modernen Aufnahmetechniken, um die Schädelhöhle dreidimensional abzubilden und auszumessen.

Das neue Gehirn: Mehr als Größenzuwachs

Zunächst beeindruckt die reine Größenzunahme. Der *Homo sapiens* erreichte vor 100 000 Jahren mit durchschnittlich rund 1330 Kubikzentimetern praktisch das heutige Volumen. Dagegen hoben sich Gehirne von Australopithecinen mit schätzungsweise um die 450 Kubikzentimetern noch wenig von Schimpansenhirnen ab. Der *Homo erectus* brachte es vor 1,6 Millionen Jahren mit im Mittel 930 Kubikzentimetern dann schon auf gut das Doppelte. Dean Falk, Paläoneurologin an der Florida State University in Tallahassee, meint dazu: »Setzt man die verschiedenen Hirngrößen in Beziehung zu den archäologischen Befunden, ist der Zusammenhang nicht zu übersehen. Größe und Grad der Technologie wie auch geistige Produktivität scheinen aufeinander bezogen.«

Doch beim Gehirn veränderte sich während der Menschenevolution außer dem Volumen noch anderes. Die An-



In der Sibuduhöhle in Südafrika (Bild links) haben sich 77 000 Jahre alte Überreste von Ruhelagern (Bild oben) erhalten. Die Bewohner bereiteten sie aus Blättern einer bestimmten Pflanze, der Kapquitte (*Cryptocarya woodii*), die lästige und krankheitsübertragende Insekten fernhält.

thropologin Katerina Semendeferi von der University of California in San Diego widmete sich dem so genannten präfrontalen Kortex, jenem Bereich hinter der Stirn, der Denkprozesse und zielgerichtetes Handeln dirigiert. Nach Befunden der Forscherin und ihrer Mitarbeiter haben sich hier – verglichen mit Schimpansen und Bonobos – mehrere entscheidende Teilbereiche stark umorganisiert. Das Brodmann-Areal 10 zum Beispiel, das an der Umsetzung von Plänen und der Abstimmung von Sinneseindrücken mitwirkt, nimmt beim Menschen doppelt so viel Platz ein, wie bei einem rundum gleichmäßigen Größenzuwachs zu erwarten wäre. Dabei sind die seitlichen Abstände zwischen den Neuronen in diesem Hirnrindengebiet fast eineinhalbmal so groß wie bei den beiden Affenarten. Somit bleibt wesentlich mehr Platz für die Kabel, die Signale empfangen und weiterleiten, also für Dendriten und Axone. Laut Falk erlaubt die lockere Anordnung mehr und weiter reichende Verknüpfungen, somit einen vielschichtigeren und komplexeren Austausch der Nervenzellen untereinander.

Aber was macht ein kreatives Gehirn anders? Mit einer Antwort tun sich die Experten noch schwer. Die Kognitionsforscherin Gabora erkennt jedoch in psychologischen Studien über kreative Menschen einen wichtigen Anhaltspunkt. Demzufolge sind diese hervorragende Tagträumer. Müssen sie sich mit einer schwierigen Frage auseinandersetzen, so

lassen sie den Geist erst einmal in viele Richtungen schweifen. Gedanken und Erinnerungen aller Art dürfen frei spielen. Dabei können Ähnlichkeiten und Zusammenhänge aufscheinen, die zunächst nur eine vage Idee hervorrufen. Einen noch verschwommenen neuen Gedanken betrachten diese Menschen nun aber genauer, und sie verwenden jetzt auch stärker analytische Denkmuster. Irgendwann konzentrieren sie sich nur noch auf die wichtigsten Aspekte – und klügeln so schließlich etwas Passendes aus.

Sicherlich, spekuliert die Forscherin, vermag ein größeres Gehirn besser frei zu assoziieren als ein kleineres, schon weil es mehr Zellen und Verbindungen besitzt. Es kann nicht nur allgemein mehr Reize verarbeiten, sondern auch für einzelne Ereignisse mehr Neurone nutzen. Gedächtnisinhalte werden dadurch differenzierter, und Eindrücke sind untereinander auf vielfältige Art verbunden. Um das zu veranschaulichen, entwirft Gabora das Bild, wie verschiedene Hominiden zu nah an einen Dornbusch geraten und sich kräftig stechen. Ein Australopithecine hätte den verspürten scharfen Schmerz wohl als nebensächlich abgetan, sich die Ursache davon aber gemerkt, nämlich als nicht sehr angenehme Eigenschaft solch eines Strauchs, dem er zukünftig lieber aus dem Weg gehen sollte – und nicht viel mehr. Schon ganz anders hätte ein *Homo erectus* reagiert. Er hätte auch den tiefen Riss beachtet und ihn den langen, harten und spitzen Dor-

nen angelastet. Wenn er sich nun wieder einmal beim Jagen vergeblich abhetzte, wäre ihm vielleicht eingefallen, dass solche Dornen heftige Wunden reißen. Die Idee für eine neue Waffe war geboren: ein langes, dünnes Gerät mit harter Spitze – ein Speer.

Im normalen Alltag durfte sich ein großhirniger Homine dem Tagträumen aber möglichst nicht allzu ausgiebig hingeben. Es kann hinderlich sein, wenn alles und jedes, was auf einen einströmt, sogleich an etwas anderes erinnert, ob wichtig oder unwichtig. Um in ihrer Welt zu überleben, benötigten unsere Vorfahren vor allem einen klaren analytischen Verstand. Folglich wurde es nunmehr nötig, leicht zwischen den beiden so verschiedenen Denkweisen zu wechseln. Es galt, Hirnmechanismen für ein reibungsloses, fein abgestimmtes Hin- und Herschalten zu entwickeln, etwa über leicht veränderbare Mengen von Hirnbotenstoffen. Diese Entwicklung könnte nach Gaboras Ansicht beim *Homo sapiens* mehrere zehntausend Jahre beansprucht haben. Erst dann hätte das kreative Potenzial des großen Gehirns in vollem Umfang und wirklich nutzbringend bereitgestanden.

Diese Vorstellung prüfen die Forscherin und ihre Studenten jetzt mit Computersimulationen, mit denen sie das Umschalten eines Gehirns zwischen assoziativem und analytischem Denken imitieren. Dabei interessiert sie besonders, inwiefern es hilfreich sein kann, ein kognitives Gleis zu verlassen und die Dinge neu, aus ungewohnter Warte zu betrachten. »Es genügt nicht, einfach nur mehr Neurone zu besitzen«, sagt Gabora dazu. »Man muss die zusätzlichen grauen Zellen auch zu nutzen wissen.« Erst als diese Phase eintrat, vielleicht vor etwas mehr als 100 000 Jahren, erreichte der menschliche Verstand nach dieser These seine Sprengkraft. Nun kam es nur noch darauf an, ihn in die richtige soziale Umgebung zu versetzen, die ihm Nahrung gab.

Im Herbst 1987 beobachteten die Primatenforscher Christophe Boesch, heute am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, und Hedwig Boesch-Achermann im Tai-Nationalpark des afrikanischen Staats Elfenbeinküste erstmals eine Schimpansin beim Ameisenfischen. Das Weibchen hielt bei einem Bodennest von Treiberameisen an und hob zunächst einen Zweig auf. Ein Ende davon steckte es dann in die lockere Erde über dem Nesteingang und wartete kurz, bis Soldatenameisen, die das Stöckchen im Pulk angriffen, annähernd zehn Zentimeter daran hochgekrabbelt waren. Jetzt zog die Schimpansin die Insekten heraus, beförderte sie geschickt mit einer Drehbewegung zum Mund und knabberte sie ab. Das Ganze wiederholte sie wieder und wieder.



Schon in den 1960er Jahren hatte Jane Goodall die Fachwelt damit verblüfft, dass die Schimpansen des Gombe-Stream-Nationalparks am Tanganjikasee im Westen Tansanias mit Halmen oder Stöckchen Termiten aus ihren Behausungen angeln. Seitdem erweitert sich das bekannte Spektrum des Werkzeuggebrauchs in den verschiedenen Populationen dieser Primaten beständig. Außerdem unterscheidet er sich von Ort zu Ort (siehe SdW 4/2001, S. 30). Schimpansen knacken Nüsse mit Steinen, die sie extra dazu mitnehmen; sie benutzen Blätter, um Wasser aus Baumhöhlen zu schöpfen; oder sie graben mit Stöcken Wurzeln aus und vieles mehr. Jedoch sieht es nicht so aus, als würden sie die Techniken weiterentwickeln und Neues daraus machen. »Ein Schimpanse kann einem anderen zeigen, wie man Termiten erwischt«, bemerkt Henshilwood. »Aber die Tiere verbessern ihre Methode nicht. Sie probieren nicht einfach mal verschiedene Sorten von Instrumenten zum Stochern aus. Sie tun nur immer wieder das Gleiche.«

Das gilt für den modernen Menschen ganz und gar nicht. Tagtäglich greifen wir fremde Ideen auf und passen sie den eigenen Bedürfnissen an. Eine Abwandlung kommt so zur anderen, bis am Ende etwas völlig Neues und oft ziemlich Komplexes entsteht. Die heutigen elektronischen Geräte beispielsweise erfand kein Einzelner. Viele Köpfe, viele Erfindergenerationen haben dazu beigetragen.

Anthropologen sprechen hier vom Sperrklinkeneffekt (englisch: ratchet effect). Sie meinen damit einen stufenweisen kulturellen Fortschritt, sozusagen den Sprung über die jeweils nächste Hürde. Demnach werden einzelne Fähigkeiten von einem zum anderen und über die Generationen weitervermittelt. Dabei treffen irgendwann mehrere verschiedene Entwicklungen zusammen – bis jemand eine zündende Idee hat, wie sich aus den verschiedenen Strängen etwas wirklich Neues machen lässt.

Dass – und auch weshalb – menschliche Kinder hierin gut sind und Affen versagen, zeigten Primatologen in einer im März 2012 erschienenen Studie, darunter Lewis Dean, der inzwischen bei der Londoner Physiological Society arbeitet. Die Wissenschaftler konfrontierten Kindergartenkinder sowie Schimpansen und Kapuzineraffen mit einer Kiste, die sich in drei jeweils zunehmenden Schwierigkeitsgraden immer weiter öffnen ließ. Die Kiste enthielt für jede bewältigte Stufe



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Steinzeitkunst« finden Sie unter
www.spektrum.de/steinzeitkunst

eine Belohnung, und der Lohn wurde mit der jeweils höheren Schwierigkeit besser. Von den insgesamt 55 Affen erreichte nur ein Schimpanse den schwersten Grad. Er brauchte dafür über 30 Stunden. Den Kindern fiel die Aufgabe dagegen fast leicht. Von den 35 Teilnehmern hatten es 15 nach zweieinhalb Stunden geschafft. Sicherlich half ihnen dabei, dass sie – völlig anders als die Affen – gemeinsam vorgingen. Sie redeten miteinander, ermutigten sich gegenseitig und zeigten und erklärten einander auch, was sie schon begriffen hatten.

Die Macht ausgedehnter sozialer Kontakte

Es leuchtet ein, dass sich unsere Vorfahren bei derartigen sozialen Kompetenzen und geistigen Fähigkeiten nicht schwer damit taten, Wissen und Fertigkeiten weiterzugeben. Dieser Aspekt ist für eine kulturelle Höherentwicklung zwar eine wesentliche Voraussetzung. Allerdings kann das allein nicht den gewaltigen Kultursprung erklären, der beim *Homo sapiens* vor 90 000 bis 60 000 Jahren in Afrika und vor 40 000 Jahren in Europa auffällt. Er erforderte wohl einen zusätzlichen Anschlag. Nach Untersuchungen des Evolutionsgenetikers Mark Thomas vom Londoner University College und seinen Kollegen sorgte für diesen ein Bevölkerungszuwachs, der größere Gruppen und mehr Begegnungen zwischen ihnen mit sich brachte. Wie die Forscher in Modellen zeigen, geschieht es in einer großen Gruppe von Jägern und Sammlern eher als in einer kleinen, dass jemandem etwas Geniales einfällt und dass eine Neuerung überdauert. Vor allem aber stacheln sich konkurrierende, vielleicht auch befreundete Gruppen, die einander begegnen, gegenseitig zu Verbesserungen an, lernen voneinander und greifen Neuerfindungen begierig auf. Der enge Kontakt zu Nachbarn und der Austausch wären also entscheidend. Laut Thomas war überragende Schlaueit gar nicht so maßgeblich. Wichtiger für die rasante Kulturevolution wäre eine gute soziale Vernetzung gewesen (siehe SdW 12/2009, S. 66).

Thomas und seine Kollegen simulierten dies zunächst für Europa. Aus genetischen Daten der heutigen Bevölkerung erschlossen sie die Menschenzahl und Bevölkerungsdichte für *Homo sapiens* am Beginn des Jungpaläolithikums, also zu jener Zeit, als die moderne Kultur in Europa aufblühte. Ähnliche Berechnungen machten sie dann für afrikanische Populationen, wobei sie deren Wachstum und Bevölkerungsveränderungen einbezogen. Heraus kam, dass die Menschheit in Afrika vor gut 100 000 Jahren die gleiche Dichte erreichte, wie sie später im frühen Jungpaläolithikum in Europa herrschte. Die Simulationen zeigten auch, wie stark umfangreiche soziale Netze die Kreativität antreiben.

Eine im November 2012 veröffentlichte archäologische Studie untermauert dies. Vor rund 71 000 Jahren hinterließ der *Homo sapiens* am Pinnacle Point an der afrikanischen Südküste scharfe, nur ein paar Zentimeter lange Steinspitzen, so genannte Mikrolithen – vermutlich von Pfeilen. Dafür erhitzte man Silcretbrocken vor der weiteren Bearbeitung auf eine bestimmte Temperatur, wodurch sich leichter Splitter davon abschlagen ließen. Die fertig bearbeiteten

Schneiden wurden dann mit selbst gemachtem Klebstoff an Holz- oder Knochenschäften befestigt. Bestimmte Steine durch Hitze besser verarbeitbar zu machen, war in der Region schon seit mehreren zehntausend Jahren üblich. Andere Fertigkeiten kamen hinzu, und nun kombinierte man verschiedene Technologien zu einem neuen, ausgefeilten Gerät. Die Erfindung von Pinnacle Point wurde in Südafrika nachweislich länger als 10 000 Jahre tradiert. Schon 2011 schrieben die Archäologen Fiona Coward von der University of London und Matt Grove von der University of Liverpool: »So wie Viren nur unter bestimmten Bedingungen gedeihen, erfordert die Verbreitung kultureller Innovationen ein passendes, und zwar ein besonderes soziales Umfeld. Vor allem braucht es dazu große, vernetzte Populationen, die sich gegenseitig »anstecken« können.«

Das bringt uns in die heutige Welt zurück. Nie lebten gleichzeitig so viele Menschen. Wir drängen uns in Riesenstädten und haben eine Unmenge Wissen und Erfindungen angehäuft, die täglich anwachsen. Die elektronischen sozialen Netze befördern einen rascheren Informationsaustausch als je zuvor. Das Innovationstempo beschleunigt sich zunehmend. Moden, Alltagsgegenstände, Architektur wechseln schneller denn je. Selbst die »Mona Lisa« verwandeln heutige Künstler nach eigenen, frischen Ideen. ~

DIE AUTORIN



Heather Pringle ist Wissenschaftsautorin. Die Kanadierin arbeitet als Redakteurin für das US-amerikanische Magazin »Archaeology«.

QUELLEN

- Brown, K.S. et al.:** An Early and Enduring Advanced Technology Originating 71,000 Years Ago in South Africa. In: *Nature* 491, S. 590–593, 2012
- Falk, D.:** Hominin Paleoneurology: Where Are We now? In: *Progress in Brain Research* 195, S. 255–272, 2012
- Gabora, L., Kaufman, S.B.:** Evolutionary Approaches to Creativity. In: Kaufman, J.C., Sternberg, R.J. (Hg.): *The Cambridge Handbook of Creativity*. Cambridge University Press, Cambridge 2010, S. 279–300
- Wadley, L. et al.:** Middle Stone Age Bedding Construction and Settlement Patterns at Sibudu, South Africa. In: *Science* 334, S. 1388–1391, 2011

LITERATURTIPP

Der frühe Mensch und seine Kultur. Spektrum Spezial Archäologie-Geschichte-Kultur 2/2013, erscheint am 28.6.2013
Enthält diesen und weitere Artikel von »Spektrum der Wissenschaft« zur frühen menschlichen Evolution und Kunst

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192440

Marionetten der Industrie

Viele Medizinforscher in den USA bekommen Geld von Pharmafirmen, deren Produkte sie untersuchen. Die staatliche Gesundheitsbehörde lässt sie gewähren – denn auch ihre Mitarbeiter erfreuen sich an den Zuwendungen der Industrie.

Von Charles Seife

Als Robert Lindsay in den frühen 1970er Jahren beschloss, Medizinforscher zu werden, ging es ihm nicht um Geld. Er interessierte sich für die Wirkung von Hormonen aufs Knochengewebe – damals eher ein Nischenthema. Er hoffte, damit wissenschaftliche Reputation zu erwerben und zudem tausenden Patienten mit der Krankheit Osteoporose zu helfen. Bei diesem Leiden verschleißten die Knochen schneller, als sie regenerieren, was das Skelett zunehmend schwächt.

Wie Osteoporose entsteht, war in den 1970ern weitgehend unbekannt, aber es gab Grund zur Annahme, dass Hormone dabei eine Rolle spielen. So tritt die Krankheit bei einigen Frauen kurz nach den Wechseljahren auf, wenn ihr Hormonspiegel drastisch sinkt. Falls diese Veränderung in der Körperchemie das Gleichgewicht zwischen Knochenauf- und -abbau stört, folgerte Lindsay, ließe sich die Krankheit vielleicht mit Hormonpillen behandeln. In einer kleinen Klinik im schottischen Glasgow startete er eine innovative Studie. Als einer der Ersten testete er dort, ob sich Knochenschwund bei Frauen per Östrogensatztherapie behandeln lässt. Damit nahm seine Karriere ihren Lauf.

Sein nächstes Projekt war bereits von beträchtlicher kommerzieller Tragweite. 1984 – er arbeitete inzwischen am Helen Hayes Hospital, einer Rehaklinik nördlich von New York – veröffentlichte er Forschungsergebnisse über das östrogenhaltige Medikament Premarin. Sie legten nahe, dass Millio-

nen Osteoporosepatientinnen von dem Mittel profitieren würden. Pharmaunternehmen horchten auf. Insbesondere der Hersteller des Präparats, die Wyeth-Ayerst Laboratories, wurde auf Lindsay aufmerksam. Das Unternehmen warb ihn als Autor des Videofilms »Osteoporosis: A Preventable Tragedy« (Osteoporose, eine vermeidbare Tragödie) an.

Vorkämpfer der Industrie

Mitte der 1990er Jahre, als Wyeth in einen Patentstreit über Premarin geriet, stand Lindsay fest an der Seite des Unternehmens. Er sprach sich gegen die Zulassung eines Nachahmermittels mit dem gleichen Wirkstoff aus (eines so genannten Generikums). Es hätte Patientinnen den Zugang zur Therapie erleichtert, aber den Umsatz von Premarin geschmälert. Lindsay argumentierte, dass wirkstoffgleiche Kopien möglicherweise schlechter seien als das Markenmedikament. Damit lag er auf der Linie des Unternehmens, wobei dieser Einwand mitunter tatsächlich zutreffen kann. In den folgenden Jahren führte er seine engen Beziehungen zu Wyeth und anderen Pharmafirmen fort, manchmal im Verborgenen. Lindsay verdiente enorm daran; allein vom Hersteller Eli Lilly, dessen Produkte er in Studien untersuchte, erhielt er mehr als 100 000 Dollar. Und die Unternehmen profitierten ihrerseits von seinen Forschungen.

Der eigentliche Skandal daran ist nicht so sehr, wie Lindsay sich verhalten hat, sondern dass sein Fall typisch ist. In den zurückliegenden Jahren hat die Pharmaindustrie neue Wege gefunden, um unabhängigen Wissenschaftlern, deren Forschung die Produkte der Unternehmen betrifft, große Geldsummen zukommen zu lassen. Häufig sind die Beträge so hoch, dass der Begünstigte damit einem seiner Kinder das Studium finanzieren kann, was speziell in den USA oft äußerst kostspielig ist. Nicht nur Medikamentenhersteller und Forscher beteiligen sich an diesem dubiosen Tauschhandel, sondern auch Fachzeitschriften, Berufsverbände und Institutionen, die Fördermittel verwalten.

Das Prinzip »Eine Hand wäscht die andere« äußert sich in vielen Formen. Medikamentenhersteller bezahlen den Forschern etwa Reisen zu Veranstaltungen, oft erster Klasse. Dort präsentieren die Wissenschaftler unter anderem Vorträge und Abbildungen, die vom Geldgeber erstellt wurden.

AUF EINEN BLICK

EINE HAND WÄSCHT DIE ANDERE

1 In den USA pflegen viele Wissenschaftler **enge finanzielle Beziehungen** zu Medikamentenherstellern, die von den Ergebnissen ihrer Forschungen profitieren.

2 Der US-Kongress hat den **Physician Payments Sunshine Act** verabschiedet. Das Gesetz verpflichtet Pharmaunternehmen und Medizingerätehersteller dazu, Zahlungen an Ärzte offenzulegen.

3 Jedoch unternimmt die staatliche Gesundheitsbehörde – die Fördergelder in Milliardenhöhe verteilt – kaum etwas, um **Interessenkonflikten** der Empfänger nachzugehen. Auch wissenschaftliche Einrichtungen lassen hier wenig Eifer erkennen, ebenso wie die Forscher selbst.



CONI MONTRES

Ab wann sind Medizinforscher fremdgesteuert? Wer Pharmagelder in sechsstelliger Höhe kassiert, überlegt wohl zweimal, bevor er die Unternehmen oder ihre Produkte kritisiert.

Zudem findet sich eine spezielle Art von Ghostwriting: Pharmaunternehmen lassen Artikel schreiben und bezahlen Wissenschaftlern ein Honorar, damit diese als »Gastautoren« den eigenen Namen daruntersetzen und den Artikel bei einer Fachzeitschrift einreichen. Eine verbreitete Praxis der Firmen ist auch, renommierte Forscher als Berater anzustellen. »Diese glauben dann oft, das Unternehmen sei an ihrem Wissen interessiert – tatsächlich aber möchte es sich mit ihrem Namen schmücken«, erklärt Marcia Angell, frühere Chefredakteurin des »New England Journal of Medicine«.

Die Spur des Geldes

Das wirft gewaltige Probleme auf. Ob ein Medikament zugelassen werden sollte oder nicht, lässt sich nur mittels unabhängiger Forschung vernünftig entscheiden. Wenn Arzneimittel anders wirken als in der Werbung versprochen, wenn sie wieder vom Markt genommen oder sogar als gefährlich eingestuft werden, dann sind oft Daten selektiv veröffentlicht worden, und es hat Zahlungen an Wissenschaftler gegeben. Vor einigen Jahren verklagten Patienten den Medikamentenhersteller Wyeth wegen der mutmaßlichen Nebenwirkungen seines Hormonmittels Prempro – unter anderem ein erhöhtes Krebsrisiko. Die Untersuchungen drehten sich schon bald darum, wie die Firma es mit Ghostwritern und Gastautoren hielt. Als das Pharmaunternehmen Merck im September 2004 entschied, sein Schmerzmittel Vioxx vom Markt zu nehmen – es war mit einem erhöhten Risiko für Herz-Kreislauf-Probleme in Verbindung gebracht worden –, kam ebenfalls das Thema Geld auf. Forscher hatten sich anscheinend für eine Vioxx-Studie anwerben lassen, die von Merck mitfinanziert wurde, und zwar nachdem das Unternehmen bereits die Datenauswertung abgeschlossen hatte.

Tief blicken ließ auch eine Studie, die 2010 im »British Medical Journal« erschien (siehe Kasten rechts). Ihr zufolge waren 87 Prozent der Forscher, die dem Diabetesmedikament Rosiglitazon ein positives Urteil ausstellten – obwohl es schon lange unter Verdacht steht, das Herzinfarktrisiko zu steigern –, finanziell mit Herstellern dieses Mittels verbandelt. Die US-Arzneimittelbehörde FDA setzte einen Ausschuss ein, der darüber debattierte, ob Rosiglitazon vom Markt genommen werden sollte. Später stellte sich heraus, dass auch Mitglieder dieses Gremiums Pharmagelder erhalten hatten.

Die wissenschaftliche Gemeinschaft versucht, solchen Interessenkonflikten mit Transparenz zu begegnen. Zeitschriften, Förderinstitutionen und Berufsverbände verlangen von Forschern, finanzielle Beziehungen offenzulegen, die deren Objektivität beeinflussen könnten. Dies dient als Ermessensgrundlage dafür, ob eine Studie ethisch einwandfrei ist und wie vertrauenswürdig ihre Ergebnisse erscheinen. Das System setzt auf das Ehrgefühl der Forscher. Häufig verschweigen die Betroffenen jedoch ihre Interessenkonflikte – unter anderem, weil sie sich der Problematik gar nicht bewusst sind. Auch lässt sich oft nur schwer sagen, ab wann ein Forscher gegen die Regeln verstößt. Denn was er angeben soll, hängt unter anderem vom Thema und der Fachzeitschrift ab.

Theoretisch gibt es weitere Sicherungen. So sollen nicht nur die Forscher Interessenkonflikte offenlegen, sondern auch ihre Arbeitgeber. Geschieht das nicht, ist in den USA die Gesundheitsbehörde National Institutes of Health (NIH) gefordert, die den Großteil der Forschungen finanziert. Leider funktioniert all das nur unbefriedigend. »Institutionen schauen häufig weg, oder ihre Richtlinien sind unzureichend«, erklärt Adriane Fugh-Berman, Professorin am Fachbereich für Pharmakologie und Physiologie der Georgetown University (Washington). Obendrein scheitern die NIH daran, schärfere Ethikgesetze gegen den finanziellen Einfluss der Pharmaindustrie durchzusetzen. Nicht nur das: Die Behörde verstößt anscheinend sogar selbst gegen die Gesetze.

Der US-Kongress hat versucht, die Korruption in der klinischen Forschung einzudämmen. 2010 verabschiedete er den Physician Payments Sunshine Act. Laut diesem Gesetz sind alle Pharmaunternehmen und Medizingerätehersteller in den USA jetzt dazu verpflichtet, Gelder anzugeben, die sie Ärzten zukommen lassen. Da die meisten Medizinforscher als Ärzte arbeiten, könnten diese Angaben dabei helfen, Interessenkonflikte bei Fördergeldbeziehern zu erkennen. Wenn die Informationen jedoch nicht verwertet werden – und danach sieht es in vielen Fällen aus –, sind sie nutzlos.

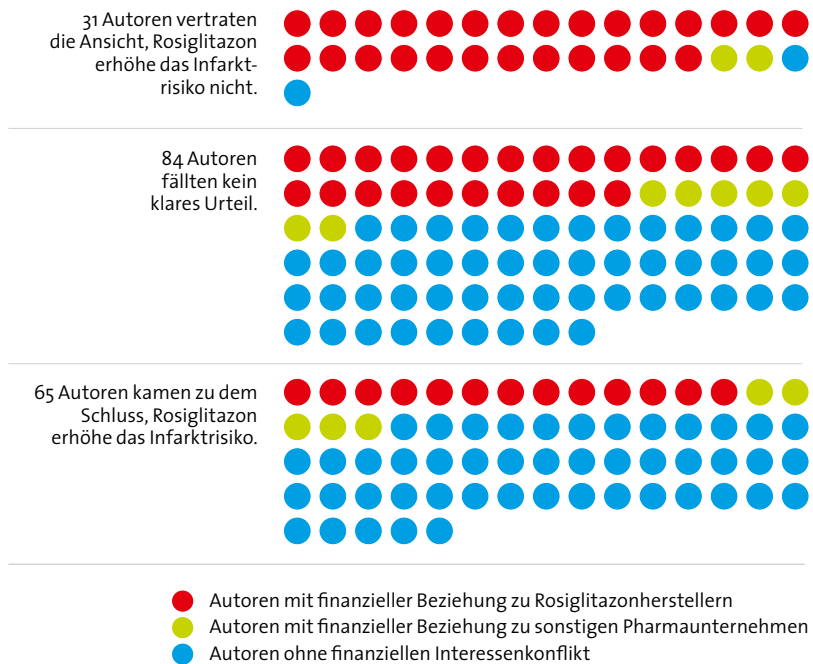
Die NIH verteilen jährlich Milliarden US-Dollar an Medizinforscher. Den geltenden Bestimmungen zufolge haben die Empfänger etwaige Interessenkonflikte offenzulegen und zu erklären, wie sie damit umgehen. Wer dies missachtet, verstößt gegen das Gesetz. Damit scheint alles klar, aber in der Praxis ist es das keineswegs. Häufig spürt die Behörde den finanziellen Beziehungen von Wissenschaftlern nur unzureichend nach und wälzt die Verantwortung dafür auf andere Institutionen ab. Als ich mit NIH-Vertretern darüber reden wollte, stieß ich auf kollektives Abwiegeln.

Besonders deutlich zeigte sich das am Fall Robert Lindsay. Dieser hatte, trotz seiner finanziellen Beziehungen zur Pharmaindustrie, in den Jahren 2005 bis 2011 mehrere Millionen Dollar an Fördermitteln von den NIH erhalten. Danach befragt, weigerte sich eine Sachbearbeiterin der NIH, Kopien bestimmter Schriftstücke vorzulegen. In diesen gesetzlich vorgeschriebenen Unterlagen muss Lindsays Arbeitgeber versichern, etwaigen Interessenkonflikten seiner Mitarbeiter ordnungsgemäß nachzugehen. Die Sachbearbeiterin erklärte mir lediglich, dass alles seine Richtigkeit habe. Einschlägige Dokumente, die ich unter Verweis auf das Informationsfreiheitsgesetz Freedom of Information Act anforderte, enthielten keinen Hinweis auf finanzielle Verstrickungen. Nichts in ihnen deutete darauf hin, dass Lindsay von den Pharmafirmen, über deren Produkte er forschte, Geld erhielt. Die von mir befragten NIH-Mitarbeiter wollten sich nicht dazu äußern, ob sie diese Sache überprüft hätten.

Vor einigen Jahren wurden dem US-Ministerium für Gesundheitspflege und Soziale Dienste (Department of Health and Human Services) interne NIH-Dokumente zugespielt. Ihnen zufolge behindern ranghohe Mitarbeiter der Behörde Untersuchungen, die sich um mögliche Interessenkonflikte

Wes Brot ich ess, des Lied ich sing

Inwieweit werden Wissenschaftler in ihrem fachlichen Urteil von finanziellen Beziehungen beeinflusst? Um dies herauszufinden, befassten sich Forscher der Mayo-Clinic in Rochester, US-Bundesstaat Minnesota, mit dem Diabetesmittel Rosiglitazon. Dessen Einnahme führt laut einer Metaanalyse zu einem erhöhten Herzinfarktrisiko. Die Forscher untersuchten Fachartikel, in denen diese Metaanalyse zitiert wurde. Dabei stellten sie fest, dass Autoren, die einem Interessenkonflikt unterlagen, das Medikament überdurchschnittlich oft positiv beurteilten. »Welchen Standpunkt die Autoren in der Rosiglitazon-Debatte einnahmen, hing deutlich davon ab, welche finanziellen Beziehungen sie zu Pharmaunternehmen unterhielten«, steht in der Studie von 2010.



GRAPH: JEN CHRISTIANSEN, NACH WANG ET AL., ASSOCIATION BETWEEN INDUSTRY AFFILIATION AND POSITION ON CARDIOVASCULAR RISK WITH ROSIGLITAZONE, CROSS-SECTIONAL SYSTEMATIC REVIEW, IN: BMJ 340, S. C3144, 2010

von geförderten Wissenschaftlern drehen. In einer Notiz heißt es etwa: »Wir sollten den Einzelheiten über die Art des Konflikts, oder wie er gehandhabt wurde, nicht weiter nachgehen, außer wenn ein hinreichendes programmatisches Interesse daran vorliegt.«

Verbreitete Unsitte

Lindsay's Fall scheint keine Ausnahme zu sein. Landesweit forschen Wissenschaftler in staatlich geförderten Projekten und erhalten zugleich Geld von Pharmaunternehmen. Meine Studenten und ich wollten uns einen Eindruck davon verschaffen, um welche Summen es hier geht. Dazu griffen wir auf eine Datenbank zurück, die sämtliche bewilligten NIH-Förderungen der Jahre 2009 und 2010 dokumentiert. Weiterhin nutzten wir eine Datenbank der investigativen Journalistengruppe ProPublica, die Zahlungen von Medikamentenherstellern auflistet und Rückschlüsse darauf erlaubt, wer auf den Gehaltslisten der Firmen steht. Wir stellten fest, dass eine Hand voll Pharmaunternehmen allein im Bundesstaat New York 1,8 Millionen Dollar an Personen gezahlt hatten, die auch Fördergelder von den NIH bezogen – Honorare für Vorträge, Beraterdienste und andere Leistungen. Und das sind nur die Beträge, die wir identifizieren konnten; in Wirklichkeit ist wohl noch viel mehr Geld geflossen.

Nicht nur Fördermittelempfänger erfreuen sich am Geldregen der Pharmaindustrie, sondern auch Mitarbeiter der NIH, die über die Förderung von Wissenschaftlern entscheiden. Dies können wir mit Hilfe der ProPublica-Datenbank belegen. Alles in allem fanden wir zirka 70 Mitglieder von NIH-Beratungsausschüssen, die zusammen mehr als eine Million

Dollar von Medikamentenherstellern kassiert hatten, etwa für Auftritte als Redner und für Beraterdienste. Der Verdacht liegt nahe, dass zumindest einige dieser Zahlungen gegen staatliche Ethikregeln verstoßen haben. Denn Personen in den genannten Ausschüssen dürfen sich nicht an Entscheidungen beteiligen, die eine Organisation betreffen, von der sie erhebliche Bezüge erhalten.

Das Problem reicht somit viel tiefer als nur bis zu den Medizinforschern: Die Gelder der Pharmaindustrie sind bereits in die US-Gesundheitsbehörde selbst eingesickert. Falls die Behörde das wusste und nichts dagegen unternahm, hätte sie gegen die Gesetze verstoßen. Um dies zu klären, forderte ich im Rahmen des Freedom of Information Act weitere Unterlagen an. Aus ihnen wollte ich entnehmen, ob die NIH darüber informiert waren, dass ihre Mitarbeiter Geld von Medikamentenherstellern bekamen – und falls ja, ob sie den entsprechenden Personen weiterhin gestatteten, in den Ausschüssen zu arbeiten. Die Behörde hielt die Dokumente jedoch unter Verschluss. Daraufhin ging ich vor Gericht. Nach neunmonatigem Rechtsstreit entschied ein Bundesrichter, dass ich Einblick in die Unterlagen bekommen müsse.

Aus den Schriftstücken geht unter anderem hervor: Mehrere NIH-Institute sind in den zurückliegenden fünf Jahren keinem einzigen Interessenkonflikt ihrer Mitarbeiter nachgegangen. Noch brisanter sind Dokumente, die sich auf bestimmte Ausnahmeregelungen beziehen. Unter speziellen Umständen können die NIH nämlich einen Regierungsangestellten, etwa das Mitglied eines Beratungsausschusses, von Ethikregeln freistellen. Auf Grund meiner Recherchen wusste ich, dass etlichen Personen in NIH-Gremien dies gewährt

worden war; jeder von ihnen hatte mehrere tausend Dollar von Medikamentenherstellern angenommen. Ich verlangte Informationen darüber, denn ich wollte wissen, warum diese Leute weiterhin in den Ausschüssen sitzen durften. Vor allem wollte ich herausfinden, ob bei ihnen ein Interessenkonflikt bestand und wie er konkret aussah.

Die meisten Zahlungen seitens der Pharmafirmen wurden in den Sonderfreistellungen nicht erwähnt. Ein Beispiel hierfür ist Louis Ptáček, der dem nationalen Beirat für neurologische Störungen und Schlaganfallkrankungen (National Advisory Neurological Disorders and Stroke Council) angehörte. Er erhielt die Erlaubnis, an den Sitzungen des Gremiums teilzunehmen, obwohl er zahlreiche Aktien von Pharmaunternehmen besaß. Die Unterlagen gehen mit keinem Wort darauf ein, dass er als Berater für das Pharmaunternehmen Pfizer mehr 50 000 Dollar kassiert hatte. Auf eine diesbezügliche Anfrage reagierte Ptáček nicht.

Eine Sonderfreistellung für Arul Chinnaiyan vom wissenschaftlichen Beirat des Nationalen Krebsinstituts (National Cancer Institute's Board of Scientific Advisors) enthält keine Informationen darüber, dass er in den Jahren 2009 und 2010 insgesamt 30 000 Dollar vom Medikamentenhersteller GlaxoSmithKline entgegennahm. Chinnaiyan beteuerte, er habe dies den NIH gegenüber offengelegt. Wieso wurde es dann nicht dokumentiert?

Verloren im Unterlagenschungel

Auf meine Nachfrage hin wollten sich die NIH nicht zu Einzelfällen äußern. Eine Mitarbeiterin willigte ein, etwas über die allgemeinen Richtlinien zu sagen, aber nur, wenn ihr Name unerwähnt bleibe. Sie erklärte, dass Vortrags- und Beraterhonorare generell nicht in Sonderfreistellungen aufgeführt werden, sondern in einem separaten Dokument für spezielle Angelegenheiten, in denen sich die Ausschussmitglieder selbst als befangen erklären müssen. Eine andere Mitarbeiterin räumte ein, die Behörde habe es versäumt, mir diese Befangenheitserklärungen vorzulegen.

Das undurchsichtige Vorgehen der NIH und die Geheimniskrämerei der Beteiligten machen eine klare Einschätzung der Vorgänge unmöglich. Zumindest überwacht die Behörde mögliche Interessenkonflikte ihres Personals sehr nachlässig. Wenn Beratungsleistungen etwa auf Befangenheitsdokumente gehören, wie mir gesagt wurde, wieso tauchen sie dann bei manchen NIH-Mitarbeitern eben doch in den Sonderfreistellungen auf? So wie bei Lawrence Stanberry vom wissenschaftlichen Beirat des Nationalen Instituts für Allergien und Infektionskrankheiten (National Institute of Allergy and Infectious Diseases Board of Scientific Counselors), der Geld von GlaxoSmithKline und Starpharma erhielt?

Eine Sonderfreistellung ist keine Kleinigkeit. Sie verleiht Immunität gegenüber gesetzlichen Vorschriften und sollte nur in Einzelfällen und nach sorgfältigem Abwägen gewährt werden. NIH-Mitarbeiter sind dazu verpflichtet, sich mit der staatlichen Ethikbehörde OGE (Office of Government Ethics) abzusprechen, bevor sie eine solche Ausnahme verfügen.



Seit 2005 haben die NIH ihren Ausschussmitgliedern dutzende Sonderfreistellungen gewährt, aber nur dreimal vorschriftsgemäß bei der OGE angefragt. Obendrein hatte keiner dieser drei Fälle mit Ausschussmitgliedern zu tun. Ich wollte wissen, woher dieses Missverhältnis rührt. Die Gesundheitsbehörde antwortete, sie halte alle staatlichen Auflagen ein. Beweise dafür, dass sie sich gesetzeskonform mit der Ethikbehörde abstimmt, konnte mir niemand präsentieren.

Die NIH haben bisher auch noch nicht die Verantwortung dafür übernommen, finanzielle Verstrickungen bei den von ihr geförderten Forschern zu untersuchen. 2007 beschwerten sich Vertreter des US-Ministeriums für Gesundheitspflege und soziale Dienste darüber, dass die NIH beklagenswert schlecht mit solchen Konflikten umgingen. Darauf erwiderte der damalige NIH-Direktor, es sei nicht Aufgabe der Behörde, zu kontrollieren, ob Wissenschaftler die Ethikgesetze einhielten. »Die Verantwortung dafür, Interessenkonflikte zu erkennen, muss bei der Institution des Fördermittelempfängers liegen«, schrieb er. NIH-Vertretern zufolge verfährt die Behörde noch heute nach diesem Grundsatz.

Doch die Einrichtungen, in denen geförderte Wissenschaftler arbeiten, sind ebenfalls bekannt für ihr eher zurückhaltendes Engagement in ethischen Fragen. Einem Ministeriumsbericht von 2009 zufolge überlassen Organisationen, die Geld von den NIH erhalten, es in 90 Prozent der Fälle dem einzelnen Forscher, auf mögliche Interessenkonflikte hinzuweisen. Selbst Arbeitgeber, die lautstark für Transparenz plädieren, setzen ihre harten Richtlinien intern nur selten durch. 2010 prüfte die Journalistengruppe ProPublica, inwieweit die Stanford University und andere Hochschulen ihren eigenen strikten Ethikregeln gerecht werden. Die Journalisten stießen auf dutzende Fakultätsangehörige, die Pharmagelder kassierten und damit gegen die Vorgaben ihrer Einrichtungen verstießen.

Auch das Helen Hayes Hospital in New York, wo Robert Lindsay arbeitet, scheint die eigenen Ethikrichtlinien nicht besonders ernst zu nehmen. Ich fragte dort an, warum Lindsay Fördermittel von den NIH bezieht, um das Medikament Forteo zu untersuchen – während er zugleich Geld vom Herstellerunternehmen Eli Lilly bekommt. Darauf erhielt ich nur ausweichende Antworten. Mehrere Personen verweigerten das Gespräch, darunter Felicia Cosman, Direktorin für

klinische Forschung an dieser Einrichtung. Nach Angaben von ProPublica lässt auch sie sich ihre Forteo-Studien von den NIH finanzieren, obwohl Eli Lilly ihr mehr als 135 000 Dollar für Vorträge und Beratungsleistungen gezahlt hat.

Wenige Tage nach meinem Anruf bemühte man sich am Helen Hayes Hospital um eine ethische Untersuchung der fraglichen Arbeiten. Die Klinikleitung suchte nach einem unabhängigen Gremium, das prüfen sollte, ob Lindsays Beziehungen zur Pharmaindustrie seine Arbeit beeinflusst hatten. Da sich ein solches Gremium nicht fand, wurde der Prüfungsausschuss der Klinik gebeten, sich der Sache anzunehmen. Lindsay gehört dem Ausschuss an, blieb den Beratungen aber fern. Das Komitee befand, dass Lindsay erhebliche Zahlungen von Eli Lilly erhalten hatte, dies aber keinen Interessenkonflikt darstellte. Ich erfuhr erst Monate später davon, nachdem ich unter Berufung auf das Informationsfreigabegesetz einschlägige Dokumente angefordert hatte.

Wo ist das Problem? Laut Vorschrift gibt es keins!

Das Helen Hayes Hospital hält sich an die NIH-Richtlinien. Demnach muss ein Forscher, der Fördermittel erhält, »alle geldwerten Vorteile in Form von Zahlungen oder Sachleistungen (etwa Beraterhonorare, sonstige Honorare, Reisekosten, Mahlzeiten oder Unterhaltungsangebote), die ein Forschungssponsor gewährt«, melden. Man beachte den letzten Teil der Formulierung. Er schränkt die Bandbreite meldepflichtiger Bezüge entscheidend ein. Da nicht Eli Lilly die Arbeiten von Robert Lindsay sponsert, sondern die NIH, führen die Zahlungen des Pharmaunternehmens laut diesen Richtlinien nicht zu einem Interessenkonflikt. Angesichts jener Regelungen lassen sich überhaupt nur schwerlich Umstände vorstellen, die einen Fördermittelempfänger in einen solchen Zwiespalt bringen könnten.

Forscher können den Einfluss der Pharmagelder nicht aufhalten. Kliniken und Universitäten werden es nicht tun. Die NIH weigern sich, es zu tun. Als Folge davon landen Steuergelder in Millionenhöhe in Forschungsprojekten, deren Objektivität untergraben wird. Der US-Kongress, dem die finanzielle Kontrolle obliegt, ist zutiefst verärgert.

2008 organisierte Senator Charles Grassley aus Iowa eine Reihe von Kongressanfragen. Es ging um Empfänger von NIH-Fördermitteln, die nicht angegeben hatten, dass sie Geld von der Pharmaindustrie bekommen – und deren Universitäten sie dafür nicht zur Verantwortung gezogen hatten. Der bekannteste Fall war Charles Nemeroff, bis vor Kurzem Leiter des Fachbereichs Psychiatrie an der Emory University (Atlanta, USA). Universitätsdokumente belegen, dass Nemeroffs Kontakte zur Pharmaindustrie bereits im Jahr 2000 kritisch hinterfragt wurden. Er erhielt unter anderem Geld vom Medikamentenhersteller SmithKline Beecham, der später in GlaxoSmithKline aufging. 2004 stellte die Emory University fest, dass Nemeroff »zahlreiche Verstöße gegen die Richtlinien zu Interessenkonflikten und Beratertätigkeiten« vorzuwerfen seien. Er willigte daraufhin ein, seine Zusammen-

arbeit mit der Pharmaindustrie einzuschränken. Als 2008 weitere Interessenkonflikte zu Tage traten, legte er die Leitung des Fachbereichs nieder, und die Universität untersagte ihm für zwei Jahre, NIH-Fördergelder zu beantragen. Nemeroff wechselte an die University of Miami, wo er nun als Fachbereichsleiter einem Projekt vorsteht, das mit 400 000 Dollar von den NIH unterstützt wird.

Nach diesen Kongressanfragen erließen die NIH neue Richtlinien, denen zufolge Fördergeldempfänger ihren Arbeitgebern alle finanziellen Beziehungen ab einem Geldwert von 5000 Dollar offenlegen müssen. Zudem sind die Einrichtungen jetzt verpflichtet, jegliche Interessenkonflikte von Personen zu veröffentlichen, die in NIH-finanzierten Forschungsprojekten mitarbeiten. Dies sorgt zwar für mehr Transparenz, ändert aber nichts daran, wer für das Aufdecken solcher Konflikte zuständig ist und wie in ethischen Streitfällen verfahren wird.

Die einzige Hoffnung, das Problem zu lösen, ruht auf den Forschern selbst. Wissenschaftler können Druck auf ihre Kollegen ausüben, kein Geld von Pharmafirmen anzunehmen: etwa über die Gutachter von Fachzeitschriften, deren Ruf durch verzerrte Publikationen leidet, oder über Fachverbände, die ethische Standards für Wissenschaftler setzen. Zumindest können sie ihre Kollegen davon überzeugen, dass es langfristig in ihrem eigenen Interesse ist, keinerlei Zahlungen von Pharmaunternehmen zu verschweigen.

Im Fall Robert Lindsays hätten der Fachverband National Osteoporosis Foundation und die Fachzeitschrift »Osteoporosis International« eingreifen können. Wären sie willens und fähig gewesen, den mutmaßlichen finanziellen Verstrickungen des Forschers nachzugehen? Eine Person, die man danach fragen könnte, wäre der frühere Präsident der National Osteoporosis Foundation und jetzige Chefredakteur von »Osteoporosis International«: Robert Lindsay. ☞

DER AUTOR



Charles Seife ist Professor für Journalismus an der New York University und Autor mehrerer Sachbücher über Mathematik und Kosmologie.

WEBLINKS

<http://projects.propublica.org/docdollars>
Datenbank der Journalistengruppe ProPublica (englisch)

<http://dida.library.ucsf.edu>
Datenbank mit internen Dokumenten der Pharmaindustrie, die fragwürdige Geschäftspraktiken offenlegen (englisch)

www.scientificamerican.com/dec2012/drug-research
Links zu Dokumenten und Studien, die der Autor für die Recherche heranzog (englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192441

Mein Essen bezahle ich selbst!

Ein deutscher Mediziner berichtet von seinen persönlichen Erfahrungen im Umgang mit Interessenkonflikten in der medizinischen Forschung sowie in seiner Tätigkeit als Arzt. Bei diesen kommen vertrackte psychologische Mechanismen zum Tragen. Wie lässt sich das Problem am besten angehen?

Von Klaus Lieb

Als ich Mitte der 1990er Jahre ein junger Arzt in Freiburg war, lud mich eine Pharmafirma zu einer fünftägigen Reise nach Stockholm ein. Dort stellte sie einige Stunden lang ein neues Medikament vor, das sie gerade auf dem Markt eingeführt hatte. Der Rest der Reise bestand aus Essen, Stadtführungen und Übernachtungen im Fünf-Sterne-Hotel. Im Anschluss an die Tagung erhielten alle Teilnehmer Arzneimittelmuster, Büromaterial und Fachbücher – kostenlos, versteht sich.

Kaum war ich 1999 Oberarzt geworden, trafen immer mehr Angebote von Pharmafirmen ein, meine Vorträge zu sponsern, die ich in anderen Kliniken hielt. Die Honorare waren attraktiv, und man versicherte mir, dass ich die Inhalte meines Vortrags ganz frei wählen könne. Im Anschluss an

meinen Vortrag warb die jeweilige Firma dann an einem kleinen Stand für ihr Medikament.

Später führte ich auch klinische Auftragsstudien für die Industrie durch. Dabei legen die Firmen einer Universitätsklinik ein Studienprotokoll zum Testen eines Medikaments vor. Die Klinik rekrutiert dann Patienten und behandelt sie nach dem Protokoll. Dafür erhält der Studienleiter ein Honorar, über das er zum großen Teil frei verfügen kann. Er hat jedoch keinen Zugriff auf die Daten – er weiß nicht, was später damit passiert – und auch kein Publikationsrecht. Laut Vereinbarung besitzt allein die Firma die Hoheit über die Daten.

Heute erhalte ich als Chefarzt einer Universitätsklinik einen Teil meiner Vergütung leistungsorientiert. Das heißt: Ich erhalte Zuschläge, wenn ich bestimmte ökonomische Ziele erreiche oder bestimmte Forschungsleistungen erbringe, gemessen an Drittmittelinwerbungen und Publikationen.

Diese vier Beispiele aus meiner persönlichen Erfahrung zeigen die vielen Facetten des Problems »Interessenkonflikte in der Biomedizin« auf, die jeweils ihre ganz eigenen Schwierigkeiten mit sich bringen. Doch was genau sind überhaupt Interessenkonflikte, und wie wirken sie? Welche Risiken entstehen daraus, und wie kann man mit ihnen professionell am besten umgehen?

Interessenkonflikte entstehen dann, wenn unterschiedliche Interessen zweier Parteien aufeinandertreffen, die nicht miteinander kompatibel sind. Dies ist bei Kooperationen zwischen Mediziner und Industrie sehr häufig der Fall. Das primäre Interesse des Arztes sollte es sein (so lautet schon der hippokratische Eid), das Bestmögliche für den Patienten zu tun und Schaden von ihm abzuwenden. Ähnlich versucht der Wissenschaftler, nach bestem Wissen und Gewissen nach der »Wahrheit« zu forschen.

AUF EINEN BLICK

VERTRACKTE PSYCHOLOGISCHE MECHANISMEN

1 Kooperationen mit der Industrie in Klinik und Forschung bringen **Interessenkonflikte** mit sich, welche die **Unabhängigkeit** und **Objektivität** von Ärzten und Wissenschaftlern beeinträchtigen können.

2 Beispiele sind das **bevorzugte Verschreiben bestimmter Medikamente** und die **verzerrte Darstellung ihrer Eigenschaften** bei Vorträgen. Dabei führen psychologische Mechanismen dazu, dass den Betroffenen meist gar nicht klar ist, dass sie beeinflusst werden.

3 Daher muss erst ein **Bewusstsein für das Problem** geschaffen werden. **Verstärkte Transparenz** und ein **rigideres Regelwerk** zum Umgang mit Interessenkonflikten sollen dann eine größere Unabhängigkeit der Mediziner ermöglichen, damit das Patientenwohl weiter im Zentrum steht.



Nicht direkte Bestechung, sondern unterschwellige Beeinflussung durch Gefälligkeiten der Pharmaindustrie stellt das größte Risiko für die Unabhängigkeit von Ärzten und Forschern dar.

Demgegenüber sind Industrie und Wirtschaft verständlicherweise zunächst einmal an Gewinnmaximierung interessiert: Wie lassen sich ihre Produkte profitabel entwickeln und verkaufen? An diesem Ziel ist erst einmal überhaupt nichts auszusetzen. Wenn aber die beiden Welten aufeinandertreffen, entstehen zwangsläufig Reibungspunkte.

Nun passiert es normalerweise kaum, dass Firmen auf Ärzte zugehen und sagen: Hier haben Sie 1000 Euro, und dafür verschreiben Sie nur noch unser Produkt und nicht mehr das der Konkurrenzfirma. Oder: Hier haben Sie 10 000 Euro, und dafür setzen Sie bei Ihrer Krankenhausapotheke durch, dass nur noch unser Medikament gelistet ist. Das wäre Korruption, und die ist gar nicht das größte Problem.

Zwar gibt es natürlich auch solche Fälle in der Ärzteschaft, und selbstverständlich muss alles getan werden, um diese zu verhindern. Viel weit reichender sind aber die unterschweligen Interessenkonflikte. Denn diese wirken innerhalb legaler Grenzen und dabei so subtil, dass die meisten Ärzte es gar nicht merken. Denn sie haben einen »blinden Fleck« dafür, dass sie beeinflusst werden. Mit anderen Worten: Das Geniale und zugleich Wirkungsvolle an dieser Art von Manipulation ist, dass sie stattfindet und die Betroffenen dennoch gleichzeitig das Gefühl der Unabhängigkeit und Objektivität haben.

Dieser »blinde Fleck« wird deutlich, wenn man Ärzte erstens fragt, ob sie Geschenke der Industrie annehmen und sich dadurch in ihrem Ordnungsverhalten beeinflussen fühlen, und zweitens wissen will, wie sie die Situation bei ihren Kollegen einschätzen. In einer von meiner Arbeitsgruppe durchgeführten Umfrage unter 300 deutschen Ärzten kam heraus: Sich selbst halten die Mediziner trotz der Annahme von Geschenken für weit gehend immun. Bei ihren Kollegen dagegen bewerten sie die Gefahr der Beeinflussung als drei-

bis viermal höher! Sie können (wie wohl alle Menschen) diese also offenbar bei sich selbst schlechter wahrnehmen als bei anderen.

Das ist einer der wichtigsten Gründe dafür, dass Interessenkonflikte konsequent offengelegt werden müssen – denn sie bringen Risiken mit sich. So wird ein Arzt möglicherweise nicht mehr das Medikament verschreiben, das er für das beste hält, sondern das, was er auf einer gesponserten Fortbildungsreise kennen gelernt hat oder was gerade ein Pharmavertreter mit Geschenken wie einer Essenseinladung oder Arzneimittelmustern beworben hat.

Gefälligkeiten wollen erwidert sein

Hier kommt ein psychologischer Mechanismus zum Vorschein, die so genannte Reziprozitätsregel: Jeder Mensch hat eine starke unbewusste Tendenz, Gefälligkeiten zu erwidern, selbst wenn diese nicht erbeten oder erwünscht waren. Dies gilt sogar, wenn wir die Person, die uns etwas Gutes tut, gar nicht mögen. Kleine Geschenke oder Einladungen zu Kongressen fördern demnach unbewusst die Neigung, sich dafür erkenntlich zu zeigen – etwa ganz einfach durch die häufigere Verschreibung des entsprechenden Medikaments.

Ein zweites Risiko ist, dass Urteile durch Interessenkonflikte verzerrt werden. Dies kann etwa dann der Fall sein, wenn ein Oberarzt einen Vortrag hält, der von einer Firma mit einem üppigen Honorar gesponsert wird. Er wird dadurch unbewusst dazu verleitet, sich positiv zu dem Produkt der Firma zu äußern und negative Aspekte auszublenden.

Der hier zu Grunde liegende psychologische Mechanismus ist das Phänomen der motivierten Evaluation: Empfinden wir eine von mehreren möglichen Interpretationen (»Das Medikament X ist besser als das Medikament Y«) als

vorteilhaft, prüfen wir alle Informationen, die zu dieser Interpretation passen, weniger streng, akzeptieren sie schneller, nehmen sie stärker wahr und geben ihnen mehr Gewicht. Informationen dagegen, die der Interpretation widersprechen, behandeln wir umgekehrt.

Dieses verzerrte Urteil kann auch bei Ärzten zum Tragen kommen. Durch das Honorar und die unausgesprochene Erwartungshaltung der Firma sind sie unbewusst eher bereit, positive Aspekte des Medikaments zu sehen und zu betonen und negative auszublenden. Das Verwickelte dabei ist: Ein wesentliches Merkmal der motivierten Evaluation ist gerade das Gefühl der Objektivität auf Seiten der Betroffenen. Kein Wunder also, dass diese Marketingstrategie der Firmen seit Jahrzehnten wunderbar funktioniert, ohne durchschaut zu werden.

Auftragsstudien der Pharmaunternehmen gefährden die Objektivität und Neutralität der Forschung

Wie sehen nun die Risiken aus, die bei der Durchführung von Auftragsstudien für die pharmazeutische Industrie entstehen? In Kooperation mit Wolf-Dieter Ludwig und Gisela Schott, beide Herausgeber des unabhängigen »Arzneimittelbriefs«, habe ich eine systematische Übersichtsarbeit zu den Einflüssen der pharmazeutischen Industrie auf die Durchführung und Publikation von Arzneimittelstudien bis 2009 erstellt. Hierbei wurden mehrere Risiken für die Objektivität und Neutralität der Forschung deutlich.

Erstens: Indem der Auftraggeber das Forschungsziel festlegt, also wo zu welcher Frage geforscht wird, besteht die Gefahr, dass Themen vernachlässigt werden, bei denen eigentlich ein viel höherer Forschungsbedarf besteht. Darüber hinaus bindet das Kapazitäten, die an anderer Stelle fehlen. Ein Beispiel aus meinem eigenen Fachgebiet mag das verdeutlichen. Es kommen immer wieder neue Antidepressiva zur Ersttherapie von Depressionen auf den Markt, aber wir haben bislang kaum harte Belege dafür, was zu tun ist, wenn zwei solche Medikamente versagt haben. Hier braucht es mehr unabhängige Studien universitärer Institute, die ihre Forschungsgebiete nur nach dem Nutzen für die Patienten auswählen.

Zweitens: Da die Pharmaindustrie die Forschungsmethode bestimmt, besteht die Gefahr, dass nicht ein Studiendesign gewählt wird, das am besten den wahren Effekt eines Medikaments zeigt – denn daran hat die Firma kein primäres Interesse. Vielmehr legt sie häufig ein Studiendesign fest, das am wahrscheinlichsten eine Überlegenheit ihres Produkts gegenüber seinen Konkurrenten zeigt.

Drittens: Die Datenhoheit liegt beim Auftraggeber. Zumindest bei Medikamentenprüfungen haben die durchführenden Kliniken keinen Zugriff auf die Daten und in der Regel auch keine Publikationsrechte. Dadurch könnten Daten unter den Tisch fallen, die nicht in die Marketingstrategie

»Es braucht mehr unabhängige Forschung, die nur auf das Patientenwohl ausgerichtet ist«

der Firma passen. Man bezeichnet das auch als »publication bias« – also das Nichtveröffentlichen negativ ausgefallener Studienresultate und eine überproportionale Publikation von positiven Ergebnissen. Diese Strategie vieler Firmen hat zu einer erheblichen Überschätzung der Effekte vieler Medikamente geführt und dadurch Patienten gefährdet. Hinzu kommt, dass einige Firmen Informationen über unerwünschte Arzneimittelwirkungen nicht veröffentlicht haben, weil sie befürchteten, dass sie dann das Medikament vom Markt nehmen müssten. Dies hat etwa im Fall des Schmerzmittels Vioxx nachweislich zu vielen Todesfällen geführt, die vermeidbar gewesen wären.

Neben Kooperationen mit pharmazeutischen Unternehmen führt aber auch die zunehmende Ökonomisierung des Gesundheitswesens zu Interessenkonflikten. Im letzten der vier einleitenden Beispiele hatte ich die Problematik von Chefarztverträgen erwähnt. Das weckt Erinnerungen an die jüngsten Transplantationsskandale. In einem Fall soll der betroffene Oberarzt für jede verpflanzte Leber mehrere tausend Euro Bonus von der Klinikleitung erhalten haben – ein klarer Interessenkonflikt mit dramatischen Konsequenzen.

Aber auch der aktuell diskutierte Verdacht, dass immer mehr und mehr operiert wird, könnte seinen Ursprung in Interessenkonflikten haben: Bei der Vorgabe von ökonomischen Zielen durch die Klinikleitung – etwa eine bestimmte Anzahl von Hüftoperationen pro Jahr durchzuführen – kann es unbewusst passieren, dass der Arzt seinen Patienten eher eine Operation empfiehlt, auch wenn sie streng genommen nicht angezeigt ist. Es ist daher erfreulich, dass Bundesärztekammer und Deutsche Krankenhausgesellschaft diese problematischen Bonusverträge, die falsche Anreize schaffen, jetzt abschaffen wollen.

So weit zum Problem. Welche Maßnahmen sind nun für einen professionellen Umgang mit Interessenkonflikten sinnvoll?

- Es muss erst einmal überhaupt ein Bewusstsein dafür geschaffen werden.
- Es gilt Interessenkonflikte offenzulegen und damit für andere sichtbar und überprüfbar zu machen.
- Wir brauchen klare Regeln, um die daraus entstehenden Risiken beherrschen zu können.
- Interessenkonflikte sollten – wo immer möglich – durch selbstkritisches und entschlossenes Handeln vermieden werden.

Der erste Punkt ist nötig, da viele Ärzte und Wissenschaftler sich auf Grund ihres »blinden Flecks« das Vorhandensein von Interessenkonflikten gar nicht klarmachen. Fortbildungsveranstaltungen, Seminare und Vorlesungen für Studierende würden hier das allgemeine Bewusstsein fördern. Forschungsprojekte könnten deutlich machen, wo Interessenkonflikte bestehen und wie sie wirken.

Um derartige Manipulationsmechanismen sichtbar zu machen, ist Punkt zwei unerlässlich – Transparenz. Manch einer mag nun einwenden, dass es eine solche Offenlegung gerade in der Medizin bereits gibt, ich also Eulen nach Athen trage. Allerdings läuft das bislang normalerweise so ab: Ein Arzt oder Wissenschaftler wird von einer Fachzeitschrift oder einer Leitlinienkommission darum gebeten, seine Interessenkonflikte offenzulegen. Dies tut er, indem er die Namen der Firmen nennt, mit denen er zusammengearbeitet hat. So weit, so gut. Aber dann soll der Betroffene zusätzlich selbst beurteilen, ob er dadurch seine Meinungsäußerung beeinflusst sieht oder nicht. Gerade das ist aber auf Grund des erwähnten »blinden Flecks« nur schwer möglich. Entsprechend verneinen die Beteiligten regelmäßig, Interessenkonflikte zu haben.

Entscheidend: Bewertung durch andere

Daraus ergeben sich zwei Konsequenzen: Die Offenlegung muss erstens umfassend und detailliert sein, und zweitens müssen andere Personen beurteilen, ob der Interessenkonflikt ein Risiko für ein verzerrtes Urteilen oder Handeln mit sich bringt. Die Arzneimittelkommission der Deutschen Ärzteschaft, bei der ich die Arbeitsgruppe Interessenkonflikte leite, oder das Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen (IQWiG) haben genau das umgesetzt. Da beide die Wirksamkeit von Arzneimitteln bewerten, ist die Unabhängigkeit ihrer Mitglieder und Experten entscheidend. Sie verwenden daher Formblätter, die detailliert nach allen Arten von Interessenkonflikten fragen, und zwar unabhängig davon, ob der Betroffene eine Beeinflussung sieht oder nicht. Aufzuführen sind etwa Vortrags- oder Gutachterhonorare, Unterstützungen für Kongressbesuche oder Forschungsprojekte, aber auch Tätigkeiten in Berufsorganisa-

tionen oder für Krankenkassen. Der Vorstand beziehungsweise unabhängige Gremien sichten dann die derart offengelegten Interessenkonflikte, bewerten anschließend das Risiko einer Beeinflussung und können gegebenenfalls Wissenschaftler von Bewertungen von Arzneimittelstudien ausschließen.

Welche Regeln sind schließlich erforderlich, um die Risiken aus Interessenkonflikten beherrschbar zu machen, und wie können solche Konflikte wirksam reduziert werden? Es lassen sich drei Gruppen unterscheiden: solche, die sich jeder einzelne Arzt oder Wissenschaftler selbst auferlegen kann; solche, die Institutionen wie Hochschulen oder Kommissionen zum Umgang mit Interessenkonflikten aufstellen; und solche, die der Gesetzgeber in Form von Gesetzen erlassen kann.

Regeln der ersten Gruppe sollten am besten direkt Eingang in die Berufsordnung der Ärzte finden. Leider ist mit dieser momentan in einem weiten Rahmen vereinbar, Geschenke und Zuwendungen etwa der Pharmaindustrie anzunehmen. Das muss sich ändern.

Viele Ärzte und Wissenschaftler haben sich inzwischen entschlossen, auf persönliche Zuwendungen freiwillig zu verzichten, um unabhängiger zu sein. Ich selbst arbeite zwar selbstverständlich mit der Pharmaindustrie auf wissenschaftlicher Ebene zusammen. Allerdings nehme ich seit sechs Jahren keinerlei Gelder mehr von ihr für Vorträge, Veranstaltungen oder Ähnliches an. In der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Mainz, die ich leite, werben keine Pharmavertreter auf den Stationen, es gibt keine Werbegeschenke, und wir nehmen auch kein Geld der Industrie für Fortbildungsveranstaltungen und keine Arzneimittelmuster an. Damit gehören Reisen wie die eingangs erwähnte nach Stockholm der Vergangenheit an. Diese Maßnahmen



Wer für Vorträge und Veranstaltungen Geld von Firmen erhält, läuft Gefahr, beeinflusst zu werden, sogar ohne es selbst wahrzunehmen.

verleihen mir ein viel höheres Maß an Unabhängigkeit in meiner Verordnung von Medikamenten, aber auch bei Empfehlungen, die ich in Vorträgen abgebe.

In Deutschland gehören etwa 350 Ärzte der Ärzteinitiative MEZIS an. MEZIS steht für »Mein Essen zahl ich selbst« und ist der deutsche Ableger der internationalen »No free lunch«-Bewegung. Diese hat sich einer rationalen, rein evidenzbasierten Medizin verpflichtet und verzichtet auf alle Formen von Vergünstigungen durch die Pharmaindustrie. Der englische Slogan »There's no such thing as a free lunch« ist dabei noch viel treffender als die Eindeutschung »MEZIS«, denn er steht nicht nur dafür, dass man sich nicht einladen lässt, sondern auch dafür, dass eine solche Einladung grundsätzlich nicht wirklich »for free« ist – es also so etwas wie ein kostenloses Essen mit der Industrie ohne Konsequenzen gar nicht gibt.

Leitbilder für eine gute Zusammenarbeit

Kooperationen zwischen Industrie und Hochschulen sind wichtig und wirken sich häufig positiv für Patienten und Gesellschaft aus – zum Beispiel dann, wenn neue, wirkungsvolle Medikamente entwickelt werden. Gibt es aber keine klaren Spielregeln, entstehen die erwähnten Risiken, die das Patientenwohl gefährden können. Entscheidend dürfte sein, Leitbilder für die Zusammenarbeit zwischen den beiden Bereichen zu entwickeln: ein Regelwerk, das weit über die gesetzlichen Vorgaben zur Korruptionsvermeidung hinausgeht. Die Hochschulen in den USA sind hier sehr viel weiter – fast alle medizinischen Fakultäten haben schon mehr oder weniger strenge »policies«. Die Hochschulen müssten darüber hinaus aber auch unabhängige Gremien einsetzen, welche die Gestaltung von Kooperationsverträgen mit der Industrie bewerten und den Umgang mit Interessenkonflikten steuern. Auf diese Weise ließen sich zudem Zielvereinbarungen mit Hochschullehrern daraufhin untersuchen, ob sie keine falschen Anreize beinhalten.

Zur angestrebten »guten Praxis« gehört auch, dass Hochschulen ihre Kooperationsverträge mit der Industrie offenlegen. Dabei geht es um die Rahmenbedingungen und nicht um die Inhalte, die möglicherweise der Geheimhaltung unterliegen. Werden mit diesem Argument allerdings die allgemeinen Regeln der Zusammenarbeit nicht bekannt gemacht, wie kürzlich beim Kooperationsvertrag der Universität zu Köln mit der Bayer AG geschehen, hat man durchaus das Recht, misstrauisch zu sein.

Großen Handlungsbedarf sehe ich insbesondere bei der Auftragsforschung. Die Wissenschaftler müssen über die verwendete Methode mitentscheiden können, vollen Zugang zu den Daten haben, die Interpretationshoheit über die Ergebnisse sowie das Publikationsrecht besitzen, und alle Studien müssen registriert und veröffentlicht werden. Immerhin hat der Gesetzgeber kürzlich eine verpflichtende Registrierung aller klinischen Arzneimittelprüfungen in Deutschland erwirkt – ein Schritt in die richtige Richtung.

Auf diesem Gebiet gibt es auch in unserer Klinik noch ungelöste Probleme. Wir haben ein Zentrum, in dem wir viele unabhängige Studien, aber auch Auftragsforschung für die Pharmaindustrie durchführen. Wir machen das zwar nur mit solchen Medikamenten, von denen wir erwarten können, dass sie bereits auf dem Markt befindlichen Substanzen überlegen sind. Die Probleme, dass die Daten allein beim Auftraggeber liegen und wir kein Publikationsrecht haben, bleiben aber bestehen. Dafür gibt es wohl nur eine Lösung: die Stärkung der unabhängigen Pharmaforschung an den Universitätskliniken.

Brauchen wir womöglich auch neue Gesetze für Ärzte, um Interessenkonflikte und Korruption zu regeln? Der Bundesgerichtshof hat letztes Jahr mit Recht darauf hingewiesen, dass die Verordnung von Medikamenten im Vertrauensverhältnis der Arzt-Patient-Beziehung erfolgt und dass dabei andere Interessen keine Rolle spielen dürfen. Mit anderen Worten: Ärzte sind weder Beauftragte der Pharmaindustrie noch der Krankenkassen, sondern allein ihrer Patienten. Das muss der Kern der ärztlichen Haltung sein, die in der Berufsordnung der Ärzte unmissverständlich festgeschrieben werden sollte. Ob man dann noch Gesetze braucht, um Verstöße gegen diese Berufsordnung oder gegen Regeln, die sich Institutionen oder Kommissionen geben, zu ahnden, hängt davon ab, wie weit die Sanktionierungsmöglichkeiten der Ärzteschaft selbst reichen. Regeln, die sich auf die Berufsordnung oder Leitbilder beziehen, besitzen einen wichtigen Vorteil: Sie lassen sich leichter weiterentwickeln und dem Stand der Forschung und Erkenntnis anpassen. Gesetze sind naturgemäß viel starrer und unbeweglicher. ~

DER AUTOR



Klaus Lieb ist Direktor der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Mainz. 2013 erhielt er vom Deutschen Hochschulverband für seinen Einsatz für integre Wissenschaft die Auszeichnung »Hochschullehrer des Jahres«.

QUELLEN

Lieb, K., Brandtönies, S.: Eine Befragung niedergelassener Fachärzte zum Umgang mit Pharmavertretern. In: Deutsches Ärzteblatt international 107, S. 392–398, 2010

Schott, G. et al.: Finanzierung von Arzneimittelstudien durch pharmazeutische Unternehmen und die Folgen (Teil 1). In: Deutsches Ärzteblatt international 107, S. 279–285, 2010

Schott, G. et al.: Finanzierung von Arzneimittelstudien durch pharmazeutische Unternehmen und die Folgen (Teil 2). In: Deutsches Ärzteblatt international 107, S. 295–301, 2010

WEBLINKS

www.mezis.de

Informationen zur Ärzteinitiative »Mein Essen zahl ich selbst«

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192442

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern



WISSENSCHAFT IN DIE SCHULEN

Wir zeigen durch unsere kostenlosen Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Darüber hinaus stellt WIS mit Unterstützung eines Sponsors Schulklassen kostenlose Klassensätze unserer Zeitschriften zur Verfügung.

Nehmen Sie mit Ihrer Klasse an unserer Bildungsinitiative teil.

Anmeldung unter:



Aus Staub geboren

Die Entdeckung hunderter Exoplaneten hat den Forschern etliche Überraschungen bereitet. Demnach geht es gerade in der Frühzeit solcher Systeme wilder zu als gedacht. Und offenbar haben viele Planeten eine weit komplexere Vergangenheit als die Satelliten unserer Sonne!

Von Thomas Henning

Wie viele Planetensysteme gibt es außerhalb des Sonnensystems? Wie bilden sie sich aus Gas- und Staubwolken? Ist darunter vielleicht auch eine zweite Erde, auf der Leben existiert? Solche Fragen haben die Menschheit schon immer fasziniert, denn sie betreffen die Fundamente unserer irdischen Existenz. In den letzten Jahren haben Astronomen hunderte Exoplaneten entdeckt – doch was die Entstehung solcher Himmelskörper angeht, stehen sie immer noch vor zahlreichen Rätseln:

- ▶ Wie schaffen es kleine Gesteinsbrocken überhaupt, Durchmesser von mehr als einem Meter zu erreichen, wo doch konkurrierende Prozesse dies zu verhindern scheinen?
- ▶ Warum entstehen auch Planeten, die in äußerst exzentrischen Bahnen um ihre Zentralsterne laufen?

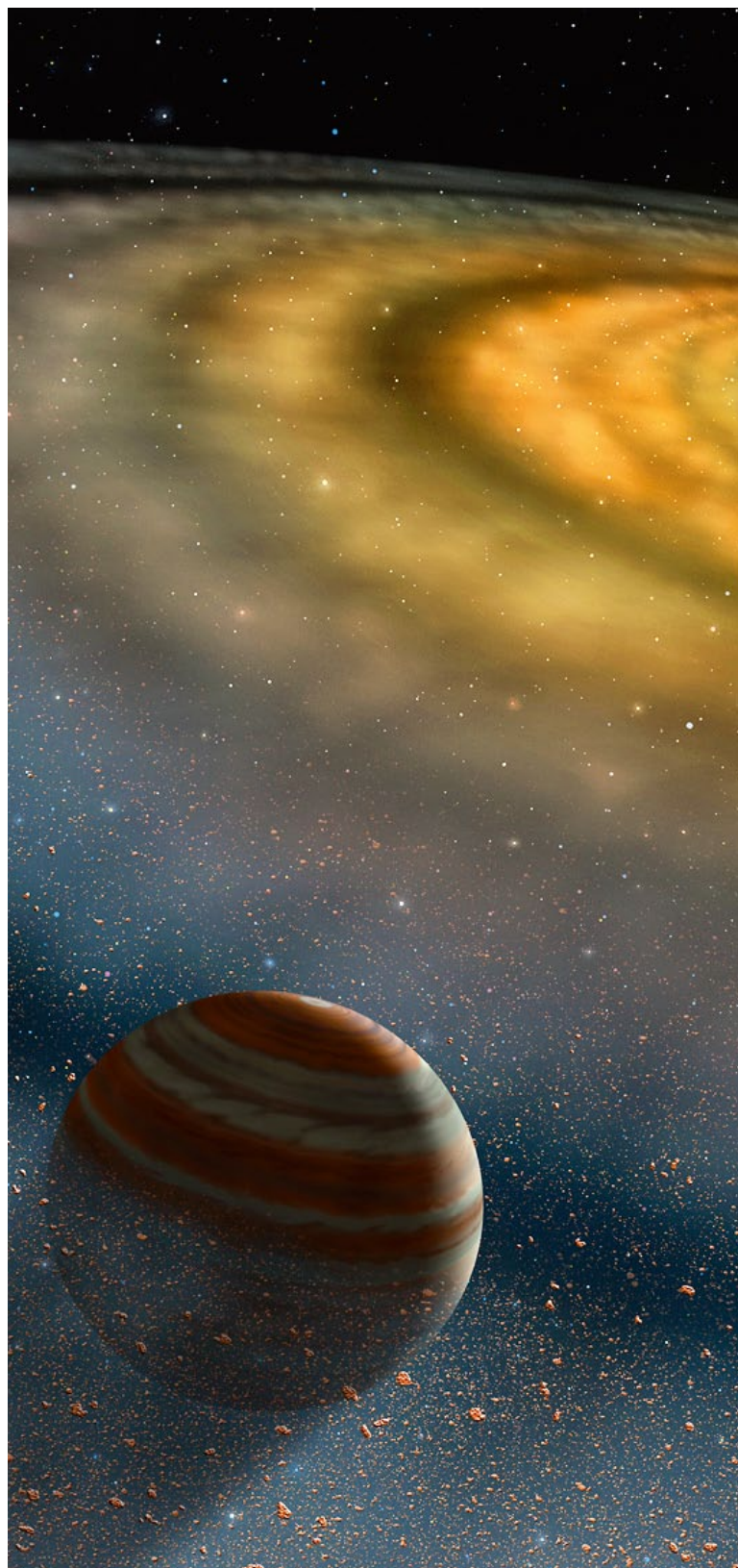
DIE SERIE IM ÜBERBLICK

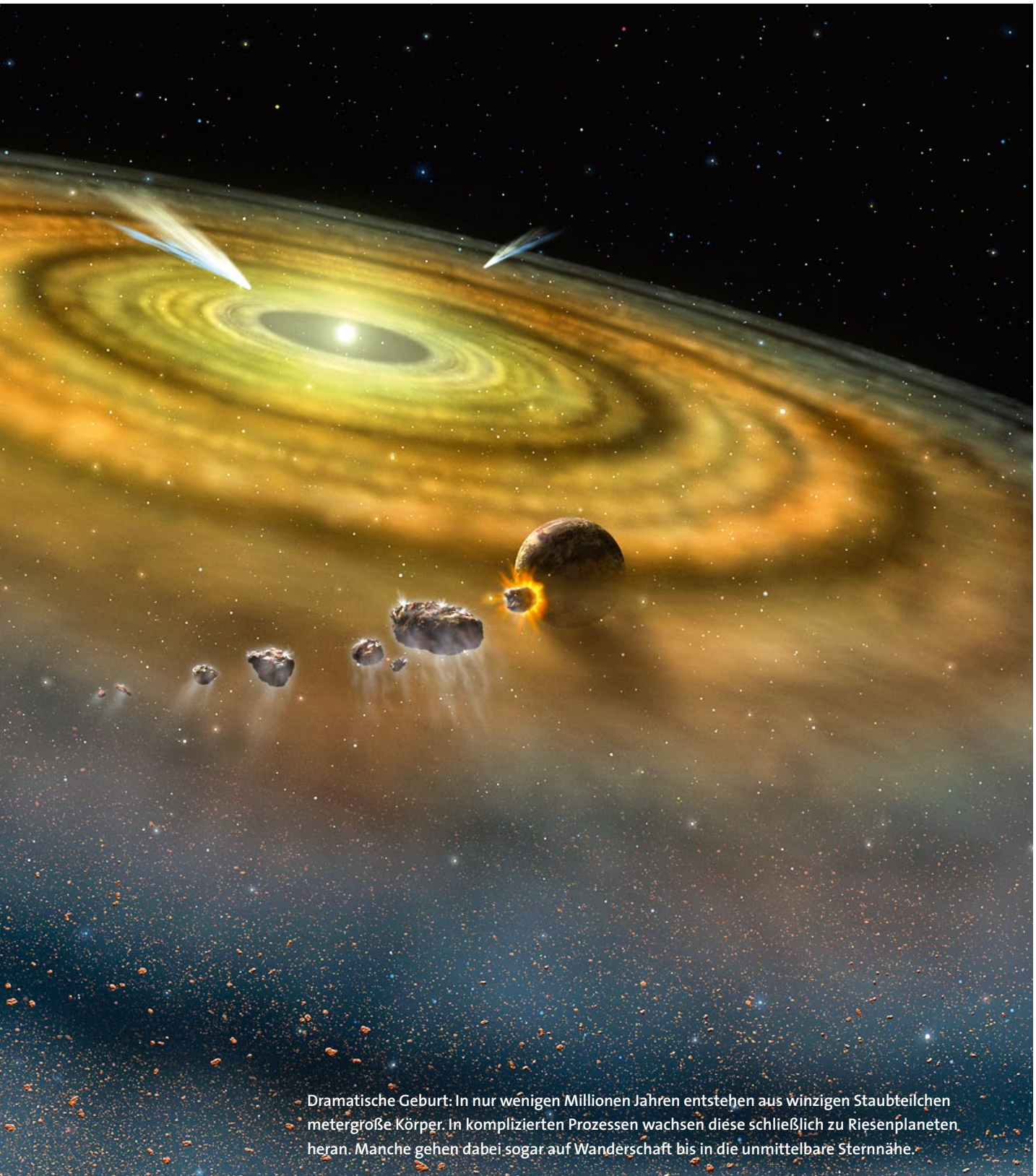


DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER ASTRONOMIE

Teil 1	▶ Heiße Stürme im Kosmos <i>Gerhard Börner</i>	April 2013
Teil 2	▶ Giganten im All <i>Gerhard Börner</i>	Mai 2013
	▶ Zeugen des Urknalls <i>Marek Abramowicz und Julia Tjus</i>	
Teil 3	▶ Aus Staub geboren <i>Thomas Henning</i>	Juni 2013
Teil 4	▶ Super-Erden – die Jagd nach Exoplaneten <i>Lisa Kaltenegger</i>	Juli 2013
Teil 5	▶ Geburt und Tod von Sternen <i>Ralf Launhardt</i>	August 2013
Teil 6	▶ Dunkle Energie und Dunkle Materie <i>Volker Springel</i>	September 2013

NASA, IPI / CALTECH / STSCI / COC / UNIVERSITY OF ARIZONA / ESA / AURA / JHU

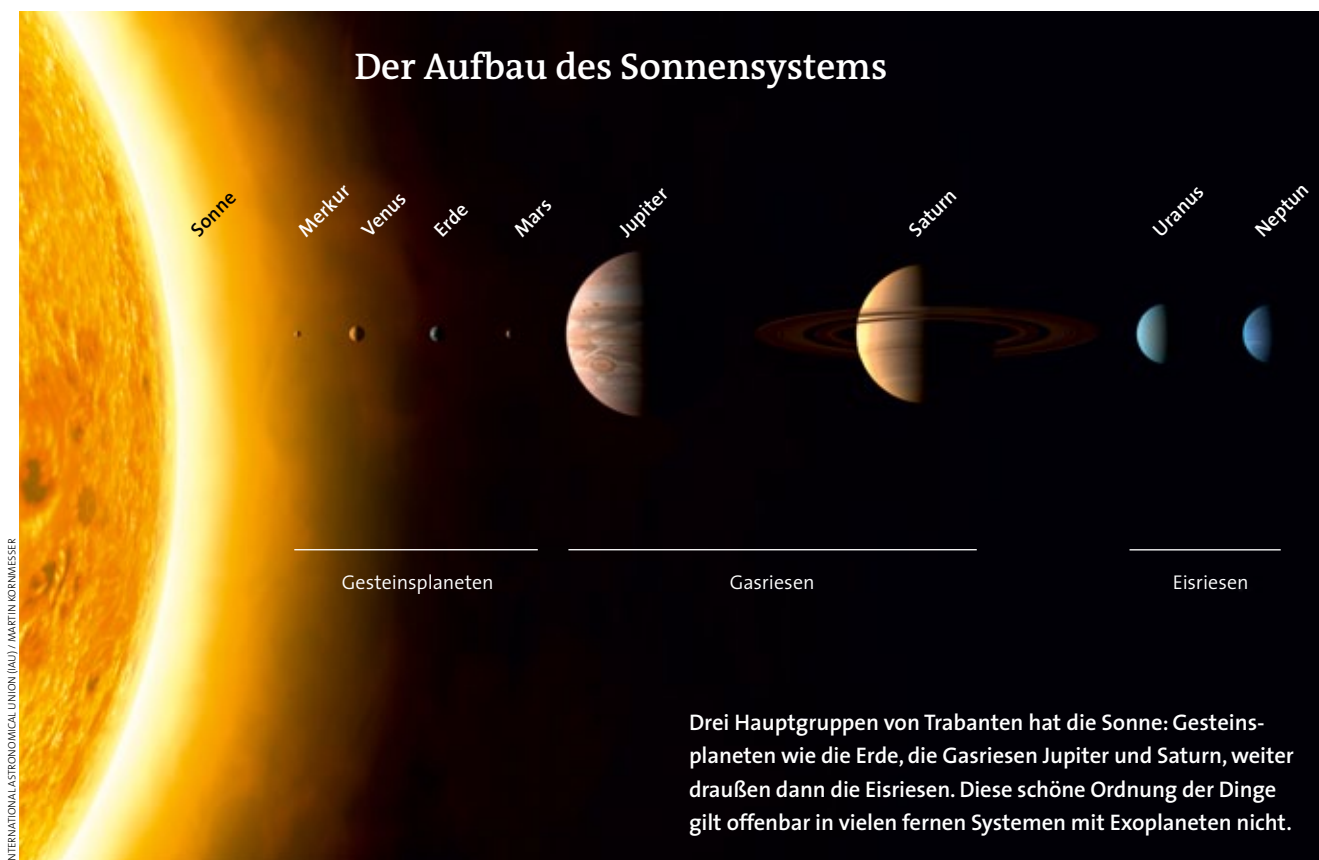




Dramatische Geburt: In nur wenigen Millionen Jahren entstehen aus winzigen Staubteilchen metergroße Körper. In komplizierten Prozessen wachsen diese schließlich zu Riesenplaneten heran. Manche gehen dabei sogar auf Wanderschaft bis in die unmittelbare Sternnähe.

NASA / FUSE / INHETTE COOK

Der Aufbau des Sonnensystems



Drei Hauptgruppen von Trabanten hat die Sonne: Gesteinsplaneten wie die Erde, die Gasriesen Jupiter und Saturn, weiter draußen dann die Eisriesen. Diese schöne Ordnung der Dinge gilt offenbar in vielen fernen Systemen mit Exoplaneten nicht.

➤ Wieso begeben sich Planeten manchmal offenbar auf Wanderschaft?

➤ Warum gibt es bei fremden Systemen auch in den inneren Bereichen Riesenplaneten – anders als bei uns?

Womöglich sind Astronomen nun erstmals in der Lage, Antworten auf solche Fragen zu geben. Unser Sonnensystem ist im Universum nur eines unter vielen Planetensystemen, wobei die Suche nach Exoplaneten sehr unterschiedliche Objekte ans Licht brachte. Diese Vielfalt vermittelt einen wesentlich detaillierteren Einblick, wie sie entstehen und sich entwickeln, als früher. Konnten die Forscher bisher sozusagen nur eine einzige Familie von Planeten in unserem Sonnensystem untersuchen, analysieren sie jetzt ein ganzes Sortiment an Systemen. Das verrät den Astrophysikern einiges über die Geburtsbedingungen sowie darüber, wie die stellare Umwelt Entstehung und Dynamik der Systeme beeinflusst.

Zwei Eigenschaften zeichnen unser Sonnensystem aus:

➤ Alle Planeten bewegen sich in nahezu der gleichen Ebene um die Sonne.

➤ Sie folgen in ihrer Umlaufbahn der Rotationsrichtung der Sonne – ebenso der Zwergplanet Pluto und die meisten Asteroiden.

Aus dieser Tatsache schlossen einst der Philosoph Immanuel Kant (1724–1804) sowie der Mathematiker und Astronom Pierre-Simon Laplace (1749–1827), dass das Sonnensystem aus einer rotierenden Gasscheibe entstanden sein muss. Tatsächlich konnten Theoretiker mit Computersimulationen zeigen, wie sich beim Gravitationskollaps rotierender

Molekülwolken um junge Sterne stets auch zirkumstellare, protoplanetare Scheiben ausbilden. Der Grund: Material kann einfacher entlang der Rotationsachse einer Wolke einstürzen als senkrecht dazu.

Ob bei diesem Prozess dann ein Einzelstern einschließlich Scheibe oder ein Doppelsternsystem mit einer so genannten zirkumbinären Scheibe entsteht, die also beide Sterne umkreist, das bestimmt die Physik des Molekülwolkenkerns. Entscheidend sind die Anfangsbedingungen: das Verhältnis von Rotationsenergie zu thermischer Energie sowie zur Energie des Magnetfelds. Diese Parameter bestimmen weitgehend die Struktur der Sternsysteme und ihrer Scheiben. Befinden sich die Sterne mit ihren Scheiben in der Nähe eines anderen sehr massereichen und leuchtkräftigen Sterns, so

AUF EINEN BLICK

VON STAUBTEILCHEN UND SUPER-JUPITERN

1 Seit 1995 haben Astronomen viele hundert **Exoplaneten** sowie zahlreiche **protoplanetare Staub- und Gasscheiben** entdeckt.

2 Damit können die Forscher **zentrale Fragen** beantworten: Wie schwer sind die Scheiben? Wie wachsen die Planeten? Warum gibt es Riesenplaneten nahe bei ihren Muttersternen? Wie viele erdähnliche Planeten gibt es?

3 Die aufwändigen **Computersimulationen** zeigen, dass es in den bisher beobachteten außerirdischen Sonnensystemen oft deutlich wilder zugeht als bei uns.

kann dessen Strahlung die Scheiben ionisieren und verdampfen, so dass keine Planeten entstehen. Solche verdampfenden Scheiben wurden in der Nähe der Trapezsterne im Orion entdeckt, was zeigt, wie wichtig die stellare Umgebung für die Planetenentstehung ist. In unserem Sonnensystem unterscheiden Astronomen verschiedene Typen von Planeten: terrestrische Gesteinsplaneten, Gasriesen sowie Eisplaneten. Bekanntlich kreisen die Riesenplaneten weiter draußen um die Sonne als die Gesteinsplaneten. Das lässt sich am besten so verstehen: Die Temperatur im Sonnenebel – der protoplanetaren Scheibe um die junge Sonne – nahm nach außen ab, bis bei etwa zwei bis drei Astronomischen Einheiten (Abstand Erde-Sonne, AE) Wassereis auftrat und an der Planetenentstehung mitwirkte. Diese oft als »Schneegrenze« bezeichnete Region trennt das innere Sonnensystem mit den terrestrischen Planeten vom äußeren Reich der Gas- und Eisriesen. Die Trennlinie liegt zwischen Mars und Jupiter, etwa im Bereich des Asteroidengürtels.

Masse nach innen, Drehimpuls nach draußen

Sie unterscheidet auch den Geburtsverlauf der verschiedenen Planetentypen. Die Riesenobjekte Saturn und Jupiter bildeten zunächst einen Eis- und Gesteinskern mit einer rund zehnmal so großen Masse wie die Erde. Dieser war dann in der Lage, Gase wie Wasserstoff und Helium aus der protoplanetaren Scheibe allein durch seine Schwerkraft aufzusammeln. So entstanden ihre gewaltigen Gashüllen, die letztlich 90 Prozent ihrer Gesamtmasse ausmachen. Die Planetenmodelle legen nahe, dass sich im Inneren von Jupiter ein fester Kern mit fast dreifachem Erddurchmesser befindet.

Von der Gesamtmasse des Sonnensystems sind 99,8 Prozent auf die Sonne selbst konzentriert. Alle Planeten zusammen kommen nur auf rund 60 Erdmassen fester Substanz, dazu als Gase, vor allem gebunden in den Riesenplaneten, ein Hundertstel der Sonnenmasse, mit 75 Prozent Wasserstoff und 25 Prozent Helium. Damit dominierte unser übermächtiges Zentralobjekt schon sehr früh die Bewegung der Gasteilchen in der Scheibe, so dass sie sich im Wesentlichen auf so genannten Keplerbahnen bewegen, die allein von der Zentralmasse und Keplers Gesetzen abhängen.

Völlig konträr zur Massenverteilung stecken aber über 99 Prozent des Drehimpulses nicht in der Sonne, sondern in den Planeten. Über 60 Prozent entfallen dabei auf das Schwergewicht Jupiter. Dies geht auf Transportprozesse in der protoplanetaren Scheibe zurück, in der wohl einerseits Masse nach innen und andererseits Drehimpuls nach außen wanderte. Astrophysiker bezeichnen Gebilde, in denen solche Vorgänge ablaufen, als Akkretionsscheiben.

Was treibt diesen doppelten Transport an? Im Jahr 1943 publizierte der Physiker und Philosoph Carl Friedrich von Weizsäcker seine Arbeit »Über die Entstehung von Planetensystemen«. Darin postulierte er, dass die makroskopische Viskosität – also die Zähigkeit jener Art, wie sie etwa Honig zeigt – in einer Scheibe nur dann für den Austausch von Masse und Drehimpuls sorgen kann, wenn die Scheibe auch hin-

TELESKOPE mit ERFOLGSGARANTIE

 **StarSense Modul von Celestron**

Vollautomatische Einrichtung Ihres Teleskops in nur 3 Minuten: Ohne Alignment, ohne Dateneingaben, ohne Vorwissen und nachrüstbar für fast alle Celestron GoTo-Geräte. Nie zuvor war die Bedienung eines Teleskops so einfach!



 **SkyQ Link Modul und SkyQ App**

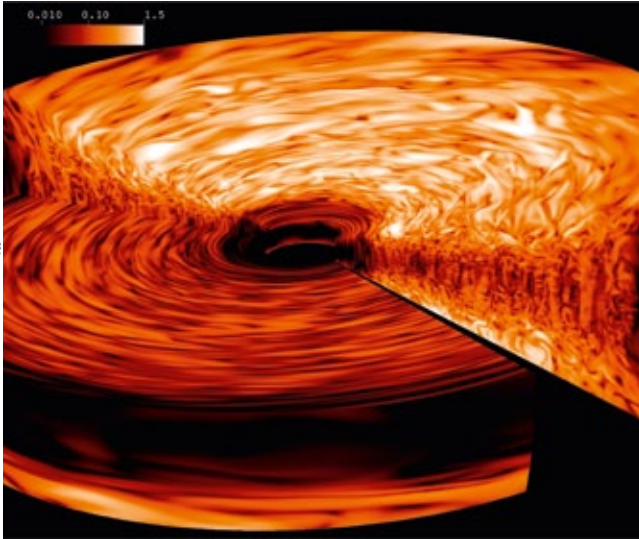
Das SkyQ Link WLAN-Modul ermöglicht die drahtlose Steuerung jedes computerisierten Celestron-Teleskops mit dem Computer oder der optional erhältlichen iPhone/iPad App "SkyQ".



AKTIONSPREISE*

alle weiteren Informationen finden Sie hier:





Diese 3-D-Simulation, die auch Magnetfelder berücksichtigt, zeigt die turbulenten Teilchengeschwindigkeiten in einer Scheibe. Die weißen Gebiete sind Überschallströmungen in der Scheibenkorona, der äußeren für Strahlung durchlässigen Hülle.

reichend turbulent ist. Ohne Turbulenz würde, so der theoretische Physiker, die Reibung der Gasmoleküle einfach nicht ausreichen, um einen merklichen Effekt hervorzurufen.

Damit hatte von Weizsäcker das Problem aber eigentlich nur verschoben. Denn jetzt stellte sich natürlich die Frage, wie das Gas in einen turbulenten Zustand geraten konnte. Lange hatte man dabei rein hydrodynamische Prozesse wie die Konvektion im Verdacht, doch das konnten die Theoretiker bald ausschließen. Eine andere mögliche Ursache schien in der Wirkung eines Magnetfelds auf eine Scheibe zu liegen, die ganz nach den keplerschen Gesetzen rotiert. Denn dabei kann sich, so zeigen es Rechnungen, eine kräftige Instabilität aufbauen, die das Gas in einen turbulenten Zustand versetzt. Möglicherweise sind wir der Lösung des Transportproblems tatsächlich einen großen Schritt näher gekommen.

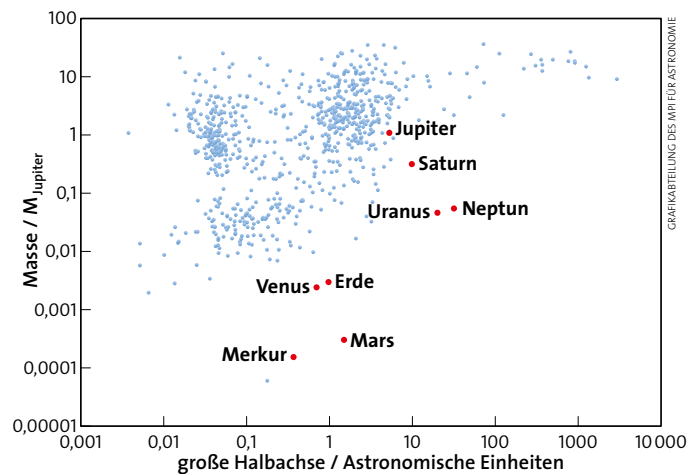
Wie sehen andere Planetensysteme aus? Sind sie dem Sonnensystem ähnlich, oder sind sie ganz anders aufgebaut? Die Wirklichkeit überholte all diese Spekulationen, als 1995 in 40 Lichtjahren Entfernung der erste extrasolare Planet entdeckt wurde. Zur großen Überraschung für unsere Zunft hatten die Schweizer Astronomen Michel Mayor und Didier Queloz das Objekt im Orbit um den sonnenähnlichen Stern 51 Pegasi aufgespürt – indem sie bestimmte periodische Schwankungen im Licht des Sterns vermaßten und daraus auf seine Radialgeschwindigkeit schlossen. Denn jeder Trabrant versetzt durch seinen Umlauf auch sein Zentralgestirn etwas in Bewegung: je größer die Masse des Planeten, umso stärker die Verschiebung. Gemäß dem Dopplereffekt verschieben sich im gleichen Takt periodisch die Spektrallinien, die Astronomen im Sternlicht beobachten, ein Maß für die Radialgeschwindigkeit des Sterns. Dieser Effekt verriet ihnen, dass 51 Pegasi von einem Planeten umkreist wird,

genannt 51 Pegasi b. Besonders aufregend fanden die Astronomen, dass sich der Planet, der mindestens 0,47 Jupitermassen aufweist, auf einer engeren Bahn um seinen Zentralstern bewegt als der Merkur um die Sonne – nur mit etwa 0,05 AE Abstand.

Mit der Methode des »Sternwackelns« lassen sich sternnahe und massereiche Planeten einfacher entdecken – so zeigten die Daten für 51 Pegasi b eine periodische Schwankung in der Radialgeschwindigkeit von 56 Metern pro Sekunde. Im Vergleich dazu verursacht die Erde für die Sonne nur eine Bewegung von vier Zentimetern pro Sekunde. Das eigentliche Problem besteht darin, dass es so nahe am Zentralstern weit innerhalb der Schneelinie gar keine Riesenplaneten geben sollte. Aber in kurzer Folge wurden weitere Planeten entdeckt, die Jupiter sogar noch an Masse übertreffen und sich gleichfalls in dieser »verbotenen« Zone befinden. Wegen ihrer Eigenschaften werden sie im Fachjargon auch gerne »Heiße Jupiter« genannt.

Gemäß der gängigen Theorie der Planetenentstehung können sich diese Himmelskörper dort nicht gebildet haben. Stattdessen müssen sie wohl aus den Außenbereichen der Planetensysteme ins Innere eingewandert sein. Ein weiterer Hinweis darauf war die Entdeckung von Planeten, deren Umlaufperioden sich »in Resonanz« befinden. Dabei stehen die jeweiligen Umlaufzeiten von zwei oder mehr beteiligten Himmelskörpern in ganzzahligem Verhältnis zueinander, also etwa 2 : 1 oder 3 : 1. Läuft ein Objekt bei seiner Wanderung in eine solche Resonanz hinein, bleibt es sozusagen darin gefangen, denn das System hält die Konfiguration dynamisch stabil. (Ein Beispiel aus unserer Nähe: Der Mond dreht sich während eines Umlaufs um die Erde genau einmal um die eigene Achse, ein Resonanzverhältnis von 1 : 1.)

Hinzu kam, dass die Planetenjäger jetzt auch Objekte aufspürten, die sich auf extrem exzentrischen Bahnen bewegten, sowie solche, die geneigt zur Ebene anderer Trabanten



Die Massen (in Einheiten der Jupitermasse) der bisher entdeckten Exoplaneten fallen als Funktion des Abstands vom Zentralstern grob in drei Gruppen (zum Vergleich die Planeten des Sonnensystems). Nur wenige haben erdähnliche Masse.

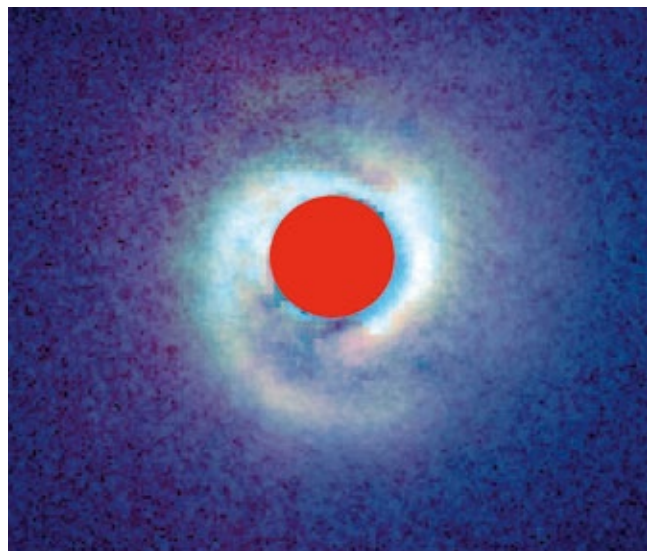
des Systems und sogar gegen die Rotationsrichtung des Zentralsterns kreisten. Solch ungewöhnliches Verhalten lässt darauf schließen, dass hier eine Wechselwirkung mit Begleitsternen oder sogar mit nahe vorbeiziehenden Sternen eine Rolle spielt. Seit 1995 wurden immer exotischere Systeme entdeckt: Planeten, die um enge Doppelsterne kreisen, bis hin zu äußerst kompakt aufgebauten Planetensystemen. Durch die Kepler-Weltraummission, die seit 2009 nach extrasolaren Planeten Ausschau hält, wissen wir zudem, dass die Zahl der Planeten zu kleineren Massen hin deutlich zunimmt. Das gilt zumindest für Planeten mit Umlaufzeiten unter 85 Tagen, die bisher hauptsächlich registriert werden konnten. Damit erwarten wir nicht nur die Existenz vieler erdähnlicher Gesteinsplaneten, vielleicht rückt auch die Entdeckung von außerirdischem Leben in greifbare Nähe.

Wie groß kann die Planetenmasse werden?

Daneben interessieren aber auch weiter vom Zentralstern entfernte Riesenplaneten die Astronomen. Entsprechend setzen sie die modernsten Teleskope auf sie an. Mit Geräten der Zehn-Meter-Klasse nahmen sie junge Sterne auf und konnten den Kontrast zwischen diesen und ihren Begleitern mit Hilfe adaptiver Optik und ausgeklügelter Differenzmessverfahren deutlich verbessern. So glückten direkte Abbildungen von massereichen Riesenplaneten im Abstandsbereich zwischen 8 und 68 AE. Ein faszinierendes Beispiel ist das Planetensystem HR 8799. In 130 Lichtjahren Entfernung umkreisen dort mindestens vier Planeten, die fünf bis zehn Jupitermassen schwer sind, einen jungen, sonnenähnlichen Stern in einem projizierten Abstand von 14 bis 68 AE. (Der gemessene Abstand stellt immer nur die Projektion senkrecht zur Blickrichtung dar.)

Ein Beispiel für einen besonders großen »Super-Jupiter« lieferte Kappa Andromedae b, abgekürzt κ And b. Am japanischen Subaru-Teleskop auf dem Mauna Kea in Hawaii mit seinem 8,2-Meter-Spiegel entdeckte ein Team unter Leitung des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Astronomie dieses erstaunliche Himmelsobjekt. Mit rund 13 Jupitermassen ist es für einen Planeten schon fast zu schwer, aber für einen Stern noch zu klein. κ And b liegt genau im Grenzbereich zwischen Riesenplanet und Braunem Zwerg, der in seinem Zentrum gerade genug Druck und Temperatur erreichen kann, um dort zumindest zeitweise durch Kernfusion Wasserstoff zu Deuterium zu verbrennen.

Neben der Entdeckung von Exoplaneten wollen die Astronomen natürlich wissen, wie alles anfängt: Wie bilden sich die protoplanetaren Scheiben? Welche Masse haben sie? Wie wachsen und formieren sich Planeten aus den winzigen Staubpartikeln und Gasen? Vor gut zwei Jahrzehnten gelang es den Forschern erstmals, einige dieser Prozesse direkt zu beobachten. Als sie zwischen 1980 und 1990 mit den damals neuesten Infrarotdetektoren Gebiete mit jungen Sternen durchmusterten, stießen sie auf viele Himmelskörper, die im Infraroten einen Überschuss an thermischer Strahlung aufweisen. Dieser konnte nur von Staub stammen, der die

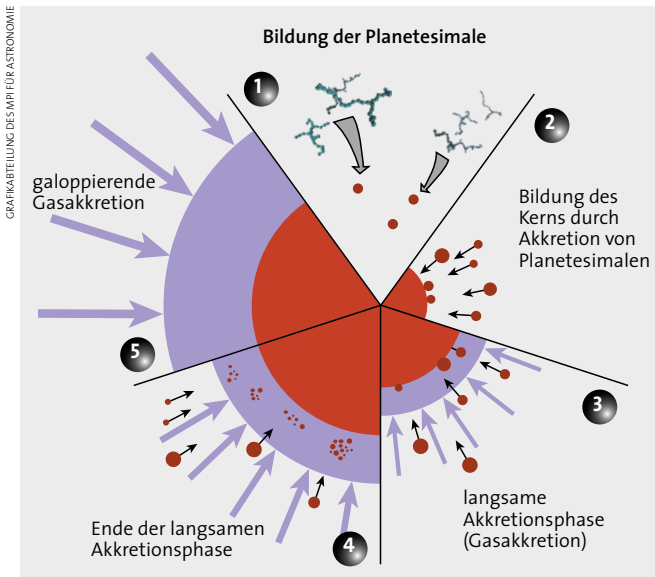


GRADY, C. A., HENNING, T. ET AL.: SPIRAL ARMS IN THE ASYMMETRICALLY ILLUMINATED DISK OF MWC 758 AND CONSTRAINTS ON GIANT PLANETS. IN: ASTROPHYSICAL JOURNAL, 765, 5, 48, 2013, MIT FRIEDRICH VON THOMAS HENNING

Die Scheibe um den jungen Stern Herbig Ae MWC 758, der durch einen Koronografen abgedeckt ist, zeigt asymmetrische Spiralarme. Dort bilden sich gerade Planetesimale und Protoplaneten. Die Aufnahme entstand im Nahinfrarotstreulicht.

Sterne umgibt. Gleichzeitig gelang es mit anderen Teleskopen, die Strahlung der gleichen Objekte im Millimeterbereich zu messen. Die Kombination beider Beobachtungsdaten zeigte, dass es sich dabei tatsächlich nur um sternnahe Staubscheiben handeln konnte. Bei den vergleichsweise langen Wellenlängen im Millimeterbereich werden die Scheiben nämlich auf Grund der optischen Eigenschaften der Staubteilchen durchscheinend. So liefert ihre Strahlung den Forschern ein direktes Maß ihrer Gesamtmasse. Denn jedes Teilchen trägt zur Strahlung bei. Aus ihrem Emissionskoeffizienten lässt sich dann die Gesamtteilchenzahl bestimmen. Kombiniert mit der individuellen Masse der Staubteilchen liefert das die gesamte Staubmasse.

In der Folge konnten Scheiben um verschiedene Typen junger Sterne aufgespürt werden, die Vergleiche mit unserem Sonnensystem nahelegen; so um junge sonnenähnliche Himmelskörper, etwa die so genannten T-Tauri-Sterne. Diese Scheiben besitzen im Schnitt ein Prozent der Masse unserer Sonne, also etwa so viel Materie, wie für die Entstehung unseres Planetensystems nötig war. Auch haben ihre Scheiben deutlich weniger Masse als ihre Zentralsterne, was folgern lässt, dass es sich um Keplerscheiben handelt – die Masse des Zentralsterns dominiert und reguliert die Bewegung des Gases und der Staubteilchen. Wie alt die beobachteten Staubscheiben sind und wie lange sie überhaupt existieren, lässt sich am Alter der Umgebung ablesen, in der die Sterne geboren werden, sowie an der Häufigkeit ihres Auftretens. Das Ergebnis war verblüffend: Ihre Lebensdauer beträgt im Mittel gerade einmal drei Millionen Jahre, ein Lidschlag gemessen an der Lebenszeit etwa der Sonne mit ihren 4,6 Milliarden Jahren. Länger als wenige Millionen Jahre braucht die Natur also offensichtlich nicht, um ein ganzes Planetensys-



In sechs Stufen zum Riesenplaneten: Von mikrometergroßen Staubpartikeln über Planetesimale bis hin zur immer schneller werdenden Gasakkretion auf die festen Kerne entwickeln sich die Gasriesen.

tem zu bauen. An diesem engen Zeitfenster sind schon viele Theorien zur Planetengeburt gescheitert.

Aber nicht nur die Scheiben als solche, auch deren Zusammensetzung und Struktur konnten die Forscher per Infrarotspektroskopie erkennen. Bisher ließen sich gefrorenes Wasser und Kohlenmonoxid nachweisen, außerdem amorphe Silikate und magnesiumreiche kristalline Silikate wie Forsterit und Enstatit. Eine überraschende Entdeckung, denn diese Substanzen waren keineswegs schon vorher im diffusen interstellaren Medium vorhanden. Offenbar entstehen sie erst später in den Staubscheiben selbst. Auch sind die Staubteilchen in den Scheiben mit einigen Mikrometern oft schon größer als diejenigen im interstellaren Medium. Sogar Partikel im Zentimeterformat kommen vor – ein deutliches Indiz dafür, dass sie wachsen, sobald sie in den Scheiben gefangen sind.

Welche Masse haben die beobachteten Scheiben? Ihr Staub sollte, wie erwähnt, nur ein Prozent der Gesamtmasse ausmachen – die festen Partikel emittieren aber mehr Wärmestrahlung und sind daher leichter zu erkennen. Das liegt an der

Physik der Strahlung: Hauptsächlich kreist in den protoplanetaren Scheiben molekularer Wasserstoff; und dieses symmetrische Molekül hat keine erlaubten Rotationsübergänge und verrät sich daher höchstens bei hohen Temperaturen im nahen und mittleren Infraroten mit schwachen Emissionslinien. Deshalb weichen die Beobachter oft auf die zweithäufigste Verbindung aus, das Kohlenmonoxid (CO). Doch diese Moleküle kondensieren bei niedrigen Temperaturen auf den Staubteilchen und können daher an der Oberfläche der Scheiben durch UV-Strahlung zerstört werden. Eine Massebestimmung mit diesem Molekül bleibt sehr ungenau, es eignet sich aber dazu, die Scheibenrotation festzustellen. Unterdessen wurden in den Scheiben um junge Sterne eine Vielzahl weiterer Moleküle registriert, insbesondere im Innenbereich Wasser, OH-Moleküle sowie organische Substanzen wie C_2H_2 und HCN. Offensichtlich agieren diese Gas- und Staubscheiben auch als chemisch aktive Zonen, in denen Stoffe synthetisiert und Staubteilchen prozessiert werden.

Mit den modernen Teleskopen ließen sich unterdessen die lichtschwachen und winzigen Staubscheiben räumlich fein aufgelöst abbilden. Resultat: Oft sind die Scheiben nach außen hin aufgebogen und am Innenrand aufgebläht. Besonders aufregend war die Entdeckung von Scheiben, die innen staubfreie Gebiete und sogar Spiralarme aufweisen, was möglicherweise zeigt, dass hier gerade Planeten entstehen. In der Tat ließen sich in einigen dieser Systeme direkt Kandidaten für sehr junge Planeten ausmachen. Für die Forscher wäre das die Erfüllung eines Traums: einmal hautnah zu verfolgen, wie ein Planet geboren wird.

»Gebt mir Materie, und ich baue daraus eine Welt«

Vorläufig werden die allermeisten Planeten aber nach wie vor um Hauptreihensterne wie die Sonne entdeckt, wo die Suche nicht mehr durch die Aktivität junger Sterne und ihrer Scheiben verdeckt und behindert wird. So kennen wir also die Anfangs- und Endstadien der Planetenentstehung – nur die Phasen dazwischen müssen wir noch mit Modellen überbrücken.

Damit stehen wir am Beginn einer neuen Ära der Planetenforschung – und können noch immer Immanuel Kant folgen: »Gebet mir Materie, und ich will eine Welt daraus bauen.« Staub- und Gasscheiben um junge Sterne ähneln in vielem dem frühen Sonnennebel, auch wenn die gefundenen Himmelsobjekte uns eine große Vielfalt weiterer Möglichkeiten gezeigt haben. In jedem Fall aber müssen es zuerst Staubteilchen im Mikrometerformat schaffen, bis zur Planetengröße von einigen tausend Kilometern anzuwachsen. Das entspricht zwölf Größenordnungen im Durchmesser und sogar 36 Größenordnungen in der Masse. Wie gelingen der Natur diese gewaltigen Sprünge?

Die winzigen Partikel im protoplanetaren Urnebel verbinden sich unterschiedlich eng mit dem Gas – kleinere besser, größere schlechter. Durch Driftbewegungen und Turbulenzen bewegen sie sich relativ zueinander, kollidieren und bleiben aneinander kleben. Diese erste Wachstumsphase geht so

W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema
»Kosmologie« kostenfrei heruntergeladen unter:
www.wissenschaft-schulen.de/zweiteerde

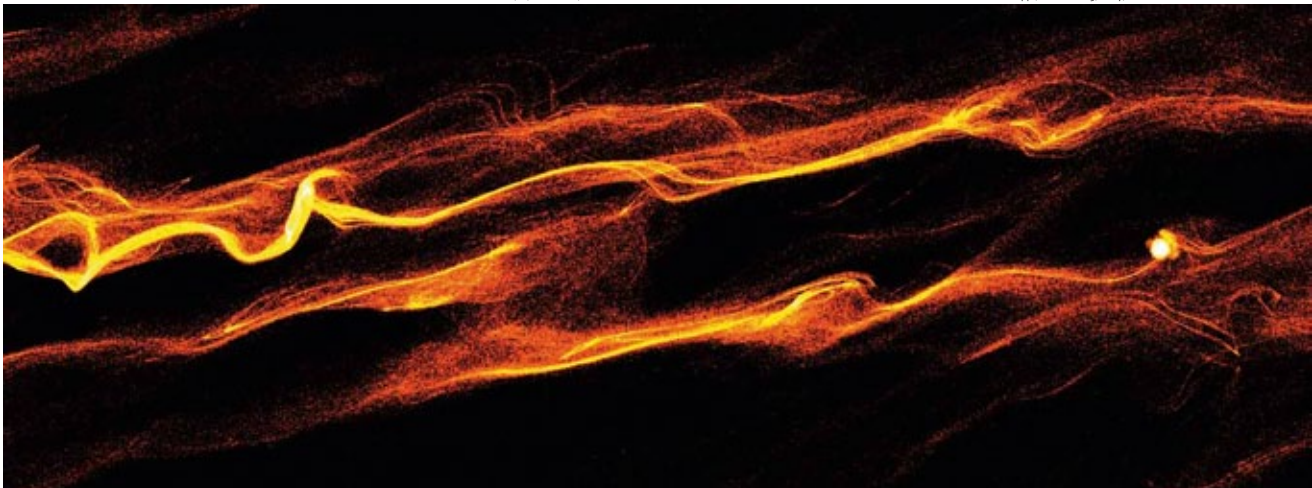
lange gut, bis die Körper etwa Metergröße erreichen – wobei der genaue Wert etwas von ihrer Position in der Scheibe abhängt. Dann trennen sich die Brocken zunehmend vom Gas. Sie erreichen jetzt höhere Relativgeschwindigkeiten, so dass die noch nicht allzu fest zusammengebackenen Gebilde – kaum entstanden – bei Stößen gleich wieder zerbröseln. Gleichzeitig spüren sie einen Gegenwind vom Gas: Während sich die Staubteilchen mit Keplergeschwindigkeit um den Stern bewegen, sind die Gasteilchen auf Grund des thermischen Drucks etwas langsamer und bleiben zurück. Das führt dazu, dass die Staubteilchen in dieser Phase allmählich abgebremst werden und sehr schnell auf einer Spiralbahn in den Stern hineinstürzen – in nur wenigen hundert Jahren.

Der Wachstumsprozess hat hier eine Grenze erreicht, die Forscher auch als Meterbarriere bezeichnen. Sie bereitet vor allem den Theoretikern ziemliches Kopfzerbrechen. Nach den Gesetzen der Physik scheint dem natürlichen Wachs-

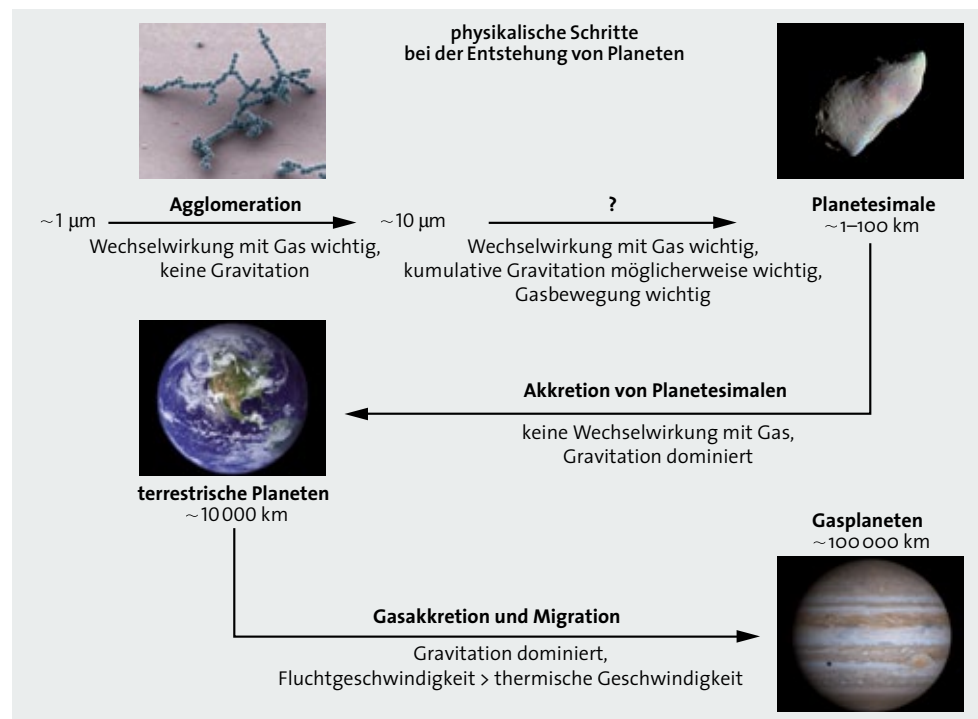
tum hin zu so genannten Planetesimalen Einhalt geboten zu sein – den kilometergroßen Gesteinsbrocken, die für die Entstehung von Planeten eine wichtige Rolle spielen. Die metergroßen Körper regnen aus der Scheibe aus, ähnlich wie Hagelkörner bei einem Gewittersturm, oder werden durch gegenseitige Stöße zerstört. Wie aber kann der Wachstumsprozess stoppen, bevor Planetesimale und Planeten überhaupt entstanden sind? Wo steckt der Denkfehler?

Es muss natürlich einen Ausweg geben, schließlich existieren Planeten. Eine Möglichkeit haben aufwändige magnetohydrodynamische Computersimulationen gezeigt, die wir vor einigen Jahren am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg durchgeführt haben. Demnach können sich Gesteins- und Eisbrocken an manchen Orten in der turbulenten Gasscheibe so stark konzentrieren, dass sie sich über ihre gegenseitige Schwerkraft anziehen und kilometergroße Körper hervorbringen. Ob das schon die Meterbarriere überwin-

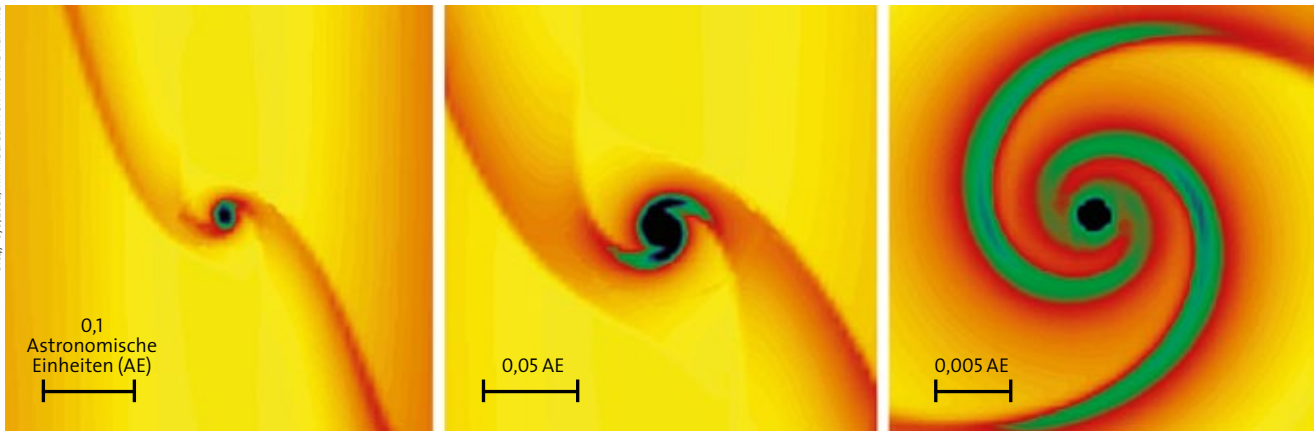
JOHANSEN, A., HENNING, T. ET AL.: RAPID PLANETESIMAL FORMATION IN TURBULENT CIRCUMSTELLAR DISCS. IN: NATURE 448, S. 1022–1025, 2007, MIT FRDL. GEN. VON THOMAS HENNING



Wie Planetesimale, also die Vorläufergebilde der Planeten, entstehen, lässt sich im Computer nachvollziehen (Grafik oben). Diese magnetohydrodynamische Simulation zeigt, wie sich turbulente protoplanetare Scheiben um junge Sterne entwickeln. Das belegt, auf welche Weise sich rund 1000 Kilometer große Planetenbausteine bilden können, die etwa die Masse des Asteroiden Ceres haben. Dieses Objekt ist ein Zwergplanet im Asteroidengürtel, vermutlich ein Überbleibsel einer gescheiterten Planetengeburt.



GRAFIKTEILUNG DES MPPI FÜR ASTRONOMIE, NACH: JÜRGEN BLUM, TU BERLINSCHWEG



Diese drei Bilder aus einer hydrodynamischen Computersimulation zeigen die typischen Spiralmuster, welche die Gezeitenkräfte eines Planeten dem Gasstrom der zirkumstellaren Scheibe aufprägen.

Von links nach rechts blicken wir immer näher in die unmittelbare Umgebung des Planeten. Die Dichte des Scheibengases ist farblich kodiert (gelb: geringere Dichte, grün: höhere Dichte).

det, ist unklar. Wahrscheinlich transportieren die Turbulenzen im Gas eben nicht nur wie vorne beschrieben Massen- und Drehimpuls – Materie nach innen, Drehimpuls nach außen. Mit großer Wahrscheinlichkeit helfen die chaotischen Strömungen dabei, dass kleine Körper sich bei der Meterbarriere nicht wieder selbst zerstören und buchstäblich über sich hinauswachsen können, bis sie zu Planetesimalen geworden sind.

Diese sind dann schon so groß, dass sie sich vollkommen getrennt vom Gas bewegen und allein durch gravitative Wechselwirkung mit anderen Gesteinsbrocken weiter anwachsen. Ihre Masse nimmt so lange zu, bis sie schließlich zu den terrestrischen Planeten oder – falls schwer genug – zu den Kernen von Gas- und Eisriesen geworden sind. Durch ihre erstarkte Schwerkraft sammeln die massereichen Kerne weiter Gas aus der Umgebung auf und bilden so unter anderem Planeten wie Jupiter und Neptun, die große Gashüllen haben. Diesen Prozess bezeichnen die Forscher auch als Kernakkretionsbild der Planetenentstehung.

Wo steht die Forschung heute? Gut kennen wir inzwischen aus den direkten Beobachtungen das anfängliche Wachstum, die großräumige Struktur der Scheiben sowie natürlich die entstandenen Planetensysteme selbst. Doch unklar bleiben weiterhin der genaue Ablauf der Gasakkre-

tion sowie die damit verbundenen Zeitabläufe. Rätselhaft bleibt vorläufig ebenfalls, warum Riesenplaneten überhaupt im Inneren von Planetensystemen vorkommen. Wie konnten sie so nahe an ihre Muttersterne gelangen, fern von ihrem mutmaßlichen Entstehungsort? Weitere offene Fragen lauten: Warum sind viele Planeten in Resonanzen gefangen? Warum sehen wir so viele von ihnen, anders als in unserem System, auf hochexzentrischen Bahnen?

Bewegt sich der Planet bei seiner Entstehung noch in einer Gasscheibe, da diese noch nicht aufgebraucht oder verdampft ist, dann beeinflussen sich beide gegenseitig. Der große Körper reibt sich gewissermaßen an dem Scheibenmaterial und pflügt sich seine Bahn. Die Folge: Der Planet beginnt zu wandern. Die Geschwindigkeit, mit der er nach innen oder bisweilen auch nach außen abdriftet, hängt in komplizierter Weise von mehreren Faktoren ab – seiner eigenen Masse sowie von Dichte, Turbulenz und Thermodynamik der zirkumstellaren Scheibe. Massereiche Planeten können dabei Lücken in die Scheibe reißen. Dieses Phänomen wollen Beobachter nutzen, um direkte Hinweise auf den raffinierten Prozess zu gewinnen.

Gewagter Sprung über die Meterbarriere

Die Migration eines offensichtlich deplatzierten Planeten können auch weitere Faktoren beeinflussen: andere Planeten, nahe stellare Begleiter, vorbeifliegende Sterne oder die jeweiligen Kuipergürtel, wo Myriaden kleiner Objekte in ringförmigen Wolken das Planetensystem einhüllen. Auch wenn das Gas der Scheibe bereits beseitigt ist, kann es noch viel dynamischer zugehen, als wir dies von unserem heutigen stabilen Planetensystem gewohnt sind. Aus den Frühphasen unseres Sonnensystems kennen wir Phasen starken Bombardements der terrestrischen Planeten und des Mondes sowie Positionsänderungen der äußeren Planeten; auch im frühen Sonnensystem ging es deutlich dynamischer als heute zu.

Es gibt nach heutigem Stand noch einen zweiten Ansatz, wie Planeten trotz der Meterbarriere entstehen. Das Schöne daran ist: Er trägt auch dazu bei, die unerwarteten Orte mancher Exoplaneten zu erklären. In einer massereichen Scheibe können die äußeren Gebiete so weit abkühlen, dass die Scheibe unter ihrem Eigengewicht abschnittsweise kollabiert und



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Kosmologie« finden Sie unter
www.spektrum.de/kosmologie

Sky-Watcher®

**DAY &
NIGHT**
series



HERITAGE-114P VIRTUOSO™

114mm (4.5") f/500 Auto-Tracking parabolischer Newton.
Exzellentes Allround Teleskop für die Mond-, Planeten-
und Deep-Sky Beobachtung.

Lieferumfang:

10mm & 25mm Okulare, Red-Dot Finder, 90° Kameraadapter,
Canon-EOS Auslösekabel, Virtuoso™ Multi-Function Mount.



HERITAGE-90 VIRTUOSO™

90mm (3.5") f/1250 Auto-Tracking Maksutov-Cassegrain
Ideal für die Mond-, Planeten- und Doppelsternbeobachtung,
sowie für die hochauflösende Beobachtung bei Tage.

Lieferumfang:

10mm & 25mm Okulare, Red-Dot Finder, 90° Kameraadapter,
Canon-EOS Auslösekabel, Virtuoso™ Multi-Function Mount.



VIRTUOSO™ MULTI-FUNCTION COMPUTERISED MOUNT

Astronomische Funktionen:

- automatische Nachführung von astronomischen Objekten (Sternengeschwindigkeit)
- leise Positionierung in 5 Geschwindigkeiten: 8x, 16x, 64x, 400x & >2000x
- enthält die patentierte 'Freedom-Find' Duale-Encoder Technologie, erlaubt manuelle Schwenks in beiden Achsen ohne Verlust der Positionsdaten
- erweiterbar mit optional erhältlicher Go-To Synscan AZ Handbox & Kabel

Fotografische Funktionen:

- "Camera Cruising": nehmen Sie automatisch Fotos mit Ihrer DSLR in bis zu 6 vorprogrammierten Positionen auf
- "Video Cruising" (Zeitrafferaufnahmen): nehmen Sie automatisch Filmsequenzen mit Ihrer Videokamera in bis zu 6 vorprogrammierten Positionen auf
- Panorama-/Matrix-Fotografie: Steuert Ihre DSLR für die Aufnahme von Panoramabildern bis zu 360°

www.optical-vision.de



Optical Vision Ltd - UK
Vertretungsbüro & Warenlager
Duracher Str. 11
D- 87437 Kempten

Tel: +49 (0)831 - 697 28 82 - 10
Fax: +49 (0)831 - 697 28 82 - 20
eMail: info@optical-vision.de
www.optical-vision.de



sich so in Teilstücke zerlegt – ein Prozess, der viel Ähnlichkeit hat mit der Fragmentierung eines Molekülwolkenkerns, bei der Sterne entstehen. Damit erhalten protoplanetare Objekte eine enorme Starthilfe. Sie wachsen viel schneller, als wenn sie ihr Wachstum allein mit mikroskopischen Staubteilchen bestreiten müssten. Wie Berechnungen zeigen, dauert diese »Abkürzung« nur wenige hundert statt Millionen von Jahren. Zwei Bedingungen müssen dafür erfüllt sein:

- Die Scheiben müssen genügend Masse haben, so dass ihre Eigengravitation den thermischen Gasdruck überwinden kann. Das wäre nicht ungewöhnlich – Scheiben um junge Sterne treten in ganz unterschiedlichen Massen und Größen auf.
- Die beim Kollaps freigesetzte Energie muss schnell genug abgestrahlt werden. Erst dann können die Fragmente kontrahieren, statt von den Gezeitenkräften des Zentralsterns zerrissen zu werden. Das klappt freilich nur, wenn das Scheibengas für die Wärmestrahlung auch hinreichend transparent, also nicht zu dicht ist: Nur ein dünnes Gas kühlt schnell genug ab.

In engen Bahnen um einen Zentralstern – etwa bis zum Abstand vom Jupiter zur Sonne – sind diese Bedingungen nicht erfüllt. In solchen Zonen entstehen Planeten wie beschrieben durch Kernakkretion. Doch für die äußeren Planeten um HR 8799 und Kappa Andromedae b lässt der schnelle Gravitationskollaps auch Objekte weiter außen entstehen. So hätten sich die äußeren Planeten von HR 8799 durch Scheibenfragmentierung vielleicht bei etwa 40 AE gebildet und wären danach durch Umlenkungen auf ihre jetzigen Bahnen gelangt. Vermutlich entstehen Exoplaneten durch zwei sehr verschiedene Mechanismen – ein Verständnis, das sich erst in den letzten Jahren durchgesetzt hat.

Bisher haben die Astronomen über 800 Exoplaneten aufgespürt. Mit dieser Population können die Theoretiker bereits systematischer untersuchen, wie sich die Anfangsbedingungen auswirken, also etwa die Scheibenmassen, der Anteil an schweren Elementen und die diversen Migrationswege. Von diesen Startwerten hängen die Eigenschaften der jungen Planeten und ihrer Bahnen ab. Erste Untersuchungen hierzu haben uns bereits eine bessere physikalische Be-

schreibung des Wanderungsprozesses ermöglicht. In Zukunft wollen wir die Planetenentstehung mit der Entwicklung ihrer Struktur und ihrer Atmosphären verknüpfen.

Ob uns das gelingt, hängt wesentlich von den neuen Superteleskopen ab, die demnächst das Weltall nach weiteren Planetensystemen durchforsten werden. Viel versprechen wir uns von der Spektroskopie von Planetenatmosphären; sie könnte uns etwas über den Entstehungsort innerhalb einer Scheibe verraten. Die Teleskope der nahen Zukunft werden geradezu als Planetensuchmaschinen entwickelt. Mit verbesserter adaptiver Optik werden sie Planeten direkt abbilden und die Zusammensetzung ihrer Atmosphären entschlüsseln. Auch die Transitspektroskopie – die Messung von Planetenspektren während des Vorbeigangs von Planeten vor oder hinter den Sternen – wird uns weiter Aufschluss geben.

Im Februar 2013 begann für Planetenforscher bereits eine neue Zeit. In Chile ging das Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) in Betrieb, ein Interferometer, das aus mehreren Dutzend Einzelteleskopen besteht und sich auf einer Hochebene in 5000 Metern befindet. ALMA wird uns in den kommenden Jahren zweifellos detaillierte räumliche Daten über die Geburt von Planeten liefern – über Scheibenlücken, Spiralarme, die chemische Zusammensetzung sowie das Wachstum der Staubteilchen. Besonders aufregend wäre es, einmal direkt einen jungen, noch Materie auf sammelnden Planeten zu beobachten. Wenn nicht mit ALMA, dann gelingt dies vielleicht mit einem Instrument der nächsten Generation am geplanten European Extremely Large Telescope (E-ELT). Es soll in der nächsten Dekade in Betrieb gehen. ~

DER AUTOR



Thomas Henning hat in Greifswald Physik studiert und an der Universität Jena in Astrophysik promoviert und habilitiert. Er ist heute Direktor am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und leitet dort die Abteilung »Planetensystem- und Sternentstehung«. Gleichzeitig ist er Honorarprofessor an der Universität Heidelberg und Professor für Astrophysik an der Universität Jena.

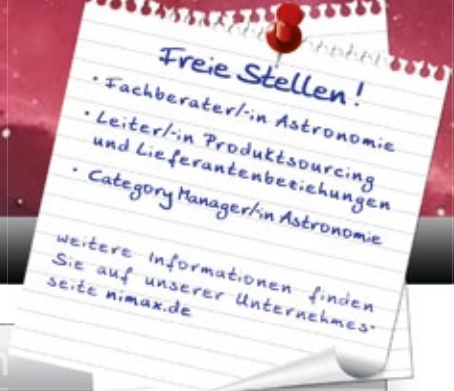
Wissenschaftlich arbeitet er vor allem über Planeten- und Sternentstehung, extrasolare Planeten sowie das interstellare Medium.

QUELLEN

- d'Angelo, G. et al.:** Nested-Grid Calculations of Disk-Planet Interaction. In: *Astronomy & Astrophysics* 385, S. 647–670, 2002
- Flock, M. et al.:** Turbulence and Steady Flows in Three-Dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks. In: *The Astrophysical Journal* 735, 122, 2011
- Grady, C.A. et al.:** Spiral Arms in the Asymmetrically Illuminated Disk of MWC 785 and Constraints of Giant Planet Formation. In: *The Astrophysical Journal* 762, 48, 2013
- Johansen, A. et al.:** Rapid Planetesimal Formation in Turbulent Circumstellar Disks. In: *Nature* 448, S. 1022–1025, 2007

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192452



Teleskope und Ferngläser

■ Omegon Einsteigerteleskope

Die Teleskope von Omegon sind gerade für den Einstieg in die Astronomie besonders zu empfehlen. Unsere Marke Omegon steht für ausgewählte Produkte und geprüfte Qualität zum kleinen Preis, oft günstiger als vergleichbare Modelle anderer Marken.



	Artikel-Nr.	Preis
¹	60/700 AZ-1	11267 69,90 statt 79,-
²	114/900 EQ-1	11266 159,-
³	130/920 EQ-2	13762 199,-
⁴	150/750 EQ-4	22465 349,-

■ Omegon Nightstar 20x80

Ein sehr schönes Fernglas, mit hoher Auflösung. Mit 80mm Öffnung sammelt es fast 20% mehr Licht als eine 70mm Öffnung. Erkennen Sie mehr Himmelsobjekte und entdecken somit weit entfernt liegende Galaxien und Einzelsterne. Nicht selbstverständlich ist eine volle Multivergütung auf allen optischen Flächen, aber bei dem 20x80 ist auch dies gegeben. Damit haben Sie eine hervorragende Bildhelligkeit bei hohem Kontrast.



Artikel-Nr.: 12461 Preis: 129,-

■ Omegon Nightstar 25x100 mit Tasche

Das Omegon Nightstar 25x100 ist ein leistungsfähiges Großfernglas für Naturbeobachtungen und ein lichtstarkes Instrument für astronomische Übersichtsbeobachtungen. Es eignet sich aufgrund der eingebauten Filtergewinde auch ausgezeichnet für großflächige Nebelregionen. Es bietet mit 4mm Austrittspupille auch dem Naturbeobachter bei zunehmender Dämmerung eine helle und kontrastreiche Abbildung. Durch überdimensionierte BaK-4 Prismen ist eine große Ausleuchtung gewährleistet.



Artikel-Nr.: 14698 Preis: 299,-

Empfehlungen

■ Kosmos Himmelsjahr 2013

Dieses Jahrbuch beinhaltet alle Mondphasen, einen monatlichen Überblick von Planeten, Sternbildern und besondere Ereignisse am Firmament sowie Berichte über astronomische Phänomene und die Rätsel des Weltalls.



Artikel-Nr.: 25453 Preis: 16,99

■ Oculum Verlag Fernrohr Führerschein in 4 Schritten

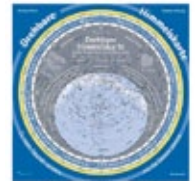
Dieses Buch bringt anfangersfreundlich alle Antworten auf Fragen rund um die Optik, Mechanik und Benutzung eines astronomischen Teleskops. Erstmals wurden alle wichtigen Definitionen und Formeln zur Fernrohrtechnik zusammengefasst.



Artikel-Nr.: 1486 Preis: 16,90

■ Oculum Verlag Drehbare Himmelskarte

Diese drehbare Sternkarte ist ein Basis-Instrument für das Hobby Astronomie. Hiermit lernen Sie umfassend den kompletten Sternhimmel kennen.



Artikel-Nr.: 4893 Preis: 14,90

■ Sega Toys Homestar Planetarium

Holen Sie sich 60.000 funkelnde Sterne vom Himmel an Ihre Zimmerdecke. Stellen Sie sich vor Sie könnten den Sternenhimmel beobachten während Sie bequem auf der Couch sitzen. Mit Homestar, dem hochauflösenden 3 Watt LED Heimplanetarium mit Rotationsbewegung, das das Bild des Himmelsgewölbes dem Jahresverlauf getreu wiedergibt, wird dieser Traum Wirklichkeit.



Artikel-Nr.: 26925 Preis: 119,-

Persönliche Beratung

@ Service@Astroshop.de

+49 8191 94049-1

+49 8191 94049-9

Astroshop.de
c/o nimax GmbH
Otto-Lilienthal-Str. 9
86899 Landsberg am Lech
Direkt an der A96 und B17,
ca. 30min von Augsburg
und München.

Damit wir uns genug Zeit für Sie nehmen können, rufen Sie bitte immer vor Ihrem Besuch bei uns an und vereinbaren einen Termin. >>Danke<<

Wir sind Mo-Fr von 9-17 Uhr und jeden 1. Sa im Monat von 10-16 Uhr für Sie da!

Der Cappuccino-Effekt

Luftbläschen in einer schwingenden Flüssigkeitssäule verändern die entstehenden Töne unerwartet stark.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Kommt der Milchschaum auf dem servierten Cappuccino als kleines Kunstwerk daher, trinkt auch das Auge mit. Dem Ohr wird ebenfalls einiges geboten. Was zuerst auffällt, ist das leise Kling-Klang des Löffels, der beim Umrühren gegen die Tassenwand stößt. Doch das ist nichts gegen den Cappuccino-Effekt. So altbekannt das Phänomen ist, so überraschend wirkt es auf denjenigen, der es gerade erst entdeckt. Er muss nur auf die Idee gekommen sein, den Löffel, mit dem er kurz zuvor den Milchschaum in den Cappuccino gerührt hat, mehrere Male leicht gegen die Tasse zu schlagen. Dann steigt bei jedem Schlag unüberhörbar der Ton an, als kletterte er eine Tonleiter hinauf.

Das ist nicht nur bei Kaffee der Fall. Vom »hot chocolate effect« sprach etwa Frank Crawford, der 1982 die erste elementare physikalische Abhandlung darüber verfasste. Die merkwürdige Tonhöhenzunahme registrierte der Physiker der University of California in Berkeley auch, nachdem er Pulverkaffee oder Kakao in heißes Wasser gerührt oder heißes Wasser aus dem Hahn in

ein Glas gefüllt hatte. Mit Brausetabletten funktioniert der Effekt ebenfalls, und selbst Bier und andere kohlen-säurehaltige Getränke lassen die Töne steigen – am eindrucksvollsten dann, wenn man Sand oder Salz hineinstreut.

Der Cappuccino-Effekt hat offensichtlich etwas mit den aus dem Getränk entweichenden Luft- oder allgemeiner Gasblasen zu tun. Rührt man Schaumbläschen unter den Kaffee und schlägt dann mit dem Löffel von außen gegen das Trinkgefäß, nimmt die Tonhöhe so lange zu, wie die Blasen aus dem Getränk aufsteigen. Weil Cappuccino relativ stabilen Schaum bildet und sich der größere Teil davon bald wieder an der Oberfläche sammelt, lässt sich der Effekt sogar viele Male wiederholen. Als wäre der Kaffee wie eine Spieluhr aufgezogen worden, beginnt das Spiel nach jedem Umrühren von vorn.

Doch was genau wird hier gespielt? Einer der weniger offensichtlichen Aspekte des Geschehens betrifft die Entstehung des Klangs. Schlägt man seitlich an das Gefäß, sind die mechanisch-akustischen Verhältnisse ziem-

lich kompliziert. Neben der Füllhöhe tragen in diesem Fall auch komplexe Biegeschwingungen zum Klang bei, die von Form und Material des Trinkgefäßes bestimmt werden.

Erleichtern wir uns also die Untersuchung, indem wir einen Spezialfall prüfen: ein volles, möglichst zylindrisches Glas, gegen das wir von unten schlagen. Dann bestimmt vor allem die schwingende Flüssigkeitssäule das Klanggeschehen. Da die Schallgeschwindigkeit in Wasser (1500 Meter pro Sekunde) die in Luft (340 Meter) um mehr als das Vierfache übertrifft und sich die Tonhöhe als Frequenz $f = \text{Schallgeschwindigkeit } v / \text{Wellenlänge } \lambda$ berechnet, klingt ein mit Wasser gefülltes Glas mehr als viermal so hoch wie ein »leeres«, also luftgefülltes.

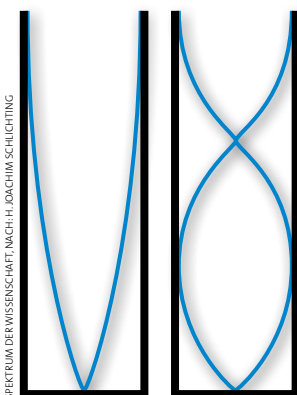
Anstieg um mehrere Oktaven

Die Formel verrät auch, dass ein niedrigeres Glas noch höhere Töne erklingen lässt. Die Grundschwingung der Flüssigkeitssäule ist eine stehende Welle mit einem Schwingungsknoten am geschlossenen unteren Ende und einem Schwingungsbauch am offenen oberen Ende des Glases; ihre Wellenlänge beträgt gerade das Vierfache der Säulenhöhe (Grafik links). Sinkt die Höhe des Glasrands, sinkt auch die Wellenlänge λ , dafür steigt die Frequenz f .

Derart vorbereitet können wir nun unser eigenes Experiment angehen. Greifen wir zum Kaffeelöffel oder zu Brausetabletten und erzeugen eine Melange aus viel Wasser und wenig Luft. Dann klopfen wir mit dem Löffel

Du lebst in einem klingenden Weltall,
wo alles Rhythmus, Klang, Takt und Akkord ist:
... die großen natürlichen Geräusche, der künstliche Lärm ...
umgeben dich wie ein zitterndes und verwickeltes Tongewebe,
das du unaufhörlich zu lesen und zu unterscheiden versuchst.

Georges Duhamel (1884–1966)



Betrachtet man ein gefülltes Wasserglas und vernachlässigt dessen seitliche Biegeschwingungen, so schwingt die Wassersäule als stehende Welle. Links außen ist die Grundschwingung gezeigt, mit einem Schwingungsknoten am geschlossenen Boden und einem Schwingungsbauch am offenen Ende; die Wellenlänge beträgt das Vierfache der Säulenhöhe. Daneben ist die erste Oberschwingung zu sehen.

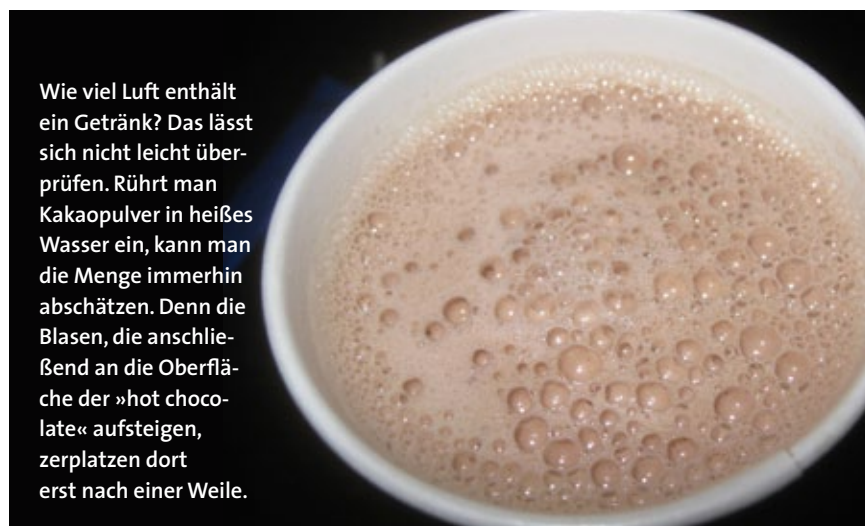


Alles ist bereit für den Cappuccino-Effekt. Jetzt müssen Sie nur noch den Milchschaum unterrühren und anschließend mit dem Löffel mehrfach gegen die Tasse klopfen. Bei jedem Schlag klettert der entstehende Ton dann ein Stück auf der Tonleiter empor.

an das Glas. Mit welchem Ergebnis ist zu rechnen? Weil wir dem Wasser Luft zugefügt haben, also ein Medium mit niedriger Schallgeschwindigkeit, erwarten wir, dass die Tonhöhe niedriger ist als im Fall einer reinen Wassersäule. Allerdings nicht viel niedriger, denn die Luftmenge ist ja sehr klein.

Doch dann stellen wir beim Klopfen völlig überrascht fest, dass die Tonhöhe gleich um mehrere Oktaven steigt, während die Luft allmählich wieder entweicht! Das Einrühren von Luft muss sie also zuvor in genau diesem Maß erniedrigt haben.

Wie ist das möglich? Tatsächlich ist die Schallgeschwindigkeit in Luft für diesen Effekt fast völlig ohne Belang. Die Schallgeschwindigkeit in einem Medium hängt nämlich von (mindestens) zwei voneinander unabhängigen Parametern ab: Sie sinkt nicht nur mit steigender Dichte des Mediums, sondern auch mit dessen zunehmender Kompressibilität, also seiner »Zusammendrückbarkeit«. Dass es nicht allein auf die Dichte ankommen kann, haben wir ja schon daran gesehen, dass die Schallgeschwindigkeit in Wasser höher ist als die in Luft.



Wie viel Luft enthält ein Getränk? Das lässt sich nicht leicht überprüfen. Rührt man Kakaopulver in heißes Wasser ein, kann man die Menge immerhin abschätzen. Denn die Blasen, die anschließend an die Oberfläche der »hot chocolate« aufsteigen, zerplatzen dort erst nach einer Weile.

Entscheidend ist in unserem Fall die Kompressibilität. Im Wasser pflanzt sich Schall deshalb sehr schnell fort, weil seine hohe Dichte durch seine extrem geringe Kompressibilität weit mehr als ausgeglichen wird. Umgekehrt verringern die Luftbläschen in unserem Experiment zwar die Dichte der Wassersäule ein wenig; gleichzeitig erhöhen sie aber ihre Kompressibilität sehr stark und senken dadurch die Schallgeschwindigkeit und mit ihr die Frequenz.

Frank Crawford hat übrigens auch mit einem inversen Cappuccino-Effekt experimentiert. Er drehte den Heißwasserhahn auf und wartete, bis nicht mehr kaltes, sondern heißes Wasser daraus floss. In letzterem löst sich Luft schlechter. Sie beginnt also in Form von Bläschen zu entweichen, sobald das Wasser nicht mehr unter dem höheren Druck in der Wasserleitung steht. Genau in diesem Moment befüllte Crawford sein Glas und brachte es zum Klingen.

Dabei musste er sich allerdings beeilen, denn die sinkende Tonhöhe ist nur während einer kurzen Zeitspanne zu hören: Die Bläschenbildung dauert genau so lange, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat. Kommt sie zum Erliegen, erklingt wieder der ganz normale Cappuccino-Effekt. ☺

DER AUTOR



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

QUELLE

Crawford, F.S.: The Hot Chocolate Effect. In: American Journal of Physics 50, S. 398–404, 1982

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192458

Die doppelte Magie des Zinn-100

Wie sich Protonen und Neutronen in Atomkernen anordnen, ist noch längst nicht genau bekannt. Wer ihren Geheimnissen auf die Spur kommen will, braucht einen großen Beschleuniger sowie Atomkerne mit »magischen« Eigenschaften, die aus einer bestimmten Anzahl von Kernteilchen bestehen.

Von Thomas Faestermann

Die Erfolgsmeldungen aus der Physik klingen zuweilen, als ginge es den Forschern nur noch um die ganz großen Fragen: die Entstehung des Universums, die Struktur von Raum und Zeit, die fundamentalen Bausteine der Materie. Andere Gebiete scheinen hingegen längst bekannt und gut verstanden. So ist es inzwischen Schulwissen, dass Atomkerne aus Protonen und Neutronen bestehen und diese aus noch winzigeren Quarks, die ihrerseits durch Gluonen zusammengehalten werden. Selbst über eine noch grundlegendere Substruktur der Quarks machen sich Forscher Gedanken.

Doch manchmal trügt der Schein. Selbst auf bekanntem Terrain sind manche fundamentale Fragen keineswegs gänzlich beantwortet. Eine davon ist die nach der genauen Struktur der Atomkerne. Zwar lassen sich die Eigenschaften sehr leichter Kerne bereits bis in feine Details berechnen. Aber von einem Modell, das auch schwere Kerne gut beschreibt, sind wir selbst heute noch ein gutes Stück entfernt.

Spätestens seit James Chadwick 1932 das Neutron als dritten Bestandteil des Atoms neben Proton und Elektron entdeckte, steht die Frage im Raum: Wie verteilen sich die Nukleonen, also Neutronen und Protonen, im Atomkern? Anfang

der 1930er Jahre entwickelte George Gamow in Leningrad die Grundidee des Tröpfchenmodells. Diesem zufolge hat der Atomkern Ähnlichkeit mit einer Flüssigkeit: Man kann ihn wie einen Wassertropfen verformen, aber er nimmt stets denselben Raum ein. Jedes Proton oder Neutron in einem solchen Tropfen übt eine stark anziehende Kraft auf seine unmittelbaren Nachbarn aus. Die Reichweite dieser so genannten starken Kernkraft ist jedoch sehr kurz, so dass weiter entfernte Nukleonen schon nichts mehr von ihr spüren.

Gamow musste auch erklären, warum der Kern trotz der Abstoßung zwischen den elektrisch positiv geladenen Protonen nicht einfach auseinanderbricht. Diese Abstoßung ist schwächer als die starke Kernkraft, reicht dafür aber über den jeweiligen direkten Nachbarn hinaus. Er kam zu dem Ergebnis, dass erst bei etwa 100 oder mehr Protonen im Kern die elektrische Abstoßung überwiegen würde und der Kern nicht mehr stabil wäre. Das stimmt mit den Beobachtungen in der Natur überein, in der wir keine stabilen Atome mit solch hohen Ordnungszahlen vorfinden. Das schwerste natürlich vorkommende Element ist Uran mit 92 Protonen; die massereichsten bisher synthetisierten Atomkerne haben sogar 118 Protonen, zerfallen allerdings nach Bruchteilen von Sekunden schon wieder.

Das Tröpfchenmodell sagte viele Messwerte gut voraus. Eines konnte es aber nicht erklären: die so genannten magischen Zahlen. Im Verlauf der 1940er Jahre zeigte sich nämlich, dass die Nukleonen besonders stark »zusammenkleben«, wenn die Zahl der Protonen im Kern die Werte 2, 8, 20, 28, 50 und 82 annimmt. Dasselbe gilt für Neutronen, nur dass hier zusätzlich die magische Zahl 126 hinzukommt. Noch stabiler sind Kerne, bei denen sowohl die Protonen- als auch die Neutronenzahl magisch sind und die man deshalb als »doppelt magisch« bezeichnet – wie zum Beispiel Blei-208 mit 82 Protonen und 126 Neutronen.

Diese Beobachtung erinnerte die Physiker an ein anderes Phänomen, die Elektronenhülle von Atomen. Schon 1913 hat-

AUF EINEN BLICK

IM INNEREN DES ATOMKERNS

1 Die Eigenschaften leichter Atomkerne lassen sich bereits bis in feine Details berechnen. **Schwere Kerne aus vielen Nukleonen** vermögen bisherige Theorien aber nicht gut zu beschreiben.

2 Abhilfe können aufwändige **Messungen** an schweren Atomkernen mit »magischen« **Nukleonenzahlen** schaffen. Sie helfen den Theoretikern, ihre Modelle weiter auszuarbeiten.

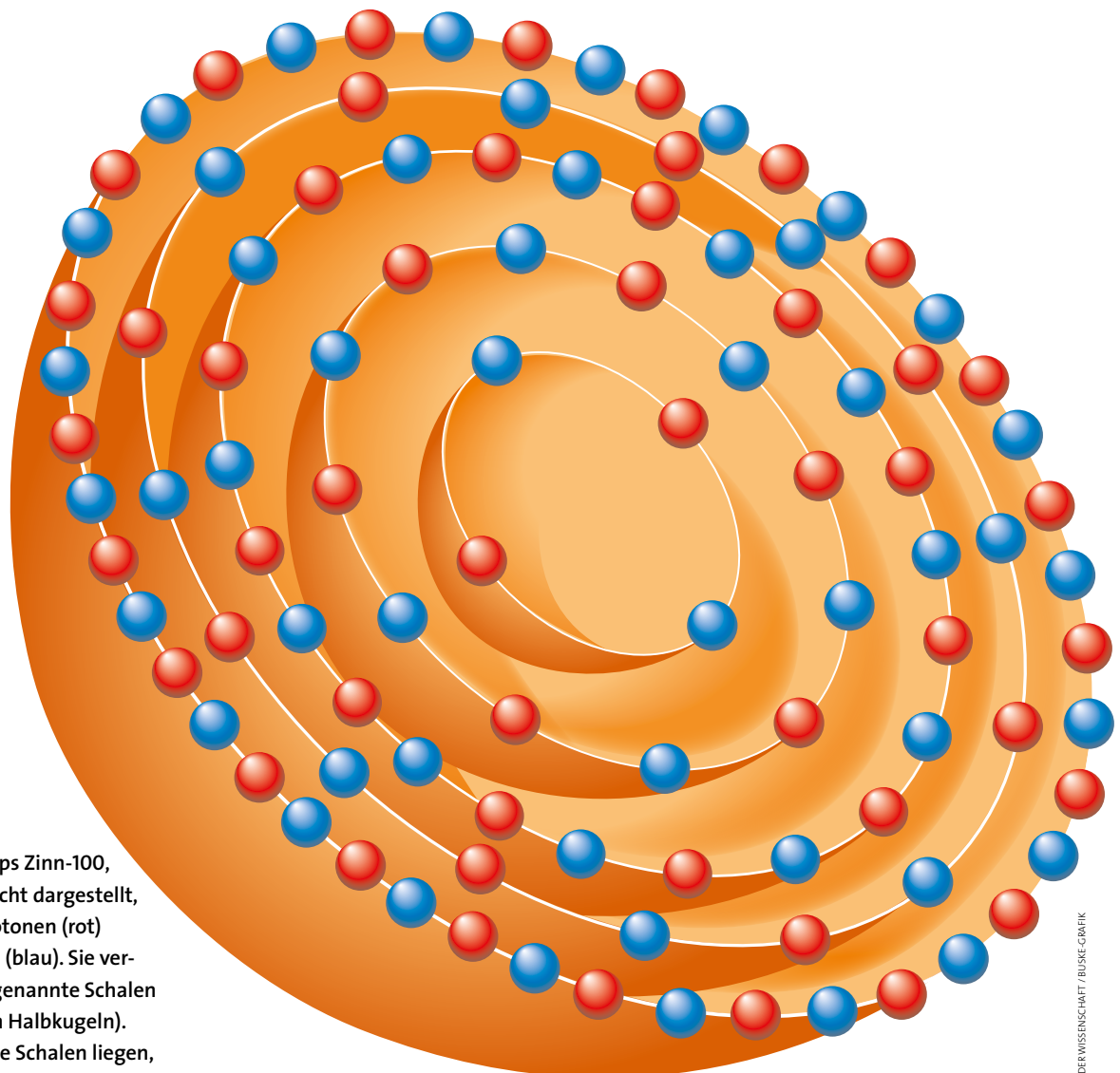
3 »Magisch« sind Kerne dann, wenn sie – wie der **Kern des Isotops Zinn-100** – bestimmte Zahlen von Protonen und Neutronen und deshalb besondere Eigenschaften besitzen.

te Niels Bohr die Idee, dass man sich die Elektronen in Schalen um den Atomkern angeordnet vorstellen kann. Konfigurationen mit komplett gefüllten Schalen, nämlich die Edelgase, sind dabei besonders stabil. Anders gesagt, um einer solchen Konfiguration ein Elektron zu entreißen, braucht es besonders viel Energie. Auch in der Elektronenhülle gibt es »magische« Zahlen, allerdings etwas andere als im Kern: 2, 8, 18, 36, 54, 86.

Tatsächlich kann man sich auch Protonen und Neutronen im Atomkern als in Schalen angeordnet vorstellen – für jede Teilchenart eigene, die jeweils eine bestimmte Zahl von Teilchen aufnehmen können. Jede Schale wiederum ist durch eine bestimmte Energie gekennzeichnet, die nach außen hin abnimmt. Befindet sich der Atomkern in seinem energetisch niedrigsten Zustand, sind alle verfügbaren Schalenplätze von innen nach außen, von hohen zu niedrigen Energien, bis

zur Gesamtzahl der Nukleonen aufgefüllt. Die Teilchen in näher am Zentrum gelegenen Schalen sind dabei stärker gebunden als die in äußeren Schalen. Die Ähnlichkeit zwischen Elektronen- und Kernschalen ist allerdings begrenzt. Zum einen wirkt die starke Kernkraft – über deren Abstandsabhängigkeit damals noch wenig bekannt war – im Wesentlichen zwischen jeweils zwei Nukleonen, während sämtliche Elektronen in der Elektronenhülle die Anziehung einer praktisch punktförmigen Ladung im Zentrum des Atoms spüren. Zum anderen existieren im Kern, anders als in der Hülle, zwei verschiedene Teilchenarten.

Die magischen Zahlen konnte allerdings auch Bohrs Modell noch nicht erklären. Dies gelang erst in den Jahren 1948 und 1949 unabhängig voneinander Maria Goeppert Mayer in Chicago sowie einer Arbeitsgruppe um Hans Jensen in Heidelberg. Ihre Lösung des Problems, für die sie 1963 gemein-



Der Kern des Isotops Zinn-100, hier stark vereinfacht dargestellt, besteht aus 50 Protonen (rot) und 50 Neutronen (blau). Sie verteilen sich auf so genannte Schalen (angedeutet durch Halbkugeln). Je weiter außen die Schalen liegen, desto geringer ist die Bindungsenergie der Nukleonen.

Der Atomkern von A über N bis Z

Kernphysiker bezeichnen die Anzahl der Protonen im Kern mit Z , die der Neutronen mit N . Die Protonenzahl Z gibt auch die Gesamtladung des Kerns und damit das chemische Element an. Für die Gesamtzahl der Nukleonen (Protonen und Neutronen) ist der Buchstabe A üblich, wobei A sich aus $Z+N$ errechnet. Die ausführliche Notation für einen Atomkern lautet ${}^A_Z E_N$, aber schon die vereinfachte Notation ${}^A E$ oder die verbreitete Schreibweise E - A benennt ihn eindeutig. E ist dabei das Symbol des chemischen Elements. Ein ${}^{100}_{50}\text{Sn}_{50}$ -Kern, kurz ${}^{100}\text{Sn}$ oder Zinn-100, besteht dem zufolge aus 50 Neutronen und 50 Protonen, insgesamt 100 Nukleonen.

sam den Nobelpreis erhielten, hat mit dem Drehimpuls der Nukleonen zu tun, der aus zwei Komponenten besteht: dem Spin und dem Bahndrehimpuls. Der Spin ist der Eigendrehimpuls, den fast alle Teilchen besitzen; darin ähneln sie einem rotierenden Kreisel. Zusätzlich besitzen die Nukleonen einen Bahndrehimpuls, weil sie sich auf Bahnen um den Mittelpunkt des Kerns bewegen. Spin- und Bahndrehimpuls – abgekürzt mit s und ℓ – können den Gesetzen der Quantenphysik zufolge genau zwei Einstellungen zueinander einnehmen: Ihr Drehsinn zeigt entweder in die gleiche oder in die entgegengesetzte Richtung. Weil ℓ stets ganzzahlige Werte annimmt und jedes Nukleon den Spin $s=1/2$ besitzt, kann der Gesamtdrehimpuls j die Werte $\ell+1/2$ oder $\ell-1/2$ annehmen. Für Nukleonen ist es energetisch günstiger, wenn Spin und Bahndrehimpuls so koppeln, wie Fachleute sagen, dass sie parallel zueinander eingestellt sind und nicht antiparallel – sie sind dann stärker aneinander gebunden.

Berechnet man die Energieniveaus der Schalen unter Berücksichtigung der Spin-Bahn-Kopplung, erkennt man, dass sich die Niveaus zweier aufeinander folgender Schalen stark unterscheiden können. Bei 50 Protonen im Kern, wie sie das metallische Element Zinn aufweist, ist die äußerste Schale mit Bahndrehimpuls $\ell=4$ und parallelem Spin (für Insider: $g_{9/2}$) komplett gefüllt und es besteht eine große Energielücke zur nächstäußeren leeren Schale mit $\ell=4$ und antiparallem Spin ($g_{7/2}$). Damit wird die 50 zu einer magischen Zahl,

Jede Schale des Atomkerns ist durch ihre Energie sowie ihren Bahndrehimpuls ℓ und die Spin-Einstellung s gekennzeichnet. Im Fall von Zinn-100 ist die äußerste mit Nukleonen besetzte Schale diejenige mit $\ell=4, s=1/2$ und Gesamtdrehimpuls $j=9/2$. Weil es sich um einen doppelt magischen Kern handelt, sind diese Schalen komplett gefüllt – mit Protonen (rote Punkte) beziehungsweise Neutronen (blaue Punkte). Eines der zehn Protonen wandelt sich beim Betazerfall von Zinn-100 in ein Neutron um; damit ist Indium-100 entstanden. In einer von dessen Neutronenschalen nimmt das ehemalige Proton nun einen der freien Plätze ein (blaue Kreise); sein Spin hat sich dabei umgekehrt.

denn es erfordert viel Energie, eines der Protonen oder Neutronen eines solchen Kerns über die Energielücke hinweg energetisch anzuregen. Im Fall von Zinn-100 ist dies sowohl für seine 50 Protonen als auch für seine 50 Neutronen der Fall, weshalb der Kern als doppelt magisch gilt.

Zinn-100 hat sich als sehr interessant für Theoretiker ebenso wie für Experimentatoren erwiesen. Warum? Schalenmodellrechnungen von Kernen mit großen Nukleonenzahlen, insbesondere vielen Protonen, sind aufwändig. Selbst auf modernen Computern müssen Forscher stark vereinfachen, um die Rechenzeit zu reduzieren. Gleichzeitig fehlen Messungen, die Werte für die freien Parameter der Theorien liefern.

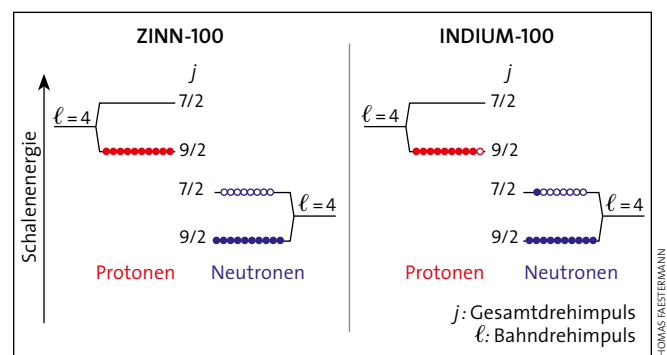
Genau an diesem Punkt helfen magische Atomkerne. Wegen ihrer abgeschlossenen Schalen besitzen sie ein etwas einfacheres Innenleben, so dass sich die Theorie besser an ihnen erproben lässt. Das gilt auch für Kerne, deren Nukleonenzahlen nur fast magisch sind. Das Wissen um ihre Eigenschaften nutzt selbst Astrophysikern. Denn bei Sternexplosionen bilden sich kurzlebige Atomkerne in der Gegend von Zinn-100 – wenn beispielsweise ein Weißer Zwerg so lange Wasserstoff an seiner Oberfläche sammelt, bis dieser zündet.

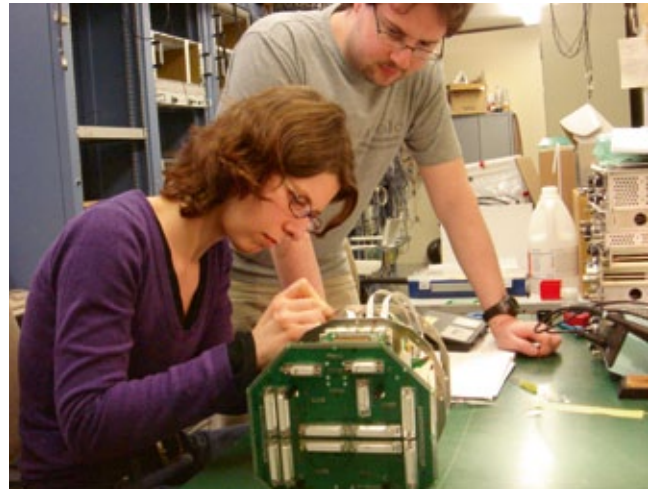
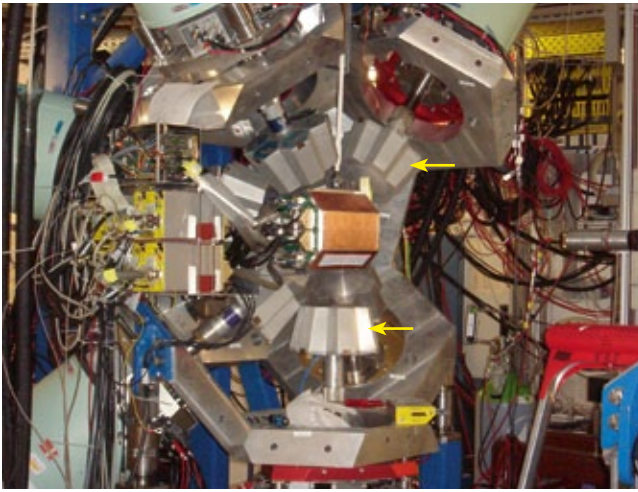
Zinn-Stecknadel im Atomkernhaufen

Ein Kern wie ${}^{100}_{50}\text{Sn}_{50}$ (zur Notation siehe Kasten links oben) gibt seine Geheimnisse dennoch nicht leicht preis. Da es schwierig ist, schwereren Kernen gezielt so viele Protonen und Neutronen zu entreißen, dass sich bei der Reaktionskette Zinn-100 bildet, müssen Experimentatoren wenige Stecknadeln im Heuhaufen der viel häufiger produzierten Kerne suchen.

Um die Eigenschaften des Kerns dennoch genauer zu vermessen, hatte ich als Sprecher einer großen Kollaboration von Physikern aus München und Darmstadt, aus Großbritannien und anderen europäischen Ländern sowie einem japanischen und einem amerikanischen Forscher beim GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt (bis 2008 Gesellschaft für Schwerionenforschung) beantragt, deren Beschleunigeranlage nutzen zu dürfen. Der UNILAC ist ein Linearbeschleuniger für schwere Ionen, die dann im Schwerionen-Synchrotron SIS, einem Ringbeschleuniger mit 216 Metern Umfang, weiterbeschleunigt werden.

21 Tage Experimentierzeit gewährte man uns – eine ungewöhnlich lange Dauer für solche Versuche. Denn das Experi-





BILDE: FOTOS: THOMAS FALESTERMANN

ment versprach wichtige Ergebnisse. Zinn-100 kann sich wegen seines hohen Protonenüberschusses – verglichen mit natürlich vorkommenden Kernen, etwa einem Molybdän-Isotop, das ebenfalls 100 Kernteilchen besitzt, aber nur 42 Protonen – durch Betazerfall umwandeln. Dabei sendet der Kern ein Positron aus (das positiv geladene Gegenstück zum Elektron) sowie ein Neutrino; vor allem wandelt sich dabei aber ein Proton des Kerns in ein Neutron um. Das $^{100}_{50}\text{Sn}_{50}$ verwandelt sich also in sein Vorgängerelement im Periodensystem, $^{100}_{49}\text{In}_{51}$. Dieses Indium-Isotop besitzt nur 49 Protonen, dafür aber 51 Neutronen. Darüber hinaus besagen die Regeln des Betazerfalls, dass sich das entstandene Indium-Isotop anschließend in einem angeregten Zustand befindet, und dass der Drehimpuls des gesamten Kerns nicht null ist wie bei Zinn-100, sondern eins.

Genau dieser Übergang, bei dem sich das Zinn-Isotop in das angeregte Indium-Isotop verwandelt, dürfte Theoretikern zufolge sehr häufig vorkommen; er besitzt also eine extrem hohe so genannte Übergangsstärke. Diese Größe beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein gegebener Kern in einen anderen Zustand wechselt; bislang ließ sie sich aber nicht ausreichend genau bestimmen. Interessant ist sie vor allem deshalb, weil der Vergleich von theoretischem zu gemessenem Wert Aufschluss darüber gibt, wie gut moderne Schalenmodellrechnungen den Kern tatsächlich beschreiben. Je verlässlicher sie sind, desto mehr traut man ihnen dann auch bei Nachbarkernen, die experimentell noch schwerer zugänglich sind.

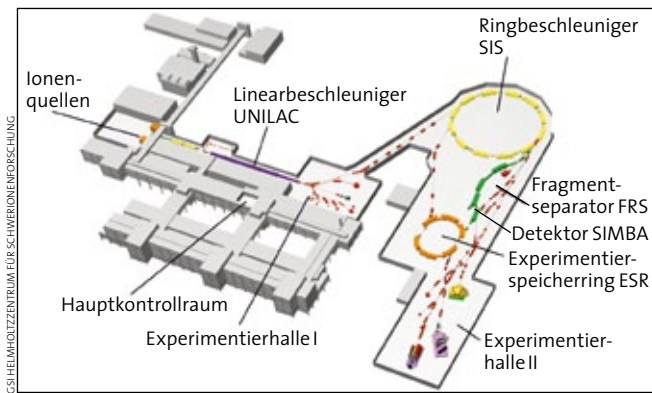
Die Übergangsstärke ist umso größer, je kürzer die Halbwertszeit und je kleiner die Zerfallsenergie ist. Letztere verteilt sich beim Betazerfall stets auf das Positron und das Neutrino. Das Neutrino hatten wir gar nicht erst versucht zu erfassen – selbst gigantische unterirdische Detektoren weisen nur einen winzigen Bruchteil dieser flüchtigen Teilchen nach. Aber das war kein Problem, denn die Positronen zeigen eine kontinuierliche Energieverteilung. Manchmal übernehmen sie praktisch die gesamte Zerfallsenergie und lassen nichts für die Neutrinos übrig. Misst man die energiereichsten von ihnen, kennt man also auch die Zerfallsenergie recht

Um den Zerfall der Zinn-100-Kerne zu untersuchen, werden sie gezielt im Detektor SIMBA gestoppt (Bild links, kupferfarbenes Gehäuse in Bildmitte). Umgeben ist SIMBA von 15 Germanium-Detektoren zur Messung der Gammaenergie (gelbe Pfeile). Der vordere Teil der Anlage war vor der Aufnahme entfernt worden. Für die Analyse der Daten waren die damaligen Doktoranden Katrin Straub und Christoph Hinke zuständig (Bild rechts).

genau. Aus den beiden Messgrößen Halbwertszeit und Zerfallsenergie kann man nun die Übergangsstärke berechnen. Genau genommen gilt es dann noch sicherzustellen, dass wirklich alle Zerfälle zu dem einen angeregten Zustand führen. Diese Information ist in der auf den Betazerfall folgenden Gammastrahlung enthalten; sie entsteht, wenn das angeregte Indium-100 seine Anregungsenergie abgibt und damit in den Grundzustand übergeht.

Ein so starker Betaübergang, wie man ihn bei Zinn-100 erwartet, ist auch nur bei diesem Isotop denkbar. Alle leichten doppelt magischen Kerne wie $^{16}_8\text{O}_8$ oder $^{20}_{20}\text{Ca}_{20}$ sind entweder stabil oder aber ihre Zerfallsenergie ist zu niedrig, als dass die für einen starken Übergang nötige Konfiguration erreicht werden könnte, wie etwa bei $^{56}_{28}\text{Ni}_{28}$. Und jenseits von Zinn-100 existieren keine doppelt magischen Kerne mehr, bei denen die Zahl der Protonen und Neutronen gleich ist. Der nächste Kandidat wäre Blei-164 mit 82 Protonen und 82 Neutronen – doch dieser Kern würde nicht mehr zusammenhalten, weil sich die vielen Protonen zu stark abstoßen.

Protonenreiche Kerne wie Zinn-100 lassen sich mittels zweier Reaktionsmechanismen erzeugen. Der eine ist die Fusion zweier etwa gleich schwerer Atomkerne, zum Beispiel Chrom-50 und Nickel-58. Um die elektrische Abstoßung zwischen den positiv geladenen Kernen zu überwinden, wird Nickel-58 mit etwa einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit auf eine Folie mit Chrom-50-Atomen geschossen. Dabei fusionieren einzelne Atomkerne, so dass ein stark angeregter Zinn-108-Kern entsteht. Während dieser seine Anregungsenergie durch Verdampfung von Neutronen und Protonen abgibt, bildet sich unter anderem Zinn-100.



Zu den zentralen Elementen der Beschleunigeranlage des Darmstädter GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung zählen der Linearbeschleuniger UNILAC und der Ringbeschleuniger SIS. An Letzteren schließen sich Messeinrichtungen an.

Der zweite Mechanismus ist die Fragmentation. Man schießt einen schweren Kern wie etwa Xenon-124 mit 40 bis 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit auf ein dickes Blech. Streift das Projektil einen Atomkern in diesem Blech, wird ein Teil seiner Nukleonen abgeschert. Die anderen formieren sich zu einem Restkern und emittieren weitere Nukleonen. So entstehen aus einem Strahl schwerer Kerne viele leichtere, darunter auch Zinn-100. Der große Vorteil: Die Restkerne fliegen weiterhin mit annähernd der ursprünglichen hohen Projektilgeschwindigkeit. Darum lassen sich die produzierten Kerne – vor allem auch die extrem selten entstehenden Exemplare – durch magnetische Ablensysteme aussondern und in geeigneten Detektoren eindeutig identifizieren.

Ein solches Fragmentationsexperiment hatte das Institut für Kernphysik an der Technischen Universität München schon in den 1990er Jahren in Angriff genommen. Mein Kollege Jürgen Friese hatte damals die Initiative ergriffen und der GSI vorgeschlagen, Zinn-100-Kerne zu erzeugen, abzustoppen und ihre Zerfallseigenschaften zu messen. Tatsächlich gelang es uns 1994 in Zusammenarbeit mit der Gruppe am Fragmentseparator, neun Zinn-100-Kerne zu identifizieren. Sechs von ihnen konnten wir in einem Detektor stoppen und dabei ihre Zerfallszeiten sowie die Energien der beim Betazerfall entstehenden Positronen messen. Damit erhielten wir einen ersten groben Wert für die Halbwertszeit, nämlich 0,9 Sekunden, sowie für die Übergangsenergie, nämlich 3,4 MeV (Megaelektronvolt), entsprechend der Ruheenergie von knapp sieben Elektronen. Um die theoretisch vorhergesagte sehr hohe Übergangstärke bestätigen zu können, reichte die Genauigkeit allerdings noch nicht aus – dazu hätten wir mehr Messwerte gebraucht.

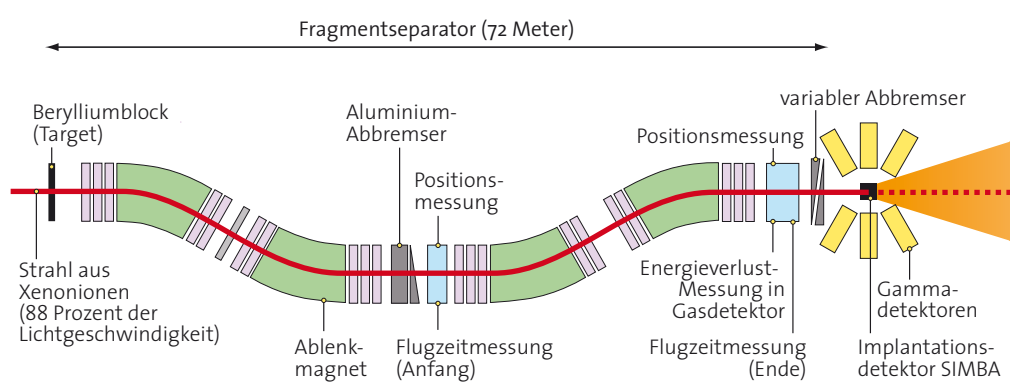
Erkenntniszuwachs in winzigen Schritten

Nur wenige Wochen später berichtete eine Forschergruppe vom französischen GANIL-Beschleuniger über ein anderes Fragmentationsexperiment, bei dem ebenfalls einige Zinn-100-Kerne identifiziert wurden. Deren Zerfallseigenschaften konnten die Wissenschaftler aber nicht messen. Das nächste Ergebnis stammt aus dem Jahr 1996. Wieder ein anderes Team hatte am GANIL Kerne mit der Massenzahl 100 erzeugt – neben Zinn-100 auch Kerne wie Indium-100 und Cadmium-100 –, diesmal aber mittels Fusion. Dabei war es den Forschern auch gelungen, den Massenunterschied zwischen Zinn-100 und seinem Indium-Tochterkern zu messen. Ge-

Einschießen, sortieren, abbremsen und messen

Für das Zinn-100-Experiment werden Xenonionen im Linearbeschleuniger UNILAC auf 16 Prozent der Lichtgeschwindigkeit gebracht. Anschließend erreichen sie das kreisförmige Synchrotron SIS, das sie auf 88 Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Aus dem SIS werden die Teilchen nach und nach herausgeschossen und treten in das »Target«, einen Berylliumblock, ein. In diesem entstehen aus den Xenonionen durch Kernreaktionen leichtere Atomkerne, die ihre Elektronen verloren haben und nun in den Fragmentseparator (FRS) gelangen.

Die ersten beiden Magnete des FRS lenken die Teilchen entspre-



chend ihrer Masse und Ladung auf unterschiedliche Flugbahnen. Ein Aluminiumblock bremst sie abhängig von ihrer Kernladungszahl unterschiedlich stark ab. Mittels der folgenden zwei Ablenkmagnete separiert man weitere Nuklide. Aus den Positionsmessungen lässt sich der

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: ANDREAS STOLZ

mäß der einsteinschen Äquivalenz von Masse und Energie entspricht diese Massendifferenz der Summe von Betaenergie und der gesamten Gammastrahlung, die der Tochterkern aussendet, wenn er vom angeregten in den Grundzustand übergeht. Die Ergebnisse stimmten mit unseren eigenen überein, und auch die Genauigkeit der Messungen war etwa gleich groß. Einen weiteren Wert für die Halbwertszeit, wieder mit etwa derselben Genauigkeit, ermittelten Forscher 2008 am National Superconducting Cyclotron Laboratory, einer Beschleunigeranlage an der Michigan State University (USA).

In diesem Jahr gingen auch wir das Experiment erneut an. In der Zwischenzeit waren die GSI-Beschleuniger optimiert worden und wir hofften, mindestens einen Zinn-100-Kern pro Stunde erzeugen und eindeutig identifizieren zu können. Außerdem hatten die am europäischen Euroball-Projekt beteiligten Länder, in dessen Rahmen eine große Zahl großvolumiger Gammadetektoren gebaut wurde, 2004 begonnen, diese an den Darmstädter Beschleunigern zusammenzubringen. 15 der so genannten Euroball-Cluster waren dazu in Form einer Hohlkugel um den Detektor angeordnet, genannt RISING (Rare Isotope Spectroscopic Investigations at GSI).

Ansonsten sah das neue Experiment unserem ersten sehr ähnlich. Als Projektile verwendeten wir wieder Xenon-124-Ionen, die vier Protonen und 20 Neutronen mehr aufweisen als die gesuchten Zinn-100-Kerne. Im Schwerionen-Synchrotron beschleunigten wir die Ionen auf 88 Prozent der Lichtgeschwindigkeit und schossen sie auf einen Berylliumblock, in dem durch Fragmentation an den Berylliumkernen andere Kerne entstanden. Trotz der Dicke des Blocks von etwa zwei Zentimetern traten diese mit nur wenig vermindelter Geschwindigkeit wieder aus. Die meisten waren zu

diesem Zeitpunkt bereits »nackt«, hatten also alle Elektronen verloren und waren damit entsprechend der Zahl ihrer Protonen positiv geladen.

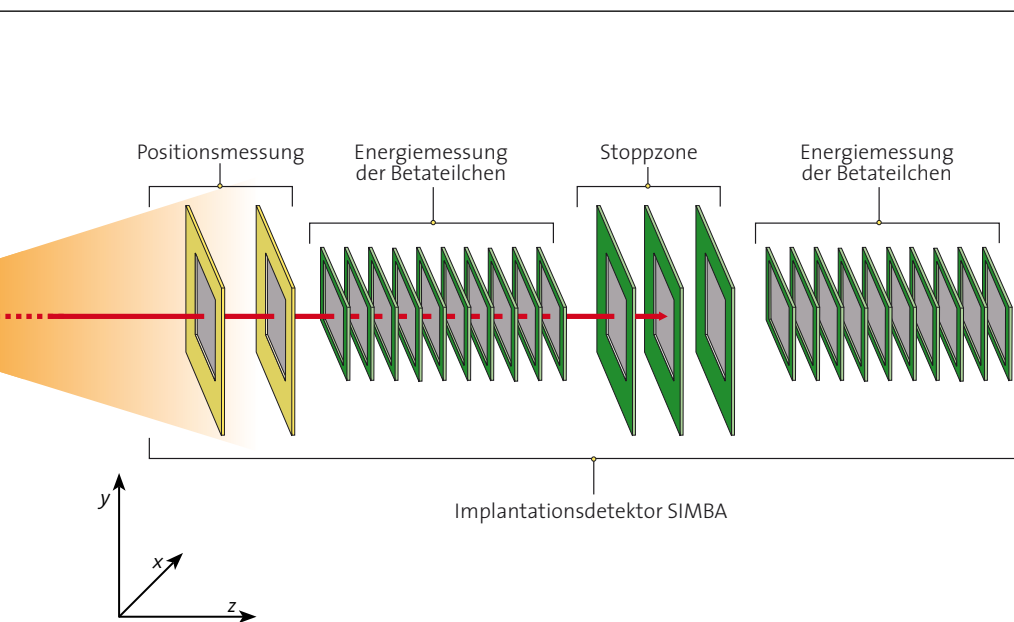
Mit dem nachfolgenden Fragmentseparator (FRS), einem 72 Meter langen System aus vier Ablenkmagneten und vielen Fokussierungsmagneten, sortierten wir die gesuchten Kerne aus. Im FRS fliegen die Ionen auf gekrümmten Bahnen, deren Radius davon abhängt, wie groß der Term A/Z ist, also das Verhältnis zwischen ihrer Massenzahl und ihrer Ladungszahl.

Zwischen dem zweiten und dem dritten FRS-Magneten mussten die Kerne zudem einen zwei Zentimeter dicken Aluminiumblock durchqueren. In diesem verloren sie Geschwindigkeit, und zwar umso mehr, je größer ihre Ladung war. Mit den nachfolgenden Magneten konnten wir die Kerne daher auch nach ihrer Kernladung sortieren.

Weltpremiere: Die Forscher wiesen auch Zinn-99, Indium-97 und Cadmium-95 nach

Das setzte natürlich voraus, dass wir auch die Geschwindigkeiten der Ionen kennen. Diese maßen wir, indem wir ihre Flugzeit durch die zweite Hälfte des FRS bestimmten. Daraus und aus ihrer Bahn durch das Magnetfeld ermittelten wir schließlich das Verhältnis A/Z der jeweiligen Teilchen. Zum Schluss bestimmten wir noch die Energie, die sie an das Gas in einem Detektor abgaben und die quadratisch von der Kernladung Z abhing. Um sicherzugehen, verwendeten wir für jede dieser Messgrößen wenigstens zwei Detektoren, teils Instrumente des FRS und teils solche, die wir eigens entwickelt hatten.

15 Tage lang betrieben wir den FRS mit Einstellungen, die für Zinn-100 optimiert waren, und identifizierten in dieser



Bahnradius und damit der Parameter A/Z ermitteln. Die Geschwindigkeit erhält man aus der Flugzeitmessung. Die Kernladung Z lässt sich über den Energieverlust der Teilchen in einem Gasdetektor bestimmen.

Schließlich verlassen die sortierten Ionen den FRS und werden im Implantationsdetektor SIMBA gestoppt, der aus einer Anordnung von 25 Siliziumdetektoren besteht. In den ersten beiden wird die Position der Ionen in x - und y -Richtung gemessen. Zur Ruhe kommen sie in einem der drei Detektoren der so genannten Stoppzone. Dabei wird ihre Position erneut gemessen, nun auch in z -Richtung. Anschließend zerfallen die Kerne, wobei sie Beta-Teilchen, in z -Richtung emittieren. Deren Energie wird in zwei Anordnungen von je zehn weiteren Detektoren gemessen. Nicht dargestellt sind die kugelförmig um die Stoppzone angeordneten Gammadetektoren.

Zeit 259 derartige Kerne (siehe Diagramm auf der folgenden Seite). Sogar eine Weltpremiere gelang uns, indem wir auch die Nuklide Zinn-99, Indium-97 und Cadmium-95 nachwiesen, bei denen die Protonen gegenüber den Neutronen in der Überzahl sind. Bei Indium-97 ist deren gegenseitige elektrische Abstoßung so groß, dass solche Kerne möglicherweise spontan ein Proton verlieren.

Natürlich genügte es uns nicht, die Zinn-100-Kerne nur zu identifizieren; wir wollten wissen, wie sie zerfallen. Also ließen wir die Kerne weiterfliegen, um sie schließlich in unserem Implantationsdetektor SIMBA (Silizium-Implantationsdetektor und Beta-Absorber) zu registrieren. Zuvor schickten wir sie noch durch eine Materieschicht mit variabler Dicke, die sie genau so stark abbremste, dass sie an der richtigen Stelle im Instrument stoppten. SIMBA basiert auf dem Detektor, den wir bereits für das Experiment in den 1990er Jahren entwickelt hatten. Er besteht aus 25 großflächigen Siliziumdetektoren mit jeweils einem knappen Millimeter Dicke. Die ersten beiden messen den horizontalen und vertikalen Ort, an dem die Kerne in das Detektorsystem eintreten. Drei weitere bilden die Stoppzone; sie registrieren in drei Dimensionen die Position, an der ein Kern zur Ruhe kommt. In horizontaler wie vertikaler Richtung besitzt die Stoppzone eine Ortsauflösung von einem Millimeter. Dass ein Kern in einem bestimmten Detektor stoppt, erkennen wir daran, dass der nachfolgende Detektor keine Energie mehr registriert.

Neben dem Kern selbst interessierten uns die Betateilchen. Sobald wir eines von ihnen in der Nähe der Stoppposition maßen, stammte es mit hoher Wahrscheinlichkeit vom Zerfall des kurz zuvor dort gestoppten Kerns. Ihre Energie betrug gerade einmal ein Dreihundertstel der Energiemenge, die der Kern im letzten Detektor hinterließ. Um diese Teilchen ebenfalls zu stoppen – ihre Reichweite ist deutlich größer als ein Millimeter –, stellten wir vor und hinter der Stoppzone jeweils zehn Siliziumdetektoren auf, in denen die Betateilchen ihre ganze Energie verlieren. Indem wir die jeweiligen Messwerte aufsummierten, konnten wir daraus ein Spektrum der Betaenergieverteilung gewinnen. Mit den RISING-Detektoren, die SIMBA kugelförmig umgeben, maßen wir parallel dazu auch die Gammaenergien.

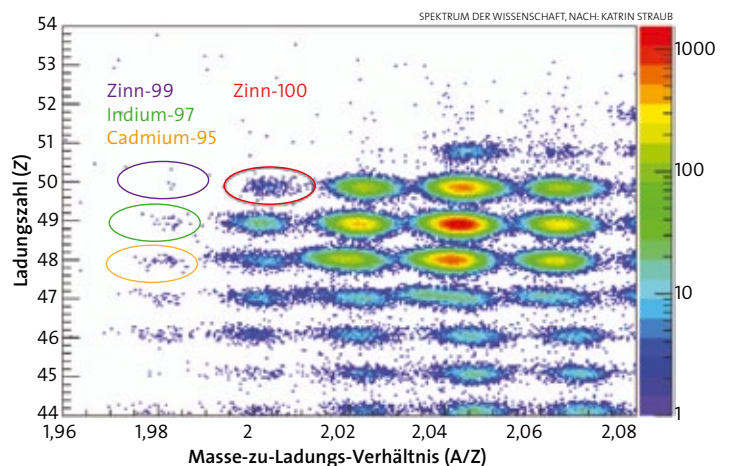
Jedes der im Experiment nachgewiesenen Fragmente lässt sich entsprechend seiner Ladungszahl Z und seinem Verhältnis zwischen Massenzahl und Ladungszahl (A/Z) in ein Diagramm einordnen. Infolge der Messunsicherheit sind die Messpunkte für identische Fragmente auf ein elliptisches Gebiet verteilt. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen die jeweilige Häufigkeit, mit der identische Wertepaare beobachtet wurden (logarithmische Skala, rechts außen). Beispielsweise bedeutet ein tieferer Punkt, dass rund 1000 Ionen die entsprechende Wertekombination besaßen.

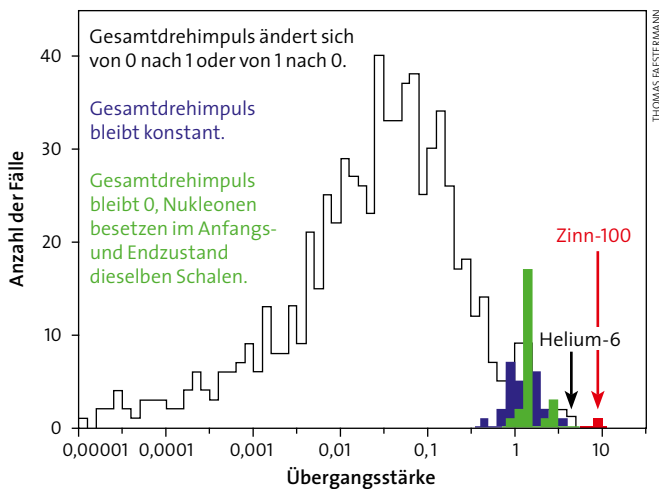
Als unsere Experimentierzeit abließ, machte sich Erschöpfung breit. Ständig waren wenigstens drei Wissenschaftler auf Schicht gewesen, um all die Detektorsysteme am Laufen zu halten; hinzu kamen die Überwachung der elektronischen Auslese und die digitale Datenverarbeitung. Die Liste der Autoren unserer Veröffentlichung umfasste schließlich mehr als 60 Physikerinnen und Physiker aus Europa, Japan und den USA.

Wieder zu Hause in München, begannen die damaligen Doktoranden Katrin Straub und Christoph Hinke mit der Analyse der Daten – und wir bangten, ob auch alle Detektorsysteme wie geplant funktioniert hatten. Doch alles war gut gegangen. Aus der Verteilung der Zeitintervalle zwischen der Ankunft eines Zinn-100-Kerns und einem in der Nähe nachgewiesenen Betateilchen bestimmten wir die Halbwertszeit zu 1,16 Sekunden, bei einer Unsicherheit von 0,20 Sekunden. Dieser Wert stimmt mit den früheren Messungen überein, allerdings ist die Messgenauigkeit höher.

Außerdem erhielten wir ein Spektrum der emittierten Gammastrahlung. Darin sind fünf diskrete Linien zu erkennen. Sie verraten die Energiezustände, die beim Übergang des angeregten Tochterkerns Indium-100 in den Grundzustand beteiligt sind. Jede der Linien entspricht dem Übergang zwischen zwei bestimmten Energiezuständen im Kern. Ein präzises Schema der Zustände im Tochterkern lässt sich aus diesen Informationen zwar nicht ableiten. Aber wenn man etwas auf die Vorhersagen im Rahmen des Schalenmodells schießt, erhält man plausible Ergebnisse. Jedenfalls haben wir keine starken Hinweise darauf gefunden, dass der Betazerfall anders ablaufen könnte als theoretisch erwartet (siehe Grafik S. 58), und damit ebenfalls einen Aspekt des Schalenmodells bestätigt.

Auch die Verteilung der Zerfallsenergien können wir interpretieren. Indem wir die gemessene Energieverteilung der Positronen mit berechneten Verteilungen bei verschiedenen Zerfallsenergien verglichen, konnten wir die Energie des Übergangs vom Zinn-100-Grundzustand zum angeregten Indium-100-Zustand mit einer Unsicherheit von knapp fünf Prozent bestimmen. Mit der Kenntnis von Halbwertszeit und Zerfallsenergie konnten wir nun die Übergangsstärke





Wie groß ist die Übergangsstärke von Betazerfällen unterschiedlicher Atomkerne? Die entsprechenden Messwerte sind hier als Häufigkeitsverteilung auf einer logarithmischen Skala dargestellt; unterschieden werden »erlaubte« (weiß, blau) und »supererlaubte« (grün) Betazerfälle. Beim Zerfall von Zinn-100 tritt der mit Abstand höchste Wert 9,1 auf, während die erlaubten Übergänge eine im Mittel um zwei bis drei Größenordnungen geringere Stärke aufweisen. Selbst die Übergangsstärke der Klasse der supererlaubten Übergänge ist deutlich kleiner.

ke berechnen. Das Ergebnis unserer Messungen: Weltrekord. Der Wert 9,1 ist mit Abstand der größte, der für Betazerfälle je gemessen oder vorhergesagt wurde. Der in der Abbildung oben zweitplatzierte Kern, He-6, hat eine Übergangsstärke von nur 4,7.

Was macht diesen Übergang nun so außergewöhnlich stark? Dazu müssen wir ein wenig ausholen. Spin und Bahndrehimpuls eines Kernzustands lassen sich nicht unabhängig voneinander messen; nur den Gesamtdrehimpuls können wir experimentell bestimmen. Doch dieser ergibt sich nicht nur aus der vom Schalenmodell nahegelegten Konfiguration, in der die Nukleonen die Schalen eines Kerns füllen. Normalerweise beruht er sogar auf unzähligen verschiedenen Konfigurationen. Genau deshalb ist die doppelte Magie so wichtig. Sowohl Zinn-100 sowie sein Tochterkern sind dadurch sehr »reine« Schalenmodellzustände, wie Fachleute sagen, die sich durch vergleichsweise wenige Konfigurationen beschreiben lassen und so den Vergleich zwischen Modell und Experiment erleichtern.

Grundlage entsprechender Berechnungen sind quantenphysikalische Wahrscheinlichkeitsfunktionen. Sie besagen, dass sich ein Atomkern gleichzeitig in mehreren unterschiedlichen Konfigurationen befinden kann, in einer so genannten Superposition von Zuständen. Bei einer anschließenden Messung würde zwar nur genau eine dieser Konfigurationen festgestellt, doch tritt sie nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf. Eine quantentheoretische Rechnung aus jüngerer Zeit ergibt, dass der Grundzustand von Zinn-100 zu 82 Prozent aus der (in der Grafik auf S. 58 dargestellten) Konfiguration mit zehn Protonen in der vollen $g_{9/2}$ -Unterschale und einer vollständig leeren $g_{7/2}$ -Schale für die Neutronen besteht. Den Rest tragen andere Konfigurationen bei, zum Beispiel solche, bei denen ein Protonen- oder Neutronenpaar in eine der höheren Schalen angehoben ist.

Mittlerweile sind fast alle Daten des Experiments aus dem Jahr 2008 analysiert. Gleichzeitig stehen wir schon in den Startlöchern, um ein weiteres Experiment zu Zinn-100 durchzuführen. Im Rahmen eines internationalen Zusammenschlusses mit Gruppen aus Frankreich, Deutschland, Japan,

Polen und anderen Ländern wollen wir Mitte dieses Jahres an der Beschleunigeranlage RIBF des japanischen Forschungsinstituts RIKEN die Arbeit aufnehmen. Die beschleunigten Ionen erreichen dort zwar nur halb so hohe Geschwindigkeiten wie bei der GSI, aber die hohe Intensität des Ionenstrahls macht dies um ein Vielfaches wett. Wir können mit der zehnfachen Datenmenge rechnen und so nicht nur die Genauigkeit unserer Messergebnisse verbessern, sondern auch auf neue Erkenntnisse hoffen.

Manchen Theoretikern zufolge könnte ein angeregter Zustand des Zinn-100 nämlich lange genug leben, dass er erst nach einer Flugzeit von einigen 100 milliardstel Sekunden durch Gammaemission zerfällt. Bestätigen können wir diese Vermutung aber erst, wenn wir über mehr Messdaten verfügen. Dann könnten wir erstmals sogar angeregte Zustände des doppelt magischen Kerns Zinn-100 untersuchen. ~

DER AUTOR



Thomas Faestermann promovierte an der Technischen Universität München (TUM) und forschte anschließend zwei Jahre lang an einem Beschleunigerlabor in Kanada. Seitdem ist er wissenschaftlicher Angestellter an der TUM. Faestermann experimentiert hauptsächlich am Beschleuniger des Maier-Leibnitz-Labors in Garching bei München und an Beschleunigern der GSI in Darmstadt. Dabei studiert er Eigenschaften der Atomkerne auch im Hinblick auf astrophysikalische Fragestellungen, Neutrinoeigenschaften und fundamentale Wechselwirkungen.

QUELLE

Hinke, C.B. et al.: Superallowed Gamow-Teller Decay of the Doubly Magic Nucleus $Sn-100$. In: Nature 486, S. 341–345, 2012

WEBLINKS

www.nature.com/nature/journal/v486/n7403/full/486330a.html
Vertiefender Nature-Artikel von Daniel Bazin vom 21. Juni 2012 (auf englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192454

Druiden, Ritter, Fürstinnen

Archäologische Grabungen der letzten Jahre erhärten das Bild einer aristokratisch geprägten keltischen Gesellschaft, in der auch Frauen das Sagen hatten – zumindest in der Anfangszeit dieser Kultur.

Von Dirk Krause

»» Von den Kelten weiß man gerade genug, um sie in der Geschichte zu verankern, und gleichzeitig so wenig, dass sie genug Raum lassen für die Fantasie«, warnt die Regensburger Keltologin Sabine Rieckhoff vor allzu hohen Erwartungen an die Altertumswissenschaften. Gab es ein Volk der Kelten, vielleicht sogar ein Staatswesen? Fördert die Rückbesinnung von Iren und Schotten auf ihr Brauchtum die Wiederentdeckung urkeltischer Gebräuche und Religion? Dank der akribischen Arbeit der Historiker an den antiken Schriftquellen und dank systematischer archäologischer Forschung lassen sich zumindest manche dieser Fragen endlich beantworten.

Im 19. Jahrhundert bildeten die antiken Texte gerade in Frankreich und Deutschland einen fruchtbaren Nährboden, um den Nationalstaaten eine ruhmreiche keltische beziehungsweise germanische Vergangenheit anzudichten. Diese hätte dann bis ins 1. Jahrtausend v. Chr. zurückgereicht, als die Anwohner des Mittelmeers erstmals auf Menschen trafen, die der Grieche Hekataois von Milet um 500 v. Chr. als »keltoi« bezeichnete. Möglicherweise handelte es sich dabei um Bewohner der Atlantikküste – der Kontakt kam im Zuge des Fernhandels zu Stande. Gut 100 Jahre später schwärmten die Kelten aus, um Griechen, Etrusker und Römer als Krieger das Fürchten zu lehren. Tausende erreich-

ten als Söldner Kleinasien und wurden zum Leidwesen ihrer Nachbarn dort im 3. Jahrhundert ansässig, nunmehr »galatoi« genannt. Daneben verwendeten die Römer, unter anderem der römische Feldherr Gaius Julius Cäsar in seinem Kriegsbericht »De Bello Gallico«, eine weitere Bezeichnung: Gallier. Neben den Schriftzeugnissen konnten sich die Forscher des 19. Jahrhunderts auch auf archäologische Quellen stützen. Die frühen Kelten verorteten sie in der Hallstattkultur, bekannt nach einem Fundort in Österreich. Mit ihr begann um 800 v. Chr. die Eisenzeit. Die La-Tène-Kultur, benannt nach einem Fundort in der Schweiz, löste sie um 450 v. Chr. ab.

Antike Quellen im kritischen Blick

Mitte des 20. Jahrhunderts nahm die Keltologie allmählich Fahrt auf und versuchte, den Ballast der ideologisch verzerrten Altertumsforschung der vergangenen Jahrzehnte abzuwerfen. Heute wissen wir, dass es niemals ein keltisches Volk gegeben hat und ebenso wenig eine einheitliche Kultur mit einer über den gesamten Verbreitungsraum verbindlichen Gesellschaftsform. Immerhin aber lassen sich über die verschiedenen keltischen Gruppen Aussagen treffen, die auf einer kritischen Analyse der antiken Quellen sowie auf der intensiven archäologischen Forschung vor allem der letzten zehn Jahre beruht.

Leider haben keltische Gruppen keine eigene Schrift entwickelt und die ihrer Mittelmeernachbarn nur so sporadisch genutzt, dass die wenigen, zudem lediglich in Bruchstücken erhaltenen Texte wenig Erkenntniswert bieten. Die ausführlichste Schilderung stammt von Gaius Julius Cäsar, der im sechsten Buch seiner »Commentarii de Bello Gallico« unter anderem ausführte, die Oberschicht in Gallien umfasse nur zwei soziale Klassen: Druiden und »equites«, also Ritter, wobei Erstere als Richter und Priester fungierten. Angeblich waren sie in Geheimbünden organisiert, denen ein gewähltes oder durch Zweikampf ermitteltes Oberhaupt vorstand. Historiker glauben aber, Cäsar habe sich bei diesen Schilderungen in wesentlichen Zügen auf die Aussagen griechischer Autoren wie Poseidonios von Apamaia gestützt, der 40 bis 50 Jahre vor ihm Gallien bereist hatte.

AUF EINEN BLICK

KULTUR OHNE SCHRIFT

1 Um 500 v. Chr. werden die »keltoi« als erste mitteleuropäische Bevölkerungsgruppe von einem antiken Chronisten erwähnt. Die ausführlichste Beschreibung lieferte Gaius Julius Cäsar, denn die keltischen Gruppen schrieben ihre eigene Geschichte nicht auf.

2 Aus Sicht der modernen Forschung waren die Kelten **keine Ethnie**. Vielmehr gab es Gruppen mit vergleichbaren kulturellen Merkmalen, die sich seit etwa 800 v. Chr. herausbildeten.

3 Während die von Römern und Griechen beschriebenen »Barbaren«, die späten Kelten, offenbar in einer **Kriegergesellschaft** organisiert waren, belegen jüngste archäologische Grabungen im Kontext frühkeltischer Fürstensitze eine **Adelsgesellschaft**, in der auch Frauen einen hohen Rang einnahmen.



MIT FRDL. GEN. VOM LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE IM REGIERUNGSPRÄSIDIUM STUTTGART, FILMAKADÉMIE BADEN-WÜRTTEMBERG / BRAINPET GBR / DAVID MAAS

»Die Donau entspringt bei den Kelten und der Stadt Pyrene«, schrieb der Grieche Herodot Mitte des 5. Jahrhunderts v. Chr. Vieles spricht dafür, dass er damit die Heuneburg meinte, einen frühkeltischen Fürstensitz gut 80 Kilometer flussabwärts der Donauquelle. Systematische archäologische Grabungen bewiesen, dass sie um 600 v. Chr. mit einer von mediterranen Vorbildern inspirierten weiß verputzten Lehmziegelmauer und einer monumentalen Toranlage gesichert war.

So wusste der Römer offenbar nicht einmal, dass einer seiner engsten keltischen Verbündeten, der Haeduerfürst Diviciacus, ebenfalls Druiden war. Diese Information verdanken wir nicht Cäsar, sondern Marcus Tullius Cicero (106–43 v. Chr.) – der Kelte hatte den Senator anlässlich einer diplomatischen Reise 61 v. Chr. in Rom aufgesucht.

Sehr wahrscheinlich irrte Cäsar also in seiner Darstellung der gallischen Oberschicht: Druiden gehörten selbst zum Ritterstand, hatten aber eine langjährige Ausbildung absolviert, die sie dann beispielsweise von Steuern und Kriegsdiensten befreite. Letzterer oblag den sonstigen Rittern und ihrer Gefolgschaft, insbesondere Abhängigen und Unfreien, die durch Geburt oder auch durch Schulden an ihren Herrn gebunden waren. An der Spitze dieser Oberschicht stand meist eine Gruppe von Repräsentanten der führenden Familien. Einige Stämme Galliens wurden von Königen regiert, doch diese Herrschaftsform war zu Cäsars Zeit wohl bereits im Niedergang begriffen.

Über die große Masse der Bevölkerung erfahren wir aus den antiken Schriftquellen leider nur wenig. Klar ist, dass es

neben der erwähnten abhängigen Klientel auch Sklaven gab. So erwähnte der griechische Geschichtsschreiber Diodor im 1. Jahrhundert v. Chr., Kaufleute aus dem Mittelmeerraum hätten in Gallien eine Amphore Wein gegen einen Unfreien eingetauscht.

Die Hose als Kulturmerkmal

In dieser Zeit, die wir heute als spätkeltische Phase begreifen, waren die Kriegszüge der »keltoi« und »galatoi« bereits Geschichte, gleichwohl hatten sie Spuren hinterlassen: Einhellig zeichnen die antiken Autoren des 2. und 1. Jahrhunderts v. Chr. ein martialisches Bild von Sitten und Gebräuchen der »Barbaren«. Das begann damit, dass sie Hosen statt eine Toga trugen – außer in römisch besetzten Gebieten. Antike Ethnografen unterschieden daher die »Gallia comata« von der »Gallia togata«. Beim gemeinschaftlichen Mahl lagen sie nicht auf bequemen Möbeln wie die Griechen, Etrusker oder Römer, sondern saßen an niedrigen Tischen. Ihr langer Schnauzbart diente den Männern als Seiher beim Trinken von Bier und Wein; um die besten Fleischstücke fochten sie

blutige Zweikämpfe aus. Zudem schrieb Diodor, dass es unter Galliern üblich war, Kriegsgefangene den Göttern zu opfern und die Schädel der vornehmsten Feinde als Trophäen aufzubewahren oder gar zu Trinkschalen zu verarbeiten.

Mögen diese Berichte ideologisch geprägt sein, um durch Übertreibung des Barbarischen kriegerische Maßnahmen seitens der Römer zu rechtfertigen, haben Ausgrabungen doch manches durchaus bestätigt. So kam in Ribemont-sur-Ancre (westlich von Amiens) ein Opferplatz zum Vorschein, an dem offenbar Hunderte von Männern geköpft und ihre Leichen dann an Pfähle gebunden worden waren, wo sie vor aller Augen verwesten. Zwar praktizierten die Druiden nicht in heiligen Hainen, sondern dem archäologischen Befund nach in eingefriedeten Kultbezirken und Tempeln wie andere antike Priesterschaften. Aber Schädel spielten in der keltischen Religion offenbar wirklich eine große Rolle, und auch für rituelle Gelage gibt es eindeutige Belege wie etwa mit Schwertern geköpft Amphoren (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2007, S. 62).

Insgesamt handelte es sich demnach um stark männerdominierte Kulturen. Cäsar erwähnt folgerichtig nicht eine keltische Frau namentlich. Anders Titus Livius (66 v. Chr. – 17 n. Chr.), der in seiner Geschichte der Stadt Rom schildert, dass der keltische König Ambigatus die Söhne seiner Schwester und nicht seine eigenen mit Führungsaufgaben betrau-

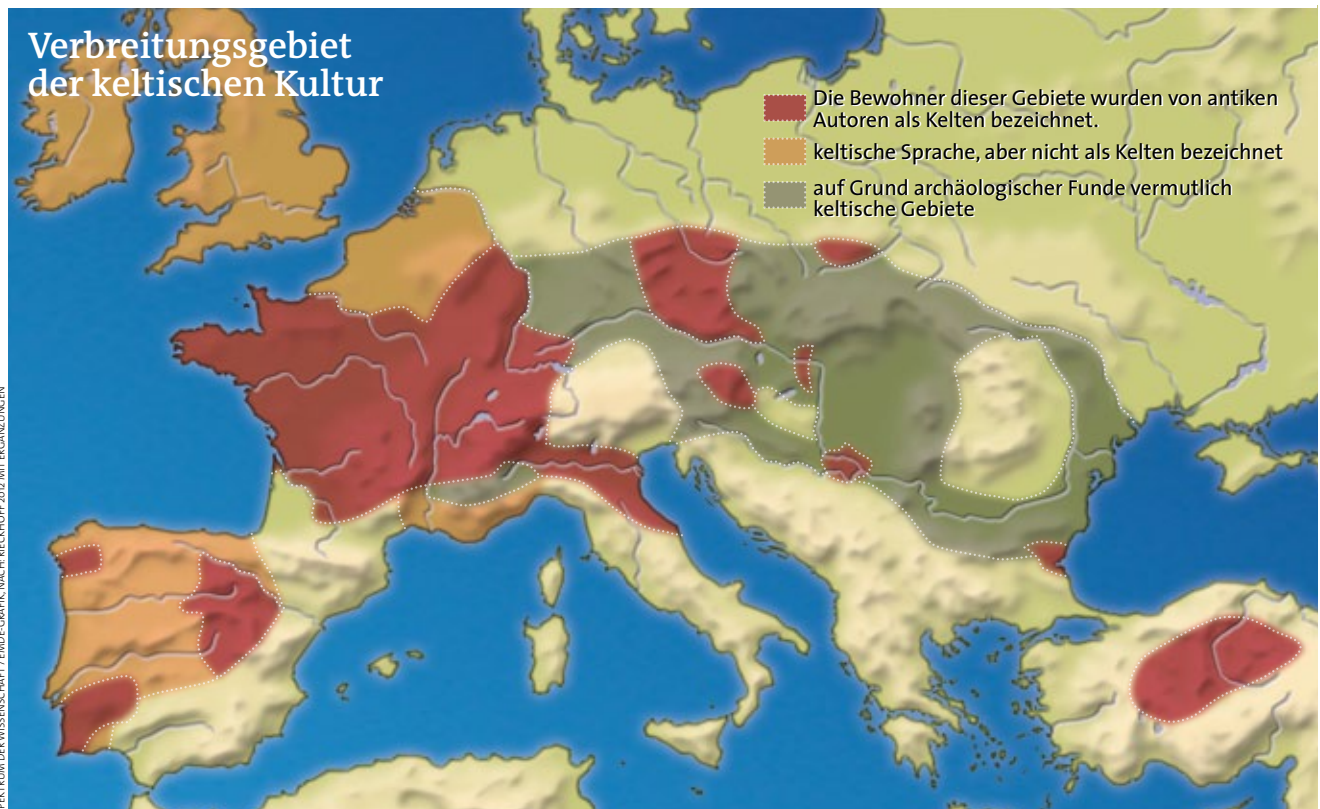
te. Das könnte auf eine matrilineare Erbfolge hindeuten, bei der ein Führungsamt nicht vom Vater auf den Sohn, sondern auf den Schwestersonn vererbt wird. In stark promiskuitiven Gemeinschaften sichert das die Erhaltung der Abstammungslinie, denn über die gemeinsame Mutter ist ein Mann mit den Kindern der Schwester genetisch immer verwandt. Livius bezog sich allerdings auf eine Überlieferung, die in die Zeit vor der keltischen Expansion zurückreicht, in die so genannte frühkeltische Epoche des 6. bis 4. Jahrhunderts v. Chr.

Heuneburg & Co. – wie mächtig waren ihre Besitzer?

Für jene Zeit existieren kaum Schriftquellen, so dass allein archäologische Funde Aufschluss über Lebensverhältnisse und Gesellschaftsstrukturen geben können. Freilich sind diese Überlieferungen ebenfalls mit großen Unsicherheiten behaftet. Mag hier zwar nicht das Risiko bestehen, dass ein antiker Autor eine ganz eigene Sicht der Dinge vermittelt, ideologisch gefärbt oder auch durch Unwissenheit und Spekulationen verzerrt, bringt der Forscher, der den archäologischen Befund auswertet, durch seine Interpretation doch solche Unsicherheiten wieder ins Spiel.

So entbrannte beispielsweise in den 1990er Jahren eine lebhaft wissenschaftliche Diskussion um die Deutung der

Da die keltischen Gruppen ihre eigene Geschichte nicht in Texten festhielten, stammen Berichte über sie ausschließlich von griechischen und römischen Autoren. Der Versuch, den Siedlungsraum der Kelten anhand solcher Quellen nachzuvollziehen, ergibt jedoch bis heute kein einheitliches Bild.





Archäologie mit schwerem Gerät: 2010 wurde die Holzkammer des so genannten Bettelbühl-Grabs an der Heuneburg vollständig als 80 Tonnen schwerer Block geborgen und mit einem Tieflader zum Landesamt für Denkmalpflege in Ludwigsburg transportiert. Unter Laborbedingungen arbeiten sich Archäologen dort nun Zentimeter um Zentimeter in die Tiefe.

Im etruskischen Stil verzierte Goldperlen kamen bei der »Ausgrabung« der Kammer im Labor zum Vorschein. Sie ähneln dem Ohrschmuck, der zuvor schon in einem benachbarten Mädchengrab entdeckt worden war – vermutlich gehörten die Frauen der gleichen Adelsfamilie an.



so genannten Fürstengräber, die im 6. und 5. Jahrhundert v. Chr. im frühkeltischen Verbreitungsgebiet – heute Südwestdeutschland, Ostfrankreich und die Schweiz – mit großem Aufwand angelegt worden waren. Ein Teil der Forscher verstand sie als repräsentative Grablagen einer aristokratisch organisierten und überregional einflussreichen Führungsschicht, ganz im Sinn der Jahrhunderte später von Cäsar angetroffenen Verhältnisse. Manche glaubten darüber hinaus, dass die Fürstensitze Teil eines größeren, sozusagen vorstaatlichen Gebildes waren. Andere Wissenschaftler hingegen sahen darin eher Gräber regional eng begrenzter Gemeinschaften, die gerontokratisch organisiert waren, also von den Ältesten geführt wurden.

Erst die Ausgrabungen der letzten zehn Jahre haben eine Fülle an Belegen dafür erbracht, dass die frühkeltischen Gruppen eher noch komplexer organisiert waren als bereits von der älteren Forschung vermutet. Den Durchbruch brachten großflächige Siedlungsgrabungen an verschiedenen Fürstensitzen im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft von 2004 bis 2010. Was hier zu Tage kam, überschritt zweifellos die Möglichkeiten kleinerer Gruppen mit flachen Hierarchien.

So erwies sich die Heuneburg an der oberen Donau nicht nur als eine seit etwa 600 v. Chr. nach phönizisch-punischem Vorbild in Lehmziegelbauweise errichtete Festung. Sie hatte überdies eine Vorburg mit monumentaler Tor-

anlage und war von einer weitläufigen Außensiedlung mit über 100 Hektar Fläche umgeben. Sehr gut möglich, dass der griechische Chronist Herodot diese auch für mediterrane Verhältnisse städtisch anmutende Anlage meinte, als er im 5. Jahrhundert v. Chr. eine Stadt namens Pyrene im Bereich der oberen Donau erwähnte.

Und die Heuneburg war keine Ausnahme. Neueste Ausgrabungen auf dem rund fünf Hektar großen Hauptplateau des Mont Lassois in Burgund brachten eine regelrechte Stadtanlage mit Plätzen, Quartieren und Versammlungs-, Palast- oder Kultgebäuden von teilweise monumentalen Ausmaßen zum Vorschein. Auch dieser Ort profitierte sicher von seiner Lage: Bot die Donau eine Handelsverbindung zum Schwarzen Meer, so lag der Mont Lassois an der antiken Zinnstraße von Marseille zu den Britischen Inseln. Der Fürstensitz Glauberg in Hessen wiederum mit seinem Großgrabhügel und den lebensgroßen Steinstatuen lag nahe zu Fernhandelswegen, die vom Mittelrhein zur Elbe und nach Nordbayern führten.

Expansion in die Mittelgebirge

Zu den Siedlungsstrukturen passen die Befunde der Archäobotaniker im Voralpenraum und in der Eifel: Mit dem Aufkommen dieser frühkeltischen Zentralorte im 7. und 6. Jahrhundert v. Chr. wurde die Umgebung großflächig bis in unwirtliche Höhenlagen der Mittelgebirge hinein gerodet, um landwirtschaftliche Flächen in großem Stil zu erschließen. Gemeinsam mit zahlreichen neu angelegten Nekropolen und Siedlungen lässt das auf einen starken Bevölkerungsanstieg in dieser Zeit schließen.

Inzwischen wurden auch einige Gräber frei gelegt, die sich offenbar zwanglos in das Modell einer aristokratisch organisierten und auf Dynastiebildung zielenden frühkeltischen Adelsgesellschaft einfügen. So wurde 2005 auf einem Acker nur 2,5 Kilometer südlich der Heuneburg das Grab eines mit etwa drei Jahren gestorbenen Mädchens entdeckt. Goldene Gewandspangen mit kahnförmigem Bügel und filigran verzierte Anhänger begeisterten die Fachwelt. Die auf die erste Hälfte des 6. Jahrhunderts v. Chr. datierte Beisetzung erwies sich bald als Teil eines durch die landwirtschaftliche Nutzung längst eingeebneten Großgrabhügels. Aus dessen Zentrum wurde 2010 das vollständige Zentralgrab in einer spektakulären Aktion geborgen: Die teilweise noch erhaltene Holzkammer mitsamt dem umgebenden Erdreich wurde als 80 Tonnen schwerer, 45 Quadratmeter großer Block auf einen Schwertransporter gehievt (siehe Bild S. 67 oben) und ins Labor des Landesamts für Denkmalpflege nach Ludwigsburg verfrachtet, wo es seitdem unter kontrollierten klimatischen Bedingungen Zentimeter um Zentimeter »ausgegraben« wird.

Der umfangreiche und aufwändige Goldschmuck (siehe Bild S. 67 unten) der darin bestatteten Frau weist große stilistische und handwerkliche Übereinstimmungen mit dem aus dem benachbarten Mädchengrab auf, was auf eine enge Be-



Ab dem 7. Jahrhundert v. Chr. veränderte sich offenbar die soziale Struktur der keltischen Gruppen: Hocharrangige Personen wurden mit reichen Beigaben in monumentalen Grabhügeln bestattet; auf für den Handel mit den Mittelmeerkulturen günstigen gelegenen Kuppen entstanden befestigte Siedlungen.



Auf dem französischen Mont Lassois (oben) und dem hessischen Glauberg (links; siehe auch Karte linke Seite) haben Archäologen in den letzten Jahren befestigte Zentralorte nachgewiesen und sie mit dem Computer rekonstruiert.

ziehung der beiden schließen lässt. Dabei stehen die Objekte teilweise nicht in der einheimischen, keltischen Tradition, sondern ähneln etruskischen Stücken. Vermutlich wurden diese bisher einzigartigen Schmuckstücke nicht aus Etrurien importiert, sondern von einem in den entsprechenden Handwerkstechniken versierten Goldschmied auf der Heuneburg eigens für die beiden Frauen hergestellt.

In einer Ecke der Grabkammer kam im Labor überraschend noch ein weiteres Skelett zum Vorschein – nach einer vorläufigen anthropologischen Bestimmung ebenfalls eine Frau. Sie war nur mit zwei einfachen Bronzearmringen für das Jenseits ausgestattet worden. Ob es eine Dienerin oder gar Sklavin war, die ihrer Herrin in den Tod folgen musste, oder ob sie erst später in die Grabkammer gelegt wurde, bleibt vorerst Spekulation.

Der Fundkomplex lässt aber bereits jetzt keinen Zweifel daran, dass im frühen 6. Jahrhundert v. Chr. nicht allein Männer gesellschaftliche Bedeutung besaßen. Die Elite maß offenbar auch ihren weiblichen Angehörigen und selbst Kindern einen Rang zu. Das bestätigten weitere Frauengräber der frühkeltischen Epoche, insbesondere das der »Dame von Vix« am Fuß des Mont Lassois. Um 480 v. Chr. angelegt, enthielt der 1953 entdeckte Hügel die prunkvollste Bestattung der gesamten keltischen Welt. Das größte aus der Antike erhaltene Metallgefäß – ein 1000 Liter fassender und 1,64 Meter hoher Bronzekrater, der aus dem griechischen Raum importiert worden war – unterstreicht den Rang der Verstorbenen.

Durch die Forschungen der letzten zehn Jahre ist deutlich geworden, dass die keltischen Gesellschaften nördlich der Al-

pen zwischen dem 7. und 5. Jahrhundert v. Chr. immer stärker hierarchisch organisiert waren; Hinweise auf einen übergreifenden Zusammenhang fanden sich aber nicht. Ab dem 5. und frühen 4. Jahrhundert v. Chr. zeigen sich Ansätze zur Dynastiebildung, bei denen adlige Frauen eine tragende Rolle spielten. Zentralorte mit vermutlich mehreren tausend Einwohnern wie die Heuneburg oder die Siedlung auf dem Mont Lassois bildeten den jeweils eigenständigen Mittelpunkt immer größerer Stammesverbände. Ohne eine Bevölkerungszunahme auf mehrere zehntausend Menschen wären die keltischen Wanderungen und Eroberungszüge nach Italien, auf den Balkan und bis nach Kleinasien gar nicht vorstellbar.

Wie aber wurden so große Gebilde organisiert und beherrscht? Die Führungsschicht konnte sich nicht auf ein stehendes Heer stützen. Es gibt auch keinerlei Hinweise auf eine Art Beamtenschaft in dieser Zeit, die den Willen der Mächtigen fern der Zentralorte verkündete und durchsetzte; ebenso wenig bestand die Möglichkeit, Anordnungen und Dekrete zu erlassen sowie schriftlich zu fixieren. Zudem ist fraglich, ob es in frühkeltischer Zeit bereits eine Priesterschaft gab, die stabilisierend wirken konnte. Glaubt man den Ausführungen Cäsars, verbreitete sich das Druidentum von Britannien kommend erst später auf dem europäischen Festland.

Eine Ahnung davon, wie es den frühkeltischen Gesellschaften dennoch gelang, zumindest für mehrere Generationen die Stammesverbände zu einen und die Macht in den

jeweils herrschenden Klans zu halten, gibt uns wieder die Archäologie, genauer: das um 530 v. Chr. fertig gestellte Fürstengrab von Hochdorf. Diese Anlage zielte vermutlich darauf ab, den Herrschaftsanspruch der Nachfolger des Bestatteten durch Monumentalisierung zu unterstreichen. Das Grab und die Trauerfeierlichkeiten vermittelten die Vorstellung, der Verstorbene lebe in seinem unterirdischen Haus mit allen Attributen der Macht weiter. Ein großer griechischer Bronzekessel – verziert mit drei Bronzelöwen und gefüllt mit etwa 600 Liter Met –, dazu neun Trinkhörner und Teller verweisen auf ein Gefolgschaftswesen, wie es in vorstaatlichen Gesellschaften häufig praktiziert wurde: Auch im Jenseits würde der Herrscher im Kreis seines Gefolges zechen und damit die gegenwärtige politische Ordnung weiterhin aufrechterhalten.

Inszenierung der Macht über den Tod hinaus

Außerdem symbolisierte ein ebenfalls im Grab deponiertes Ensemble von Schlachtgeräten und eine goldene Schale für Trankopfer die herausragende Rolle des Verstorbenen für Opferung und Kult. Die Personalunion von höchstem politischem und religiösem Amt war in den keltischen Gesellschaften zwingend notwendig, um die Stammesgemeinschaften zusammenhalten und gleichzeitig die eigene Position behaupten zu können. Zumal die Religion bei ihnen eine sehr große Rolle spielte: Laut Cäsar galt der Ausschluss vom Kult oder vom kollektiven Opfer neben dem Tod als härteste Strafe.

Welchen Erfindungsreichtum und welche enormen Kraftanstrengungen die führenden Adelsdynastien unternahmen, um die einmal errungene Herrschaft zu festigen, zeigt die weitere Entwicklung der Bestattungssitten. Am Glauberg in Hessen wurde in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. Chr. ebenfalls ein riesiger Grabhügel von 50 Meter Durchmesser aufgeschüttet, unter dem mindestens zwei Repräsentanten eines überregional einflussreichen Herrscherhauses bestattet wurden. Im Vergleich zu Hochdorf sind die Grabkammern jedoch von bescheidener Größe und gleichen eher Särgen. Auch sie erhielten kostbare Beigaben, doch ging es am Glauberg offenbar nicht mehr darum, gleichsam ein unterirdisches Wohnzimmer auszustatten. Während der Tote von Hochdorf einen kompletten Satz Trink- und Speisefäße mit ins Grab bekam, reichte nun jeweils eine einzige symbolhafte bronzene Prunkkanne.

Auch dass einer der Bestatteten verbrannt wurde, deutet an, dass sich etwas Grundlegendes geändert hatte. Nicht mehr die Unversehrtheit des Toten sowie die Suggestion seines Weiterlebens und die Inszenierung der Beisetzung standen im Vordergrund. Vielmehr verewigte man die Toten als lebensgroße Statuen aus Stein. Vollständig erhalten hat sich nur eine davon (gefunden wurden aber Fragmente von drei weiteren Statuen). Sie zeigt mit Schwert, Schild, Armringen, Fingerring, Halsring und einer Krone aus Blättern der heiligen Mistel exakt die gleiche Ausstattung, wie sie der unver-



Der größte heute bekannte Krater der Antike fasste ganze 1000 Liter. Entdeckt wurde die aus dem griechischen Raum stammende Importware im Grab der »Dame von Vix«, einer offenbar hochrangigen Adligen vom Mont Lassois.



Als solle der verstorbene Herrscher von Hochdorf auch im Jenseits über sein »Volk« wachen, wurde er mit allen Attributen der Macht in einer monumentalen Grabkammer beigesetzt.

brannt bestattete Mann bei seiner Beisetzung trug. Damit nicht genug, wurde der Grabhügel selbst als Mittel- und Höhepunkt einer Anlage aus kilometerlangen Wällen und Gräben konzipiert, auf den eine 350 Meter lange Prozessionsstraße zuführte.

Hier wird wie an keiner anderen Fundstätte dieser Zeit das Bestreben eines herrschenden Klans deutlich, seine Verstorbenen religiös zu überhöhen und seine Nekropole zum Zentralheiligtum eines überregionalen Verbands und damit zum Mittelpunkt einer sicherlich in die Zehntausende gehenden Bevölkerung auszubauen.

Kurz nach 400 v. Chr. scheinen jedoch nahezu alle frühkeltischen Machtzentren ihre Bedeutung verloren zu haben. Es ist gewiss kein Zufall, dass die antiken Schriftquellen für diese Epoche den Beginn der keltischen Wanderungen bezeugen. Fest steht: Im frühkeltischen Kerngebiet wurde zwischen 350 und 200 v. Chr. weder in Prunkgräbern bestattet noch existierten große, befestigte Siedlungen. Offensichtlich fielen die Bevölkerungsdichte und die gesellschaftliche Komplexität nördlich der Alpen etwa auf das Anfangsniveau zurück.

Neben klimatischen Faktoren spielte wohl die Erschöpfung der von den Kelten erstmals intensiv genutzten, aber eigentlich wenig fruchtbaren Mittelgebirgsböden eine Rolle. Um die anstehenden Probleme zu lösen, hätten neue Organisations- und Herrschaftsformen entwickelt werden müssen. Doch auch wenn Machtzentren wie die Heuneburg, der Mont Lassois oder der Glauberg im 6. und 5. Jahrhundert v. Chr. zum Teil bereits städtischen Charakter hatten, vollzogen die Kelten nicht den entscheidenden Schritt hin zur Hochkultur. Indikatoren wie Schriftlichkeit, Beamtenschaft, staatliche Gewalt und dergleichen fehlen in dieser frühen Phase komplett.

Zu einem erneuten Zivilisationsschub und einem zweiten Urbanisierungsprozess kam es nördlich der Alpen erst unter dem Einfluss des Römischen Reichs im 2. Jahrhundert v. Chr. Aus Heiligtümern und offenen Siedlungen, die zwischen 350 und 150 v. Chr. als bescheidene Zentren bäuerlicher Gesellschaften dienten, entwickelten sich vielerorts wieder befestigte Großsiedlungen, so genannte Oppida. Um 100 v. Chr. waren diese auf dem besten Weg, zu urbanen Zentren einer komplexen, arbeitsteiligen Gesellschaft mit intaktem Verkehrsnetz und florierender Geldwirtschaft heranzureifen. Doch auch dies scheiterte – diesmal an der Okkupation keltischer Siedlungsräume durch das Imperium Romanum. ☞

DER AUTOR



Dirk Krausse ist Prähistoriker und Landesarchäologe von Baden-Württemberg. Sein Forschungsschwerpunkt bildet die mitteleuropäische Eisenzeit, insbesondere die damals vollzogene Urbanisierung und Zentralisierung, sowie die Herausbildung der Eliten.

QUELLE

Archäologisches Landesmuseum Baden-Württemberg, Landesmuseum Württemberg und Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hg.): Die Welt der Kelten. Zentren der Macht – Kostbarkeiten der Kunst. Begleitband zur gleichnamigen Ausstellung. Thorbecke, Ostfildern 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1188734

Wie intelligent ist die künstliche Intelligenz?

Bislang demonstriert die KI im Wesentlichen nur, wozu geistlose Maschinen im Stande sind – das aber zunehmend erfolgreich.

VON BRIAN HAYES

In den 1960er Jahren war es nicht unüblich, Computer als »Elektronengehirne« zu bezeichnen. Das wirkt bei den beschränkten Fähigkeiten der damaligen monströsen Geräte heute geradezu rührend naiv. Aber man traute ihnen allerhand zu: »Wir stehen an der Schwelle eines Zeitalters, das durch intelligente problemlösende Maschinen nachhaltig beeinflusst, ja vielleicht sogar beherrscht wird.« So sprach 1961 Marvin Minsky, einer der Pioniere der Forschungsrichtung, die sich ohne jede falsche Bescheidenheit »künstliche Intelligenz« (KI) nannte.

In der Tat konnten die damaligen Rechner, geeignet programmiert, Dame und Schach spielen, geometrische Sätze beweisen, Analogieaufgaben aus Intelligenztests lösen und Buchstaben erkennen. Da schien es in Reichweite, sie mit jenen Fähigkeiten auszustatten, die wir an uns selbst am höchsten schätzen: logisch zu denken, Probleme zu lösen, kreativ zu sein, aus Erfahrungen zu lernen.

50 Jahre später sind problemlösende Maschinen zu selbstverständlichen Bestandteilen unseres Alltags geworden: Computerprogramme schlagen uns die günstigste Fahrtroute durch die Stadt vor, empfehlen uns Filme, die unserem Geschmack entsprechen, erkennen Gesichter auf Fotos, verwandeln gesprochene Nachrichten in Text und übersetzen Dokumente von einer Sprache in eine andere. In Dame und Schach sind sie mittlerweile unschlagbar. Selbst in der amerikanischen Fernsehshow »Jeopardy«, in der Sprachspiele und Mehrdeutigkeiten eine wesentliche Rolle spielen, schlug ein Computer haushoch die bis dahin erfolgreichsten menschlichen Teilnehmer (Bild rechts oben;

siehe auch Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 97).

Gleichwohl bleibt völlig unklar, ob diese spektakulären Erfolge auf »Denken« oder »Intelligenz« zurückzuführen sind. Denn offensichtlich lösen die Computer die Probleme auf eine völlig andere Weise, als der Mensch das durch bewusstes Denken tut. Vielleicht sollten wir weniger bestaunen, wie intelligent unsere Maschinen sind, als vielmehr, wie weit sie es ohne jede Intelligenz gebracht haben.

Diese skeptische Einstellung kommt nicht nur von außerhalb der KI. Erst jüngst beklagte Minsky selbst auf einem Mathematikerkongress, dass die KI ihre zentralen langfristigen Ziele aus dem Blick verloren habe. Ist die Forschungsrichtung vom rechten Pfad abgekommen? Oder hat sie vielleicht einen aussichtsreicheren gefunden?

Saubermänner gegen Schmutzkinder

Das ganze Unternehmen hat sehr klein angefangen: An einer ersten Konferenz im Jahr 1956 nahmen nur zehn Wissenschaftler teil. Unter ihnen waren Allen Newell und Herbert A. Simon vom Carnegie Institute for Technology in Pittsburgh (Pennsylvania), Minsky, der eben seine Karriere am MIT begann, und John McCarthy, der das MIT verließ, um ein neues Labor in Stanford zu gründen. Die frühen Werke der KI stammen zum großen Teil von diesen vier Leuten und ihren Studenten.

So klein die Gruppe war, bot sie doch allemal Platz für Zerwürfnisse und Fraktionskämpfe. Ein erster Konflikt entspann sich zwischen den »Saubermännern« (»neats«) und den »Schmutz-

delkindern« (»scruffies«). Erstere wollten alles Problemlösen auf strenge deduktive Logik nach dem Muster mathematischer Beweise zurückführen, Letztere schätzten andere Wege wie den Analogieschluss, Metaphern oder das Lernen aus Beispielen. McCarthy war ein Saubermann, Minsky gehörte zu den Schmutzkindern.

Eine noch ältere und tiefere Kluft trennt den »symbolischen« vom »konnektionistischen« Zugang zur KI. Sind die elementaren Bausteine des Denkens Ideen, Aussagen und ähnliche Abstraktionen, die wir mit Worten oder – allgemeiner – mit Symbolen zu bezeichnen pflegen? Oder entsteht unsere geistige Aktivität als »emergente Eigenschaft« aus Aktivitätsmustern in (natürlichen oder künstlichen) neuronalen Netzen (Spektrum der Wissenschaft 11/1992, S. 134, und 3/2013, S. 28)? Anders ausgedrückt: Ist der eigentliche Gegenstand der KI der Verstand oder doch eher das Gehirn?

Wenn es das Gehirn ist, gehört dann nicht auch die Verbindung mit der Außenwelt dazu, mit Sinnesorganen zum Wahrnehmen und Muskeln zum Handeln? So gesehen, wäre KI ein Zweig der Robotik. Für die »Symboliker« dagegen braucht eine denkfähige Maschine etwas, worüber sie nachdenken kann. Also müsste man vor allem (Alltags-)Wissen in einer Form kodieren, in der es der Computer verarbeiten kann (Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 94).

Und schon sind wir bei der hochphilosophischen Frage, ob Intelligenz auf künstlicher Basis überhaupt möglich ist. Einige Skeptiker sind der Meinung, menschliches Denken sei seinem Wesen nach nichtalgorithmisch. Also kön-



PICTURE ALLIANCE / AP IMAGES / SETH WENIG

Mensch gegen Maschine: Im Februar 2011 schlug der eigens für diesen Zweck gebaute Computer »Watson« vor den Augen des Fernsehpublikums in der Quizshow »Jeopardy« haushoch die bisherigen Spitzenspieler Ken Jennings und Brad Rutter. Aber ob man diese Leistung auf »Intelligenz« zurückführen kann, bleibt zweifelhaft.

ne eine Maschine, die einen Algorithmus ausführt – sprich ein Computer –, niemals alles reproduzieren, was in einem Gehirn vor sich geht. Debatten dieser Art pflegen nicht durch Klärung der Angelegenheit zu enden, sondern wegen der Erschöpfung der Teilnehmer.

Während sich die KI in den 1970er Jahren im Wesentlichen auf kleinere Machbarkeitsstudien beschränkt hatte, folgte in den 1980ern eine Sturm-und-Drang-Phase, als die »Expertensysteme« auf engen Spezialgebieten wie der medizinischen Diagnostik oder der Erkundung von Rohstoffvorräten spektakuläre Erfolge einfuhren. Aber die Blüte war kurz, die Geldquellen versiegten, und die KI verfiel in einen langen Winterschlaf.

Offensichtlich erlebt sie gegenwärtig so etwas wie einen zweiten Frühling. Als Peter Norvig und Sebastian Thrun von der Stanford University 2011 einen Einführungskurs in die KI für jedermann zugänglich im Internet anboten, meldeten sich weltweit 160 000 Teilnehmer an, und immerhin 23 000 bestanden die

Abschlussprüfung. Das Erwachen geht einher mit neuen Softwaretechniken und einer neuen Einstellung: Intelligente Maschinen sind nicht mehr nur ein Zukunftstraum, sondern eine praktisch anwendbare Technik. Das möchte ich durch den Vergleich damals gegen heute an drei Anwendungen illustrieren: Brettspiele, Übersetzen von Texten sowie Beantworten von Fragen in natürlicher Sprache.

Damespiel mit System

Eine der frühesten Erfolgsgeschichten der KI handelt vom Damespiel. Genauer geht es um die amerikanische Variante »Checkers«, die sich von der bei uns bekannten dadurch unterscheidet, dass eine Dame in der Diagonalen nicht beliebig, sondern nur ein Feld weit gezogen werden darf. Das führt taktisch vor allem im Endspiel zu erheblichen Unterschieden.

Arthur L. Samuel von IBM schrieb in den frühen 1950er Jahren ein Programm für Checkers und entwickelte es in den folgenden 20 Jahren immer wie-

der ein Stück weiter. Das Programm spielte bemerkenswert gut – schon sehr früh konnte es seinen Schöpfer schlagen –; vor allem aber lernte es sehr ähnlich wie ein Mensch, indem es gegen verschiedene Gegner spielte, darunter sich selbst, und aus seinen Siegen und Niederlagen Schlüsse zog.

Samuels Programm arbeitet mit einer Hierarchie aus Zielen und Teilzielen. An deren Spitze steht eine Gewinnstellung, also eine, die dem Gegner keinen erlaubten Zug mehr lässt. Darüber hinaus findet das Programm durch Lernen aus Erfahrung Teilziele, die sind Stellungen, die das Erringen des jeweils übergeordneten Ziels erleichtern, und strebt diese während des Spiels an. Erfahrene Spieler erlebten das Programm als einen Gegner, dem vor allem eine »durchgängige Strategie« oder ein »konsequenter Plan« fehlte.

Nach langer Pause gelang ab 1989 Jonathan Schaeffer und seinen Kollegen an der University of Alberta der Durchbruch auf Weltmeisterniveau. Ihr Programm »Chinook« spielte zweimal gegen den langjährigen Checkers-Weltmeister Marion Tinsley (1927–1995). Der war ein so überragender Spieler, dass er zwischen 1950 und 1994 jedes Turnier gewann, an dem er teilnahm. Während Tinsley 1992 noch 4:2 – bei 33

Unentschieden – gegen Chinook gewann, musste er die Revanche zwei Jahre später nach sechs Unentschieden wegen einer Erkrankung aufgeben; sieben Monate später starb er.

Chinook arbeitet nicht mit Zielen und Teilzielen; es versucht auch gar nicht erst, in irgendeinem Sinn strategisch zu denken. Seine Stärken liegen allein in einer umfangreichen Datenbank und dem hohen Rechentempo. Zur Zeit des zweiten Tinsley-Wettkampfs prüfte das Programm bereits Folgen von bis zu 19 Halbzügen. (Bei Brettspielen zählt man als einen »Zug« das Paar aus der Aktion des einen Spielers und der folgenden Aktion seines Gegners. Ein Halbzug ist also einfach das Setzen eines Spielsteins durch einen der Spieler.) Chinook verfügte über eine Datenbank mit 60 000 Eröffnungen und vollständigen Endspielen aus jeder Spielstellung mit acht oder weniger Steinen auf dem Brett – das sind insgesamt 443 748 401 247.

Mittlerweile versuchen Schaeffer und seine Kollegen nicht mehr, noch bessere Spielprogramme zu entwickeln, sondern »das Spiel zu lösen«, das heißt eine allgemeine Gewinnstrategie zu finden. Nach einer Serie von Berechnungen erklärten sie 2007 das Spiel Checkers für »schwach gelöst«. Das heißt, es gibt eine Zugfolge von der Ausgangsposition bis zum Ende (das sich als Unentschieden herausstellt), die beweisbar

optimal ist in dem Sinn, dass es keinem der Spieler einen Vorteil bringt, irgendwann von dieser Zugfolge abzuweichen. Im Gegensatz zu dieser schwachen Lösung würde eine »starke« Lösung für jede erlaubte Spielstellung eine optimale Zugfolge angeben. Zum vollständigen Beweis gehört eine Bibliothek aller Endspiele für Stellungen mit zehn oder weniger Steinen auf dem Brett – insgesamt fast 40 Billionen.

Schaeffer selbst bemerkt, dass sein Programm nicht viel über das Spiel wissen muss: »Vielleicht ist der wichtigste Beitrag der KI-Techniken zur Entwicklung von Spieleprogrammen die Erkenntnis, dass ein suchintensives (»gewaltsames«) Vorgehen schon bei minimalem Anwendungswissen Höchstleistungen vollbringen kann.«

Es ist also möglich, ein Spiel zu gewinnen, ohne es zu verstehen; aber was lernen wir daraus? Arthur L. Samuel wollte nicht vorrangig einen unschlagbaren Spieler schaffen, sondern etwas darüber erfahren, wie der Mensch spielt – und damit etwas über das Lernen selbst. Fortschritte in Richtung auf dieses weiter gefasste Ziel hätten Konsequenzen weit über die Welt der Brettspiele hinaus.

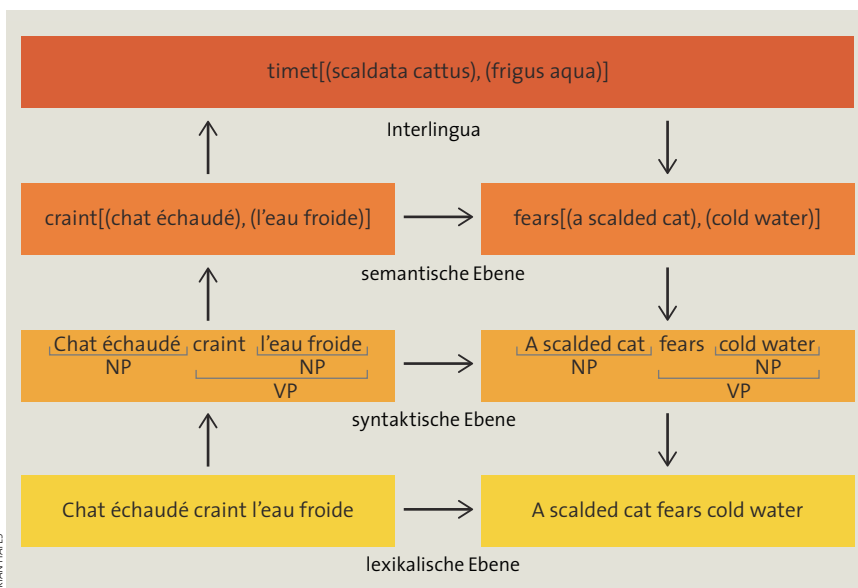
Dem ist allerdings zu entgegnen, dass gewaltsame (»brute-force«) Verfahren wie das von Chinook nicht ein belangloser Trick zum Gewinnen von Spielen sind, sondern höchst erfolg-

reich in einer Fülle anderer Gebiete zur Anwendung kommen. Schaeffer verweist unter anderem auf Bioinformatik und Optimierung. Das anthropozentrische Leitbild, dem zufolge Computerprogramme sich menschliche Denkmuster zum Vorbild nehmen sollten, war bisher deutlich weniger fruchtbar.

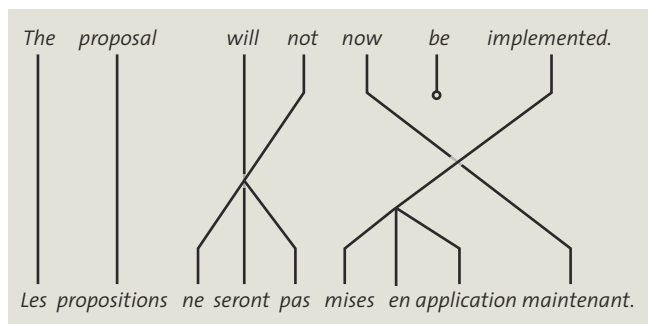
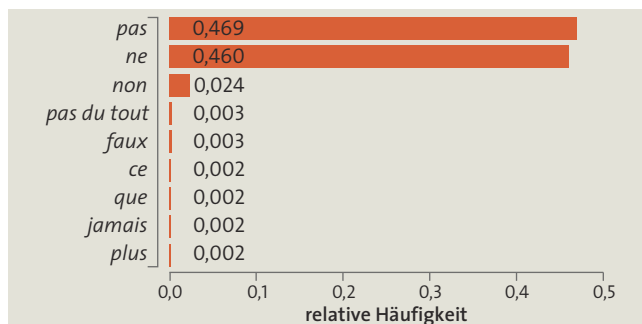
»Der Wodka ist stark«

Das gilt auch für Programme zur automatischen Übersetzung in andere Sprachen. Erste Vorläufer entstanden bereits in den 1950er Jahren. Die einfachste Version war im Wesentlichen ein automatisiertes Lexikon: Die Maschine ersetzte jedes einzelne Wort des zu übersetzenden Textes der Reihe nach durch einen oder mehrere Einträge in diesem Verzeichnis. Angeblich wurde mit diesem Verfahren der Satz »The spirit is willing but the flesh is weak« (»Der Geist ist willig, aber das Fleisch ist schwach«) ins Russische und wieder zurück ins Englische übersetzt, mit dem Ergebnis »The vodka is strong but the meat is rotten« (»Der Wodka ist stark, aber das Fleisch ist vergammelt«). Die Geschichte ist zwar erfunden; aber sie ist gut erfunden. Die Ergebnisse dieser schlichten Ersetzung nach dem Wörterbuch waren so unbrauchbar, dass das Verfahren bald aufgegeben wurde.

Spätere Programme arbeiteten mit linguistischen Strukturen höherer Stufen – Satzgliedern oder ganzen Sätzen



Klassische Übersetzungsprogramme führen eine mehrstufige Analyse des vorgelegten Satzes durch. Dabei berücksichtigen sie nicht nur einzelne Wörter (die lexikalische Ebene), sondern auch höhere grammatische Strukturen wie Nominal-(Substantiv-) und Verbphrasen (NP und VP) sowie die Semantik, also Wortbedeutungen. An der Spitze der Hierarchie befindet sich die »Interlingua«, die eine sprachunabhängige Darstellung der Bedeutung bieten soll. Die hier abgebildete Übersetzung vom Französischen ins Englische wurde mit Hilfe des Programms Google Translate ausgeführt. Auch die als Vertreter für Interlingua-Begriffe gewählten lateinischen Ausdrücke stammen aus dieser Quelle.



Übersetzung mit statistischen Mitteln (links): Auf der Suche nach französischen Entsprechungen für das englische Wort »not« zählt das Programm einfach aus, welche Wörter besonders oft in französischen Versionen englischer Sätze mit dem Wort »not« vorkommen. Die höchsten Punktzahlen erreichen »ne« und »pas« – die übliche Form der französischen Verneinung. Der letzte Schritt eines statistischen Übersetzungsalgorithmus bestimmt die Wortreihenfolge, ebenfalls mit statistischen Mitteln (rechts). Diese Beispiele stammen aus einem Artikel von Peter F. Brown und Kollegen von 1990. Dem Verfahren liegt eine zweisprachige Sammlung kanadischer Parlamentsprotokolle zu Grunde.

ze fürchtet das kalte Wasser«) ins Englische zu übersetzen. Wir nehmen dazu ein Wort des Textes nach dem anderen, greifen aus unserer Sammlung alle französischen Sätze heraus, in denen dieses Wort vorkommt, und zählen in allen zugehörigen englischen Sätzen die Häufigkeit der Wörter.

anstatt einzelner Wörter. In den frühen 1970er Jahren schrieb Yorick Wilks, damals in Stanford, ein Programm für Übersetzungen vom Englischen ins Französische, das explizit versucht, einige Denkprozesse eines menschlichen Übersetzers zu reproduzieren (Bild links): Es zerlegt einen Satz in einzelne Phrasen (Satzteile), versucht, den Wörtern anhand des lokalen Kontextes Bedeutungen zuzuweisen, und erzeugt daraus entsprechende Phrasen in der Zielsprache. Wilks' Projekt kam über einen Prototyp nicht hinaus; dagegen entwickelte sich »SYSTRAN«, 1968 von Peter Toma begründet, von einem simplen Wörterbuchprogramm zu einem reichhaltigen System mit zahlreichen Komponenten. Bis vor Kurzem machte dieses Programm die Arbeit für den bekannten Internet-Übersetzungsdienst »Babel Fish«, dessen Leistungen bei den Anwendern je nach deren Erwartungen große Bewunderung oder großes Gelächter zu erregen pflegten.

aus einer großen Sammlung zweisprachiger Texte ermittelt wurden. Erste Arbeiten über diesen statistischen Zugang stammen von Peter F. Brown und seinen Kollegen bei IBM, die ähnliche Methoden bereits bei Problemen der Spracherkennung eingesetzt hatten. Heute liegt dieses Verfahren den Übersetzungsdiensten sowohl von Google als auch von Microsoft zu Grunde.

Wenn wir das mit dem französischen Wort »chat« tun, wird mit großer Sicherheit das englische Wort »cat« an der Spitze der Häufigkeitsliste stehen. Bei »craint« wird das Ergebnis nicht so eindeutig sein; vielleicht konkurrieren hier »fears«, »dreads« oder »afraid« um die Spitzenplätze. In anderen Fällen bietet sich möglicherweise überhaupt kein Wort an. Aber wenn man alle Wörter nimmt, deren Häufigkeit über einem geeignet gewählten Schwellenwert liegt, ergibt sich zumindest eine Liste aussichtsreicher Kandidaten für die Übersetzung (Bild oben, links).

Da müssten jedem Sprachlehrer die Haare zu Berge stehen. Was soll das bringen, all das, was man sich mühsam im Sprachunterricht angeeignet hat – Vokabeln, Konjugationen, Grammatik –, einfach nicht zu verwenden? Na ja – dieses ganze Wissen steckt implizit in jeder hinreichend großen Textsammlung und sollte sich daraus auch extrahieren lassen; schließlich haben die Grammatiker und Wörterbuchschreiber nichts anderes gemacht. Als Quelle bieten sich insbesondere mehrsprachige Dokumente an, wie sie zum Beispiel von amtlichen Stellen in Kanada und der Europäischen Union erstellt werden.

Jetzt müssen wir die so ausgewählten Wörter noch zu einem korrekten englischen Satz anordnen. Das geht wieder mit einer Statistik; aber diesmal bestimmen wir nicht die Häufigkeiten einzelner Wörter, sondern kurzer Wortfolgen (so genannter *n*-Gramme) in englischen Texten. Die Übersetzung besteht dann aus den Wörtern in der Reihenfolge, die nach dieser Statistik als die wahrscheinlichste anzusehen ist (Bild oben, rechts).

In den letzten Jahren hat ein völlig anderer Zugang zur maschinellen Übersetzung weitaus mehr Aufmerksamkeit und Begeisterung erregt. Das Programm schert sich nicht um grammatische Strukturen oder Wortarten – noch nicht einmal um die Bedeutung einzelner Wörter. Stattdessen arbeitet es mit Korrelationen zwischen Wörtern, die

Nehmen wir an, wir hätten eine große Zusammenstellung kanadischer Amtstexte vorliegen, korrekt zerlegt in Paare einander entsprechender englischer und französischer Sätze. Mit diesem Hilfsmittel sollen wir das französische Sprichwort »Chat échaudé craint l'eau froide« (wörtlich: »Verbrühte Kat-

Echte statistische Übersetzungsprogramme arbeiten nicht ganz so simpel. Vor allem die Anordnung der gefundenen englischen Wörter erfolgt in einem komplizierteren Prozess, der mit der französischen Abfolge beginnt und Einschübe, Streichungen sowie Vertauschungen zulässt. Dennoch: Bedeutungen oder grammatische Strukturen spielen keine Rolle. Deshalb erscheint es

wie ein kleines Wunder, wenn auf diesem Weg Sinnvolles entsteht. Für den Satz »Chat échaudé craint l'eau froide« schlägt Google Translate »A scalded cat fears cold water« vor. Mein Französischlehrer hätte für diese Antwort die volle Punktzahl gegeben.

Aber was hat dieses merkwürdige Verfahren mit menschlicher Sprache zu tun? Genau wie im Fall der Spielprogramme bin ich versucht einzuwenden, der Computer habe das Problem zwar gelöst, aber das Thema verfehlt. Jedenfalls arbeitet ein menschlicher Übersetzer erheblich komplexer: Er sucht nicht statistische Korrelationen, sondern will Bedeutungen oder sogar Stimmungen und Absichten wiedergeben. Im vorliegenden Fall würde er vielleicht bemerken, dass es sich um ein Sprichwort handelt, und ein entsprechendes an dessen Stelle setzen: »Once burnt, twice shy« oder im Deutschen »Gebranntes Kind scheut das Feuer«. Aber wie soll ein Programm, das nichts weiter tut, als Sym-

Natürlich zählen die Kinder beim Spracherwerb keine Häufigkeiten von n -Grammen aus; aber Wörterverzeichnisse und Konjugationstabellen brauchen sie auch nicht! Wenn man es genau betrachtet, hat unsere Sprachenerfahrung mehr Ähnlichkeit mit der statistischen Vorgehensweise als mit der Anwendung auswendig gelernter Regeln – auch wenn das in der Schule ganz anders aussieht.

Frage und Antwort

In einem dritten Bereich der KI müssen sich die Fantasie der Softwareentwickler und die hohe Rechenleistung moderner Computer erst noch bewähren. Die scheinbar simple Aufgabe besteht darin, eine in der Alltagssprache formulierte Frage zu beantworten.

Wenn wir heute etwas wissen wollen, legen wir einer Internet-Suchmaschine wie Google oder Bing einen Suchbegriff vor (nennen wir ihn X) und haben damit sehr häufig Erfolg. Aber genau ge-

Oren Etzioni und seinen Kollegen an der University of Washington in Seattle. Verschiedene von dieser Gruppe geschriebene Programme finden ihre Antworten in einer umfangreichen Sammlung von Texten, darunter einer Momentaufnahme des gesamten Internets, die Google zur Verfügung stellte. Auf openie.cs.washington.edu ist eine Demoversion verfügbar. Die Programme bieten dem Nutzer eine Struktur-schablone der Form »Subjekt Prädikat Objekt«. Lässt man eines der drei Felder frei, dann bestimmt das System alle dafür passenden Einträge aus seiner Textbibliothek. So führt die Frage »____ schlug die Red Sox« zu einer Liste mit 59 Einträgen. Leider gibt es auf »____ schlug die Red Sox am 5. Juli 1960« keine Antwort.

Die Schwächen des Systems offenbaren sich in krasser Weise bei der un-schuldigen Frage »____ is part of Germany«. Statt der deutschen Bundesländer kommen auf den ersten Plätzen Österreich und das Elsass; mit großem Abstand folgen Schlesien, Bayern und das Rheinland, Letzteres punktgleich mit Frankreich. Und das nicht etwa, weil das Programm vorzugsweise revanchistische Quellen auswertete, sondern weil es offensichtlich nicht zwischen Aussagen in der Gegenwart und solchen in der Vergangenheit unterscheidet.

KnowItAll befindet sich noch in der Entwicklung, einige andere Frage-Antwort-Systeme wurden aber bereits veröffentlicht. »TrueKnowledge« analysiert in Alltagssprache formulierte Fragen und sucht Antworten in einer handgemachten semantischen Bibliothek. ask.com kombiniert die Beantwortung von Fragen mit der herkömmlichen Suche nach Stichworten im Internet. Apple bietet den Dienst »Siri« auf iPhone und iPad an. »Wolfram Alpha« ist auf quantitative und mathematische Themen spezialisiert. Bis auf Siri habe ich alle diese Dienste ausprobiert – mit insgesamt eher frustrierenden als erfreulichen Ergebnissen.

Da war »Watson« schon ein ganz anderes Kaliber. Das von einem Team von IBM und der Carnegie Mellon University unter David Ferrucci geschaffene

»Wie soll ein Programm, das nur Symbole manipuliert, erkennen, dass es in dem Satz »Chat échaudé craint l'eau froide« nicht um eine Katze geht?«

bole zu zählen und herumzuschieben, merken, dass es in dem französischen Satz nicht wirklich um eine Katze geht?

Andererseits: Unterscheiden wir uns so fundamental von einem Computer, der lange Listen von Satzpaaren abklappert? Wie haben wir denn die feinen Bedeutungsunterschiede zwischen Wörtern oder die komplizierten Regeln der Satzbildung gelernt? Eben nicht durch das Studium von Wörterbüchern und Grammatiken, jedenfalls nicht in unserer Muttersprache. Als kleine Kinder haben wir durch Hören und Sprechen, später auch durch Lesen und Schreiben Bedeutung und Grammatik aus einem Korpus von Texten erschlossen, ebenso wie ein statistisch vorgehendes Übersetzungsprogramm. Die Glücklichen unter uns, die mehrsprachig aufwachsen, erleben das in verschiedenen Sprachen zugleich, noch dazu mit fließenden Übergängen zwischen ihnen.

nommen beantwortet eine Suchmaschine nur Fragen des Typs »Welches Dokument im Internet erwähnt X ?«. Die Fragen, auf die wir Antworten suchen, sind erheblich vielgestaltiger.

Eines der frühesten Fragebeantwortungsprogramme war »Baseball«, geschrieben um 1960 von Bert F. Green Jr. und drei Kollegen am MIT. Es verstand und beantwortete Fragen wie »Gegen wen haben die Red Sox am 5. Juli 1960 verloren?« – für die damalige Zeit eine beeindruckende Leistung, wenn auch nur für einen sehr engen Themenbereich: eine einzige Saison von Profibaseballspielen. Außerdem war die Form der Fragen stark eingeschränkt. Eine Frage wie »Welche Mannschaft hat die meisten Spiele gewonnen?« war bereits außer Reichweite.

Einen Eindruck vom aktuellen Stand der Forschung gibt ein Projekt mit dem treffenden Namen »KnowItAll« von

System wurde durch seine Teilnahme an der Fernsehshow »Jeopardy« berühmt. Sein glänzender Sieg über zwei bis dahin sehr erfolgreiche menschliche Teilnehmer in drei Shows im Februar 2011 war einfach überwältigend. Allerdings geht selbst aus Ferruccis Erläuterung der inneren Architektur von Watson nicht klar genug hervor, wie das Programm arbeitet. Zu welchem Teil verdankt es seinen Erfolg der semantischen Analyse und zu welchem Teil der oberflächlichen Stichwortordnung oder statistischen Methoden? Dachte Watson über die Eigenschaften von 12-Stunden-Uhren in einer 24-Stunden-Welt nach, als es die korrekte Frage zu »Selbst kaputt stimmt es zweimal am Tag« nannte? Oder stolperte es nur über die Phrase »stimmt zweimal am Tag« in einer Liste von Rätselfragen, an denen sich Achtjährige vergnügen?

In einem 2011 erschienenen Artikel in »Nature« bemerkt Etzioni: »Was den Paradigmenwechsel von der Informa-

tionsammlung hin zur Beantwortung von Fragen verhindert, ist anscheinend ein merkwürdiger Mangel an Ehrgeiz und Fantasie.« Das sehe ich anders. Nach meiner Meinung tritt die Bedeutungsanalyse auf der Stelle, weil die simple Stichwortsuche, so oberflächlich und unscharf sie auch ist, so gut funktioniert. Im Fall meiner Baseballfrage führte mich Google direkt zur Antwort: Am 5. Juli 1960 verloren die Red Sox gegen die Orioles, und zwar 9 : 4.

Dass die KI mit ihren »oberflächlichen« Methoden von Erfolg zu Erfolg stürmt, ist für mich erregend und verwirrend zugleich. Erregend, weil die Algorithmen funktionieren und Dinge können, die wir nicht zu träumen gewagt hätten. Verwirrend, weil sie eigentlich nicht funktionieren dürften und wir jetzt in der Verlegenheit sind, das auch noch zu erklären. Vielleicht kehren wir auf diesem Weg zu genau den tieferen Fragen zurück, vor deren Vernachlässigung uns Minsky warnt. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

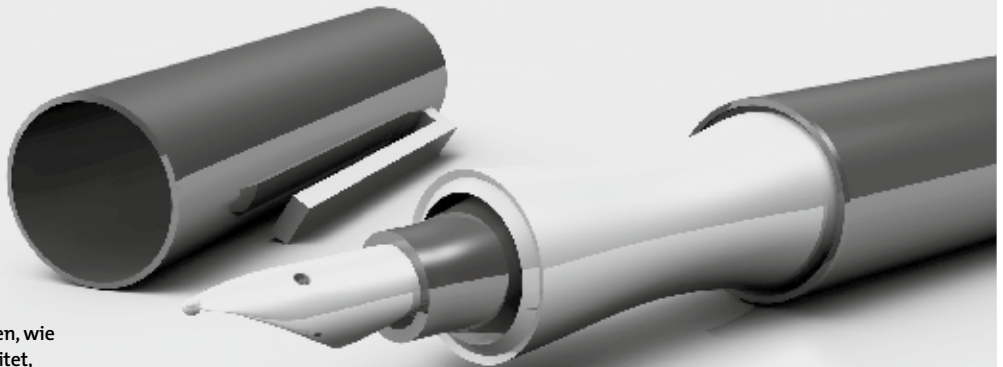
- McCorduck, P.:** Denkmachines. Die Geschichte der künstlichen Intelligenz. Pearson Education, München 1990
Minsky, M.: Steps toward Artificial Intelligence. In: Proceedings of the IRE 49, S. 8–30, 1961
Russell, S. J., Norvig, P.: Künstliche Intelligenz. Pearson Studium, München, 3., aktualisierte Auflage 2012

WEBLINK

Diesen Artikel, weitere Literaturhinweise sowie Weblinks finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192459

© American Scientist

DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT



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

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Weitere Informationen und Anmeldeöglichkeit

www.spektrum.de/schreibwerkstatt

Workshop-Termin:
13. Juli 2013, 10.00 – ca. 15.00 Uhr

Ort: Heidelberg

Teilnahmegebühr: € 99,-



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

www.spektrum.de/schreibwerkstatt

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



ÖKOLOGIE

Schutz für Tier und Mensch

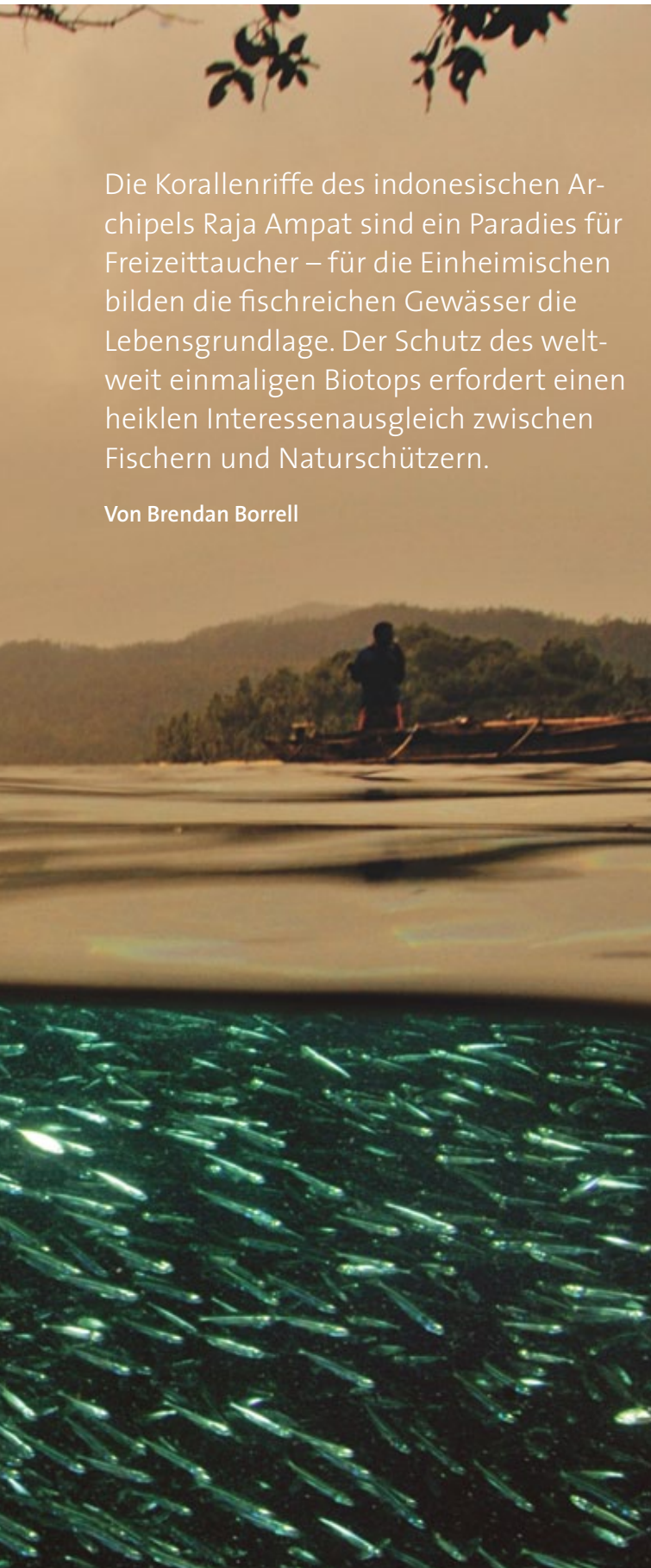


In hölzernen Auslegerbooten durchstreifen Fischer die artenreichen Gewässer zwischen den Inseln von Raja Ampat. Naturschutz funktioniert hier, weil die Einheimischen ihn zu ihrer Sache machen.

DAVID DOUBILET

Die Korallenriffe des indonesischen Archipels Raja Ampat sind ein Paradies für Freizeittaucher – für die Einheimischen bilden die fischreichen Gewässer die Lebensgrundlage. Der Schutz des weltweit einmaligen Biotops erfordert einen heiklen Interessenausgleich zwischen Fischern und Naturschützern.

Von Brendan Borrell



Laautos gleitet das Auslegerkanu mit der Laterne am Bug ins windstille Meer hinaus. Dortheus Mentasan, ein schwächlicher Mann, führt das Paddel ruhig und präzise. Er sieht sich als Nachkomme des ersten Stamms, der einst die Mayalibit Bay in der entlegenen indonesischen Inselgruppe Raja Ampat besiedelte. Wolken verbergen den Mond, aber der erfahrene Fischer findet sich auch so zurecht.

Bald tauchen im Schein der Laterne einige Makrelen auf, entschwinden und kehren wieder. Dortheus treibt seine Beute zu einem Spalt in den Kalksteinfelsen, wo rötlich braune Steine eine seichte Falle bilden. Das Wasser brodeln, als zwei Dutzend glitzernde Fische wild um sich schlagen. Er steigt in den knöcheltiefen Tümpel und schöpft die Tiere mit einem dreieckigen Netz ins Kanu, wo sie noch mehrere Minuten lang gegen die Holzwände trommeln.

Mit dieser Methode, bei der die Lampe den Orientierungssinn der Makrelen verwirrt, fangen einige Dorfbewohner geradezu Unmengen; doch Dortheus nimmt nur, was er braucht. »Ich versuche, ein Beispiel zu geben«, erklärt er. Die Überfischung im Laichgebiet habe die Bestände schon gefährlich dezimiert.

Seit zwei Jahren untersagt sein Dorf den Fang in einer nördlich gelegenen Zone. Zudem fordert die Kirche die Dorfbewohner auf, nicht am Samstag zu fischen, damit einige Makrelen laichen können. Die Maßnahmen sind Teil einer größeren Initiative, mit der die Einheimischen die natürlichen Ressourcen pflegen und die Artenvielfalt schützen sollen. Denn aus vielen Rückschlägen haben Naturschützer eines gelernt: Wenn man die örtliche Bevölkerung nicht einbezieht, sondern ihr von oben Maßnahmen diktiert, wird sie die neuen Regeln heimlich umgehen oder gar offen brechen. In Raja Ampat mit seinen Hunderten von Inseln, Korallenriffen und Mangrovensümpfen haben Umweltschützer diese Idee radikal umgesetzt, indem sie einzelnen Personen wie Dortheus helfen, Führungsrollen zu übernehmen, Naturschutzprogramme zu entwickeln, den Ressourcenverbrauch zu überwachen und Schutzbestimmungen durchzusetzen.

AUF EINEN BLICK

FISCHER SCHÜTZEN FISCHE

- 1** Die Anzahl der **Meeresschutzgebiete**, die insbesondere das Fischen einschränken, nimmt ständig zu. Sie **dienen dem Artenschutz**, doch ob sie auch den Einheimischen nützen, wurde bisher kaum erforscht.
- 2** In **Raja Ampat**, einem Archipel mit Hunderten von Inseln, Korallenriffen und Mangrovensümpfen in Indonesien, wird die **Rolle der lokalen Bevölkerung** im Umweltschutz derzeit intensiv untersucht.
- 3** Wie sich zeigt, sind **kleinere Reservate vorteilhafter**, da die örtlichen Fischer sie nachhaltiger schützen können. Vor allem müssen **die Einheimischen selbst** den Gewässerschutz organisieren; andernfalls unterlaufen sie die Schutzbestimmungen und lassen Ortsfremde im Fischreservat wildern.

Mit Beteiligung der Ortsansässigen möchte man das extrem artenreiche Korallendreieck, das sich von Bali bis zu den Salomon-Inseln und den Philippinen erstreckt, schützen und erhalten, ohne die dort lebenden Menschen um Arbeit und Nahrung zu bringen. Jahrelang haben Naturschützer letzteren Aspekt sträflich vernachlässigt. Die großen neuen Meeresschutzgebiete in Raja Ampat und um die Vogelkop-Halbinsel bilden daher einen wichtigen Testfall. Und es zeigen sich Erfolge: Seit die Einheimischen stärker beteiligt werden, halten sie sich an die Schutzregeln. Doch das erzeugt Konfliktstoff mit Eindringlingen, welche die Zonen wie früher Gewinn bringend abfischen möchten.

Schutzgebiete liefern globalen Konfliktstoff

Das Experiment ist wichtig, denn mit der 1992 von den Vereinten Nationen in Rio de Janeiro beschlossenen Biodiversitätskonvention haben sich über 150 Staaten verpflichtet, bis 2020 zehn Prozent der Weltmeere zu schützen – und davon sind viele von Fischfang lebende Gemeinden betroffen. Der World Wide Fund for Nature (WWF) arbeitet mit der indonesischen State University of Papua in Manokwari zusammen, um zunächst bis 2014 zu beobachten, wie sich die Vogelkop-Schutzzonen auf Gesundheit, Wohlstand, Bildung und Kultur in den Dörfern auswirken. »Zählen im Schutzgebiet die Fische mehr als die Fischer?«, fragt Michael B. Mascia, Direktor für Sozialwissenschaften beim WWF. »Dieser globale Konfliktstoff ist noch nicht gründlich erforscht.«

Die Fachliteratur und Broschüren der Naturschutzorganisationen unterstellen stillschweigend einen sozial segensreichen Effekt von Meeresschutzzonen. Doch wenn sich die Schutzbestimmungen für die Menschen negativ auswirken oder einfach ignoriert werden, müssen schleunigst bessere Strategien her, um sowohl die Meere als auch die Nahrungsversorgung zu erhalten. Schon die ersten Vogelkop-Daten deuten an, dass mit diesem groß angelegten Versuch eine neue Ära in der Bewertung von Schutzmaßnahmen beginnt.

Als Mascia Ende der 1990er Jahre an der Duke University in Durham (North Carolina) Umweltpolitik studierte, war der Naturschutz des Festlands dem der Ozeane noch um Lichtjahre voraus. Costa Rica beispielsweise hatte 26 Prozent seiner Landfläche unter Schutz gestellt, aber weniger als ein Prozent seiner Gewässer. Als Biologe und Umweltwissenschaftler ist Mascia davon überzeugt, dass die Ozeane besonderen Schutz verdienen, um die Artenvielfalt zu erhalten und den Kollaps der Fischerei zu verhindern, von der mehr als eine Milliarde Menschen leben. Auch will er Naturschützer und Regierungen davor bewahren, alte Fehler zu wiederholen – etwa die lokale Bevölkerung gewaltsam aus den Schutzgebieten zu vertreiben oder den Zugang zu ihren Ressourcen einzuschränken. Solche Zwangsmaßnahmen treffen allzu oft die Allerärmsten. Der alternative Ansatz lautet: Örtliche Gemeinden verwalten eigene Ressourcen. Er zeigte bereits bei der Holzproduktion in Indien und bei Wasserrechten in Südamerika erste Erfolge. Nachhaltige Verfahren beginnen damit nun auch, stärker die Menschen zu berücksichtigen.

Doch an Land erfolgreiche Projekte lassen sich nicht ohne Weiteres auf die Ozeane übertragen. Wälder können leicht markiert und überwacht werden, aber begehrte Nutzfische wie Tunfisch und Makrele schwärmen über enorme Entfernungen aus. Und abgeschieden lebende Fischer mit Einbäumen können gegen hochmobile Eindringlinge mit großen Schiffen und industrieller Fangtechnik wenig ausrichten.

Meeresschutzgebiete schränken generell den Zugang ein; sie enthalten Zonen, aus denen nichts entnommen werden darf oder deren Betreten überhaupt untersagt ist. In Mascias Worten: Sie legen fest, wer was, wann, wo und wie tun darf. Doch nicht immer ist klar, wer die Regeln definiert, wer sie durchsetzt und wer davon profitiert. Darum fand der WWF-Direktor, die Auswirkungen auf die menschlichen Gemeinschaften müssten genauer erforscht werden – und kam auf Raja Ampat als Testgebiet.



Im indonesischen Archipel Raja Ampat (»Vier Könige«) gibt es bereits drei geschützte Gebiete (blaue Bezeichnungen). Bei vier weiteren Meeresschutzgebieten (rot) wird derzeit untersucht, ob die Einbeziehung örtlicher Anführer den Einheimischen Vorteile bringt und zugleich den Artenschutz fördert. Die Ausdehnung der Schutzgebiete ist grau markiert.



SIEMENS



Menschen suchen ihre Zukunft in Städten, die heute schon an morgen denken.

Deutschland geht neue Wege. Mit Antworten für nachhaltige Stadtentwicklung.

München wächst schneller als jede andere Stadt in Deutschland: In den vergangenen sechs Jahren sind mehr als 100.000 Menschen an die Isar gezogen. Aber in München wächst nicht nur die Zahl der Einwohner. Die Stadt hat ehrgeizige Ziele – für den Wirtschaftsstandort und für die Lebensqualität der Menschen.

Modernste Verkehrsleittechnik und ein gut ausgebautes Nahverkehrsnetz halten die Stadt in Bewegung und entlasten dabei die Umwelt. Intelligente Gebäudetechnik spart Energie – bei

Neubauten und bei der Modernisierung bestehender Häuser. Und sichere und wirtschaftliche Stromnetze binden mehr Energie aus erneuerbaren Quellen ein und sorgen dafür, dass sie genau dort zur Verfügung steht, wo sie gebraucht wird. So wächst nicht nur die Wirtschaftskraft, sondern auch die Lebensqualität.

Die Antworten für nachhaltige Stadtentwicklung sind da. Und die Zeit für neue Wege ist jetzt. Denn die Welt von morgen braucht unsere Antworten schon heute.

siemens.com/answers

Die Inselgruppe Raja Ampat beherbergt 70 Prozent aller Korallenarten weltweit. Sie fasziniert daher Umweltschützer und Freizeittaucher gleichermaßen.

GETTY IMAGES / REINHARD DIRSCHERL



Schon gegen Ende der 1990er Jahre hatte Mascia 42 Meeresschutzgebiete in der Karibik analysiert und festgestellt, dass die Menschen nur in einem Drittel dieser Zonen vom Fischen leben konnten. Gemäß einer weltweiten Folgestudie blieb die Nahrungssicherheit nach Einrichten eines Schutzgebiets zwar meist stabil oder verbesserte sich sogar – scheinbar ein gutes Zeichen. Doch bei näherer Betrachtung fand Mascia, dass innerhalb einer Gemeinschaft gewisse Gruppen von Fischern die Kontrolle über ihre Ressourcen an andere Gruppen verloren hatten. Die vermeintlich verbesserte Nahrungssicherheit erwies sich als Illusion: Einige Fischer monopolisierten die Nutzungsrechte und gaben auf Befragen dann natürlich an, ihnen ginge es jetzt besser.

Während Mascia diese entmutigenden Ergebnisse untersuchte, hörte er von Problemen im Archipel Raja Ampat, einem Naturparadies mit 1320 Fisch- und 540 Korallenarten. Damals gab es dort noch kein Schutzgebiet. Die Region liegt in der rohstoffreichen Provinz West-Neuguinea, einem politischen Pulverfass mit indigenen Völkern und einem schwellenden Separatistenproblem, das vom indonesischen Militär argwöhnisch beobachtet wird.

Dynamit und Düngemittelbomben

Ungefähr zur selben Zeit bemerkte der Amerikaner Mark Erdmann von der gemeinnützigen Artenschutzorganisation Conservation International mit Sitz in Washington, dass Eindringlinge die örtliche Fischerei des Archipels ernsthaft bedrohten. Die ursprünglichen 4000 bis 5000 Küstenbewohner von Raja Ampat nennen sich Ma'ya. Sie waren einst als Kopffäger gefürchtet, können aber nun kaum mehr ihren bescheidenen Lebensunterhalt bestreiten. Früher hatten sie untereinander traditionelle Land- und Fischrechte respektiert und jahreszeitliche Schonzeiten eingehalten, so genannte »sasi«. Doch die Zuwanderung von Stämmen aus dem Landesinnern und die Ankunft besser ausgerüsteter

Fischer erhöhte den Bevölkerungsdruck und führte zur hemmungslosen Ausbeutung der natürlichen Ressourcen.

Vor allem Fischer von der Nachbarinsel Sulawesi waren berüchtigt für ihre rüden Fangmethoden. Manchmal warben sie für die gefährliche Arbeit Einheimische an, manches erledigten sie selbst mit Rückendeckung von Polizei und Militär. Sie vergifteten Riffe mit Blausäure, um Barsche und Lippfische zu betäuben und die Beute für den Handel mit lebenden Riffischen nach Hongkong zu schaffen. Um die schnellen Füslierrische zu fangen, warfen sie ungestraft Dynamit oder Düngemittelbomben ins Meer. Außerdem setzten sie Schleppnetze ein. »Früher konnten wir Stachelmakrelen fangen, so dick wie Ihr Körper«, klagt Trofinus Dailom, ein 57 Jahre alter Kirchenvorstand aus dem Dorf Kalitoko, der an der Umweltüberwachung der Bucht teilnimmt. »Seit den 1990er Jahren, als die Schleppnetz Fischer auftauchten, sind sie rar geworden.«

Die Gewässer von Raja Ampat wurden zum Kriegsschauplatz, wobei sich die lokalen Anführer gegen die Eindringlinge als machtlos herausstellten. Mark Erdmann, der mit Unterbrechungen seit 20 Jahren in Indonesien lebt, traf sich 2004 mit Einheimischen in der Mayalibit Bay, um ihnen zu helfen, die Kontrolle über ihre Lebensgrundlagen zurückzugewinnen. Er wollte sie bei der Einrichtung eines Wasserschutzgebiets unterstützen, aber sie sollten dabei selbst die Regie übernehmen. Im Dezember 2006 begannen die traditionellen Anführer, in Raja Ampat vier Schutzzonen einzurichten. Ein besonders engagierter Einheimischer namens Bram Goram übernahm die Leitung der Mayalibit-Zone. Dafür erweiterte er das »sasi«-System. Für sein Volk sind alte Friedhöfe oder bestimmte Orte namens »mon« seit jeher tabu: Wer dort eindringt, muss Krankheit und Unglück fürchten. Bram schuf nun den Mischbegriff »sasimon«, um neue Schutzregeln einzuführen – und er stellte ein Team zusammen, das die Gewässer kontrollieren und Verstöße verhindern sollte.

Doch zwei Jahre später hatten die Einheimischen noch immer kein verbrieftes Recht, Eindringlinge von der Ausbeu-

tung ihrer Fischgründe abzuhalten. Das änderte sich erst ab dem 15. März 2009, als sie sich entschlossen, für ihre Ressourcen zu kämpfen. Knapp außerhalb der Bucht ankerte wieder einmal ein kommerzielles Fangschiff, von dem aus eine Flotte von Fischerbooten das Gebiet durchkämmte. Als Brams Team sie daran hindern wollte, präsentierten die Eindringlinge eine schriftliche Erlaubnis der regionalen Fischereibehörde. Wütend forderte Bram von der Regierung einen Widerruf. Tatsächlich gab die Behörde nach und stoppte alle Fischereigenehmigungen für Fremde in der Mayalibit Bay. »Endlich hatte die Gemeinde die Macht, ihre Fischgründe zu schützen«, betont Bram stolz.

Heute liegen 29 Prozent der Bucht in einer Schutzzone, die rund 40 Prozent der dortigen Mangrovensümpfe und Riffe umfasst. In anderen Vogelkop-Gebieten gibt es unterschiedliche, weniger weit entwickelte Schutzmaßnahmen. Der rasche Wandel in Raja Ampat bot Mascia die einmalige Gelegenheit, die Auswirkung von Schutzzonen auf die Menschen zu studieren. Bisher hatten Sozialwissenschaftler nur kleine Fischergemeinden erforscht, aber Mascia nahm sich eine umfangreiche Untersuchung auf dem Festland zum Vorbild. Arun Agrawal, ein Sozialwissenschaftler an der University of Michigan in Ann Arbor, hatte dafür 9000 Waldgebiete in 16 Ländern untersucht und herausgefunden, dass sich die Wälder besser erholen, wenn die lokale Bevölkerung

deren Schutz übernimmt. Demnach dürften wohl auch Brams Patrouillen zur Erholung der Fischpopulationen beitragen. Aber wie erging es dabei den Menschen? 2009 trafen sich Mascia und seine Mitarbeiterin Helen Fox mit Agrawal, um im Korallendreieck eine große Studie zu starten.

Ende 2010 begann Mascias Team, 2433 Haushalte in 102 Dörfern um Mayalibit, Cenderawasih Bay und vier andere Wasserschutzgebiete zu befragen. Mascia wollte beispielsweise wissen, wie oft die Menschen fischen oder ob sie – als Gradmesser ihres Wohlstands – einen DVD-Player oder einen Generator besitzen. Nach ersten Daten leiden nur zwölf Prozent der Haushalte in Mayalibit regelmäßig Hunger – gegenüber 21 Prozent in Cenderawasih, wo die Bewohner sich weniger aus dem Meer ernähren. Zudem beeinflusst die unterschiedliche Abhängigkeit vom Fischfang den Erfolg des Wasserschutzes, aber wie, lässt sich schwer vorhersagen. Einerseits verteidigen Menschen, die stärker vom Fischfang abhängen, ihn engagierter gegen Eindringlinge; andererseits neigen sie mehr zum Überfischen. Mascias Team wertet gerade weitere Daten aus, die zeigen werden, wie sich die Regionen Mayalibit und Cenderawasih nach zwei weiteren Jahren Gewässerschutz entwickelt haben.

Jedes Gebiet hat anders zusammengesetzte Ressourcen, besitzt seine eigene Kultur und wird von internationalen Naturschutzgruppen unterschiedlich stark unterstützt. Am

VERPASSEN SIE KEINE AUSGABE UNSERER SECHSTEILIGEN SERIE DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER ASTRONOMIE

- SdW 4/2013: *Heißer Kosmos*
- SdW 5/2013: *Schwarze Löcher*
- SdW 6/2013: *Planetenentstehung*
- SdW 7/2013: *Exoplaneten/Supererden*
- SdW 8/2013: *Geburt und Tod von Sternen*
- SdW 9/2013: *Dunkle Energie und Dunkle Materie*

Ob gedruckt oder als Online-PDF, ob als Halbjahresabo, Heft oder Einzelartikel.

www.spektrum.de/astroserie



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

interessantesten ist, ob der Wasserschutz generell Nahrungssicherheit und Wohlstand steigert. Ein Vergleich der Befragungen von 2010 und 2012 wird auch die strittige Frage klären, ob die an der Küste ansässigen Bauern indirekt vom Meeresschutz profitieren. Die Mayalibit Bay ist von Land umgeben und lässt sich darum relativ leicht vor Eindringlingen schützen. Andere Reservate umfassen offenes Meer mit verstreuten Inseln; sie sind schwieriger zu überwachen und bringen den Insulanern vermutlich weniger Vorteile.

Mascia möchte auch ein umfangreiches Archiv über traditionelle Fischereimethoden in Raja Ampat und um die Vogelkop-Halbinsel anlegen. Ihn beschäftigt, inwieweit die Schutzregeln mit lokalen Gepflogenheiten harmonisieren oder Konflikte mit lokalen Anführern heraufbeschwören.

Globale Erfolge auf lokaler Basis

Weltweit gibt es derzeit schon fast 6000 Meeresschutzgebiete. Seit die USA 2006 bei Hawaii die damals größte Schutzzone auswies, sind immer gigantischere Reservate entstanden. Mascia teilt freilich nicht uneingeschränkt die Begeisterung der Naturschützer. Zum Beispiel etablierte Großbritannien im April 2010 ein 545000 Quadratkilometer großes Reservat im Chagos-Archipel im Indischen Ozean. Doch die 1967 gewaltsam vertriebenen und seither für ihre Rückkehr kämpfenden Ureinwohner von Chagos wurden niemals einbezogen. Nach Mascias Überzeugung darf man kein Meeresschutzgebiet planen, ohne zuvor einen derart ernststen sozialen Konflikt zu lösen.

Mit großen und entlegenen Schutzzonen können Staaten zwar auf spektakuläre Weise ihre Verpflichtungen gegenüber der Biodiversitätskonvention erfüllen, doch der Erfolg ist fraglich. Kleinere Reservate nützen der lokalen Subsistenzwirtschaft mehr, denn dort können die Fischer ihre Ressourcen nachhaltig verteidigen. Gewiss schafft der industrielle Fischfang vor der Küste von Massachusetts oder Alaska ganz andere Probleme. Aber von Raja Ampat lässt sich lernen, dass der offene Dialog zwischen Fischern, Naturschützern und Politikern den Artenschutz optimiert.

Wird die Artenvielfalt auch den Menschen nützen? Anscheinend verbessert der Schutz der Mayalibit Bay ihr Leben tatsächlich. Früher fischten die Dorfbewohner ihre unmittelbare Umgebung intensiv ab und mussten immer weiter hinausfahren. Eine kleine Schutzzone vor den Dörfern hat dem abgeholfen. »Nach nur zwei Jahren sehen wir jetzt viele große Fische unter unserem Anlegesteg«, sagt Schutzzonenleiter Bram. Die Fische können sich direkt vor dem Dorf ungestört vermehren und die angrenzenden Fischgründe auffüllen. Das gelingt, weil die Anführer sich für die Ressourcen verantwortlich fühlen und die anderen erziehen.

An einem nebligen Morgen beobachtete ich einen hageren Dorfbewohner mit einem Kanu voller Bananen, wie er Bram warnte: In einer verborgenen Bucht sammle sich eine verdächtige Gruppe von Fremden. Der Mann schlug gleich vor, dort eine neue Schutzzone einzurichten und einen Bewacher abzustellen. »So etwas wollen wir vorantreiben«,

stimmte Bram zu. »Danke«, erwiderte der Mann. »Immer wollen manche Leute unseren Frieden stören.«

Die Einrichtung der drei Meeresschutzgebiete Kofiau, Misool und Dampier bei Raja Ampat hat die Ausbeute ortsfremder Fischer immerhin ein wenig gemindert, berichtet Crissy Huffard von Conservation International. In der Mayalibit Bay entfallen nun fast 60 Prozent des gesamten Fangs auf lokale Fischer, verglichen mit nur 14 Prozent gleich außerhalb des Schutzgebiets. Die Patrouillen haben mehr unbefugte Fischer erwischt als in jedem anderen Wasserschutzgebiet.

Veränderungen im politischen Klima können solche Erfolge jedoch schnell in Frage stellen. In Raja Ampat sind Ortsfremde gewiss nicht glücklich über die verstärkte Überwachung, und die Dörfer jenseits der Schutzzonen beschwerten sich, sie blieben außen vor. Bedenklich erscheint, dass die örtliche Polizei während meines Besuchs aufhörte, die Patrouillen zu unterstützen, nachdem ein Polizist einen Dynamitfischer erschossen hatte.

Auch die Finanzlage gibt Anlass zur Sorge. Raja Ampat ist derzeit komplett auf Spenden angewiesen, doch letztlich sollen sich die Schutzgebiete durch Hobbytaucher finanzieren, die im Korallendreieck Urlaub machen. Noch lässt sich nicht sagen, ob dabei die örtliche Bevölkerung und die Regierung kooperieren werden, ohne dass internationale Naturschutzgruppen als Aufpasser und Schlichter zur Stelle sind.

Und was geschieht, wenn Mascias Studie ergibt, Schutzgebiete nützten den lokalen Fischern doch nicht? »Wir wollen, dass die Menschen über alle Vor- und Nachteile informiert sind und ihre eigene Entscheidung treffen«, sagt Erdmann. »Mehr können wir nicht tun. Schließlich geht es um ihr Land und um ihre Ressourcen, nicht um unsere.« ~

DER AUTOR



Der Journalist **Brendan Borrell** berichtet aus aller Welt über Umweltprobleme. Im Jahr 2013 wurde er Stipendiat der Alicia Patterson Foundation, die viel versprechende journalistische Projekte fördert.

QUELLEN

Chhatre, A., Agrawal, A.: Forest Commons and Local Enforcement. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 105, S. 13286–13291, 2008

Dowie, M.: Conservation Refugees: The Hundred-Year Conflict between Global Conservation and Native Peoples. MIT Press, Cambridge 2009

Mascia, M. B. et al.: Impacts of Marine Protected Areas on Fishing Communities. In: Conservation Biology 24, S. 1424–1429, 2010

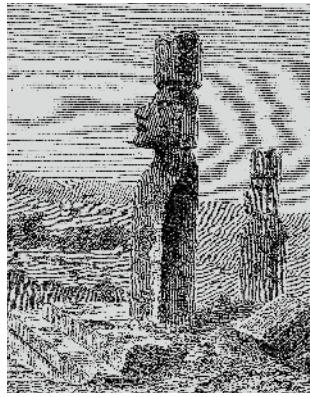
WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192455

1913

Spekulationen in Sachen Osterinsel

»Auf der Osterinsel finden sich fast 5 m hohe Steinbildnisse, langgezogene mächtige Menschenköpfe darstellend. Die Eingeborenen waren schon bei ihrer Entdeckung nicht imstande, Angaben über diese Denkmäler zu machen. Ihre eigenen Vorfahren konnten nicht die Bildner gewesen sein, da die Nachkommen auf einer viel zu niedrigen Kulturstufe standen, um solche Kolossalstatuen in hartem Gestein auszuführen.



Peruanisch oder insulanisch – wer schuf diese Denkmäler?

Besonders die peruanische Kulturepoche von Tiahuanaco hat Baudenkmäler in teilweise kolossalen Dimensionen hinterlassen. Sollte da nicht ein Zusammenhang bestehen zwischen diesen Resten einer uralten Kultur und den Denkmälern

auf der Osterinsel? Selbst für die Schiffchen der damaligen Kulturepoche konnte es mit dem Passat möglich sein, die Insel von Peru oder Chile aus zu erreichen. Die Vorfah-

ren der heutigen Eingeborenen sind zweifellos viel später von Westen her aus der polynesischen Inselwelt eingewandert.« Prometheus 1234, S. 603, 1913

Dünn durch Strom

»Kürzlich hat Bergonié in Frankreich mit elektrischer Behandlung der Fettleibigkeit gute Ergebnisse erzielt, und in derselben Richtung bewegen sich die Arbeiten von Dr. Fr. Nagelschmidt in Berlin, von denen wir näher berichten möchten. Der zur Anwendung gelangende Strom ist eigenartig modifizierter Wechselstrom, oder vielmehr eine überaus schnelle Folge von einzelnen Stromstößen, die in wechselnder Richtung durch den Körper hindurchgehen und eigenartige Wirkungen hervorrufen. Auf Muskelreizungen beruht die Nagelschmidtsche Entfettungskur: Die Patienten werden durch die elektrische Reizung unter Ausschaltung ihres Willens und daher fast ohne Ermüdung zu ausgiebiger Muskelarbeit gezwungen; sie können auf diese Weise 100mal mehr Körpersubstanz verbrauchen, als mit Hilfe ihres eigenen Willens.« Prometheus 1235, S. 617–619, 1913

Computerunterstütztes Tippen

»Eine Firma hat für die Konstruktion ihrer neuesten elektrischen Schreibmaschine einen Computer (Elektronenrechner) eingesetzt. Das Automatengehirn erwies sich als weit aus besser, schneller und zuverlässiger als die menschliche Gedankenkraft. Der Elektronenrechner machte zum Beispiel bei den Typen-Antriebs-Aggregaten 645 Teile überflüssig und bestimmte eine höhere Widerstandskraft und bedeutende Kostensenkung. Man darf gespannt sein, welche Überraschungen uns die Automatengehirne noch bringen werden. Denn was bei einer Elektro-Schreibmaschine möglich war, dürfte bald im Konstruktions-Sektor Schule machen.« Neuheiten und Erfindungen 330, S. 100, 1963

Düngen mit Luft

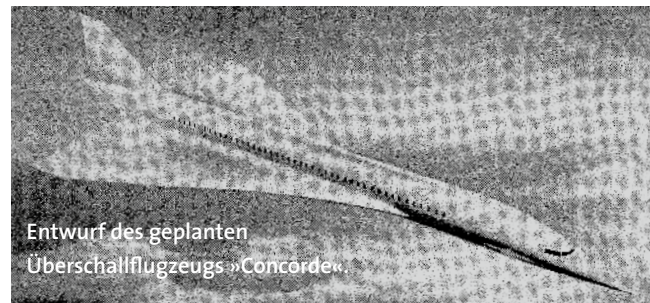
»In amerikanischen Gewächshäusern wurde der erfolgreiche Versuch gemacht, Pflanzenwuchs und -reife zu beschleunigen, indem man die Luft mit Kohlendioxyd anreicherte. Die Ergebnisse waren so befriedigend, dass man jetzt dazu übergegangen ist, verflüssigte Kohlensäure, wie sie zu vielen Zwecken – etwa zur Herstellung von Getränken – verwendet wird, in genau angemessenen Mengen systematisch verströmen zu lassen. Mit dieser Art der »Düngung« konnte der Ernteertrag an Tomaten um mehr als ein Viertel erhöht werden. Blattsalat reifte innerhalb von vier Wochen anstatt sonst fünf, und Nelken blühten 14 Tage früher, als es sonst der Fall gewesen wäre.« Neuheiten und Erfindungen 330, S. 108, 1963

London – New York in drei Stunden

»Vor kurzem wurden Einzelheiten über das von Frankreich und Großbritannien geplante Projekt eines Überschallverkehrsflugzeuges bekannt. Die »Concorde« wird eine Reisegeschwindigkeit von rund 2350 km/h haben. Je nach Ausführung wird es möglich sein, 90 bis 110 Passagiere in 3 Stunden von London nach New York zu bringen. Die Indienstellung ist für Anfang 1970 vorgesehen. Es

1963

ist viel darüber diskutiert worden, ob es nicht besser wäre, erst die Sicherheit im Flugverkehr zu erhöhen, ehe man zum Überschallverkehr übergeht. Dies ist richtig, aber auf der anderen Seite lässt sich die Entwicklung nicht mehr aufhalten. Das Überschallverkehrsflugzeug wird also kommen.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 11, S. 355, 1963

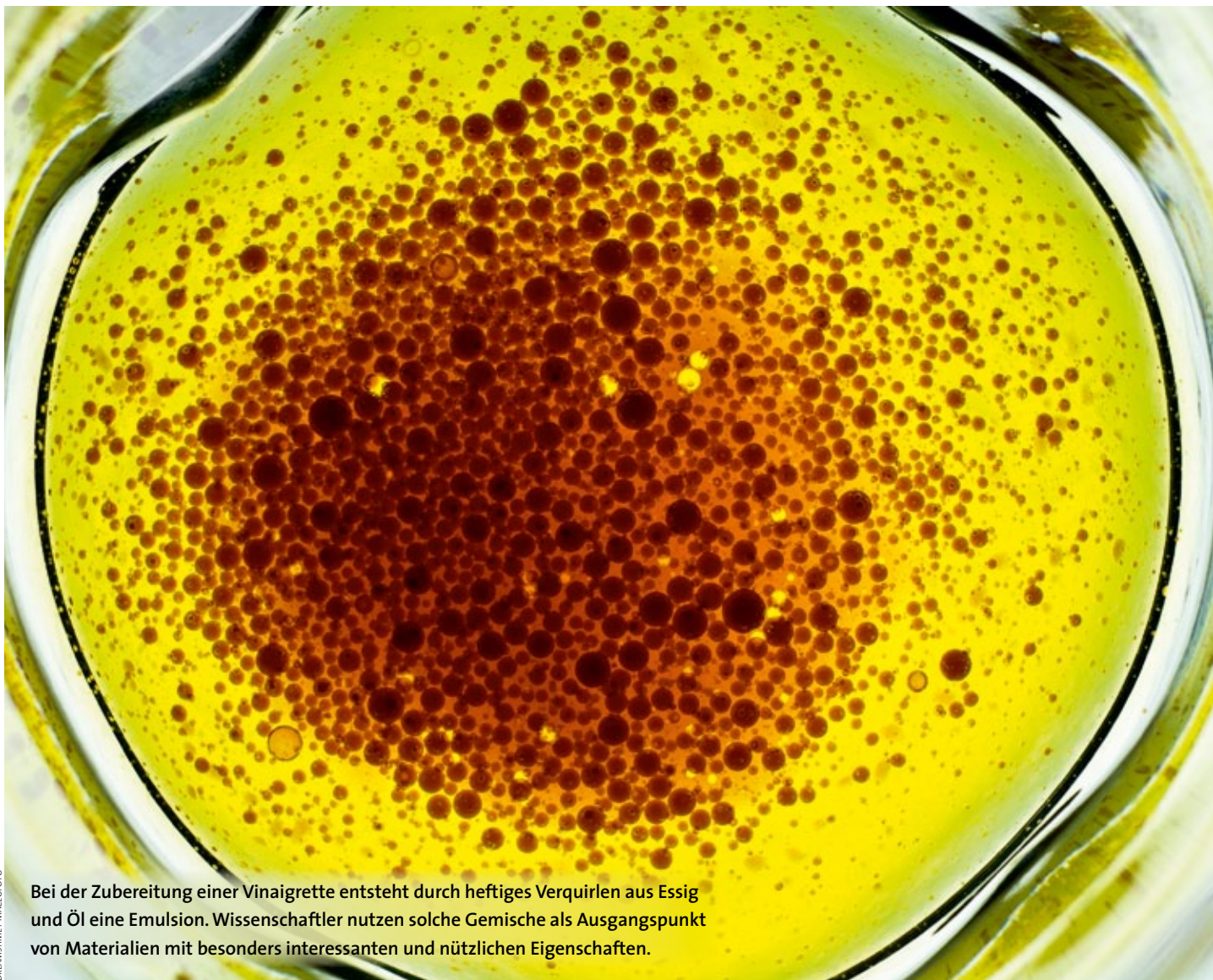


Entwurf des geplanten Überschallflugzeugs »Concorde«

Wunderkugeln aus Öl und Wasser

Aus Miniemulsionen lassen sich Kunststoffkügelchen mit Durchmessern von 30 bis zu 500 Nanometern herstellen. Sie haben vielerlei Anwendungen von der Elektronik bis zur Medizin. Mit einem Zellgift gefüllt, könnten sie etwa gezielt Tumoren ansteuern und diese zerstören.

Von Daniel Klinger, Nicolas Vogel und Katharina Landfester



Bei der Zubereitung einer Vinaigrette entsteht durch heftiges Verquirlen aus Essig und Öl eine Emulsion. Wissenschaftler nutzen solche Gemische als Ausgangspunkt von Materialien mit besonders interessanten und nützlichen Eigenschaften.

DREAMSTIME / MAKEOFOTO

Schon die Alchemisten wussten, dass sich nur Ähnliches in Ähnlichem löst (»similia similibus solvuntur«). Wasser- und Ölmoleküle sind in ihrem Aufbau jedoch grundverschieden, weshalb es zum Beispiel aussichtslos ist, sich nur mit Wasser die schmutzigen Hände nach einer Fahrradreparatur waschen zu wollen. Und wenn wir eine Vinaigrette zubereiten, müssen wir schütteln, quirlen oder kräftig rühren, um das Öl im Essig zu verteilen. Das Ergebnis bleibt trotzdem nicht sehr lange stabil. Nach einer Weile trennt sich das Öl wieder vom Essig und schwimmt obenauf. Als wollte es sagen: Mich bekommst du da nicht hinein!

Doch was ist mit Gesichtskremes, Majonäse oder Milch? Sie wirken äußerlich durch und durch homogen – zumindest innerhalb des Haltbarkeitszeitraums –, obwohl sie doch ebenfalls aus öligen und wässrigen Anteilen bestehen. Chemiker bezeichnen solche Systeme aus zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten als Emulsionen. Die eine Komponente liegt dabei in Form winziger Tröpfchen in der anderen vor (Grafik S. 88). Bei Milch oder Bodylotion ist das Öl oder Fett in dieser Weise fein in Wasser verteilt. Bei Butter und Margarine verhält es sich genau umgekehrt: Hier schwimmen kleinste Wassertropfen im Öl oder Fett.

Stabilisierung von Emulsionen

Wie gelingt es, solche Emulsionen stabil zu halten – trotz der Tendenz der beiden nicht mischbaren Flüssigkeiten, sich voneinander zu trennen? Ein entscheidender Trick ist, zu verhindern, dass die Tröpfchen miteinander verschmelzen, wenn sie infolge der brownischen Molekularbewegung umherwandern und dabei aufeinandertreffen. Das gelingt durch Zusatz von so genannten Tensiden (Grafik S. 89 oben). Dabei handelt es sich um Moleküle mit zwei unterschiedlichen Hälften. Die eine ist hydrophil, also Wasser liebend, die andere dagegen lipophil, also Fett liebend. Tenside fungieren deshalb als eine Art Vermittler zwischen den beiden gegensätzlichen Flüssigkeiten. Im Fall von Öl-in-Wasser-Emulsionen ordnen sie sich so auf der Oberfläche der Öltröpfchen an, dass ihr lipophiles Ende hineinragt und der hydrophile Teil nach außen absteht. Ionische Tenside tragen an der hydrophilen Endgruppe außerdem eine elektrische Ladung. Dadurch bilden sie eine geladene Hülle um die Tröpfchen. Diese stoßen sich deshalb elektrostatisch ab. Das verhindert, dass sie sich berühren und miteinander verschmelzen.

Nichtionische Tenside erreichen denselben Zweck auf etwas andere Weise. Es handelt sich dabei um langkettige Moleküle, die aus der Oberfläche der Öltröpfchen herausragen, wenn sie sich daran anlagern. Nähern sich nun zwei solche Tröpfchen, kommen sich die abstehenden sperrigen Tensidketten ins Gehege und behindern sich gegenseitig, was ihre Beweglichkeit einschränkt. Dadurch verringert sich aber die so genannte Entropie des Systems, die man sich anschaulich als seine Unordnung vorstellen kann. Wie jeder aus dem täglichen Leben weiß, ist Aufräumen mit Anstrengung verbun-

den, während Unordnung quasi von allein entsteht. Dasselbe gilt für physikalische oder chemische Systeme: Sie streben stets nach einem Zustand geringerer Ordnung. Deshalb halten Tröpfchen mit sperrigen Tensiden auf ihrer Oberfläche gebührenden Abstand voneinander.

Ein weiterer Grund, warum sich Emulsionen gerne entmischen, ist die nach ihrem Entdecker benannte Ostwaldreifung. Sie beruht darauf, dass die Tröpfchen in Emulsionen nicht exakt gleich groß sind. In kleineren Exemplaren herrscht, weil ihre Oberfläche stärker gekrümmt ist, ein höherer Druck (der so genannte Laplace-Druck) als in großen. Diesem Druckgefälle folgend, tendieren die Moleküle dazu, aus kleineren in größere Tröpfchen überzuwechseln. Das können sie zwar nicht ohne Weiteres, weil sie dazu das Medium dazwischen – die so genannte kontinuierliche Phase – durchqueren müssen. In der Regel sind die Moleküle zweier nicht mischbarer Flüssigkeiten wie Öl und Wasser aber doch zu einem gewissen, wenn auch sehr geringen Grad in der jeweils anderen löslich. Das erlaubt eine – freilich nur sehr langsame – Diffusion zwischen den Tröpfchen. Auf diese Weise wachsen die großen ganz allmählich auf Kosten der kleineren. Das geschieht so lange, bis nur noch ein sehr großer Tropfen übrig ist, die Emulsion sich also entmischt hat (Grafik S. 89 unten).

Um die Ostwaldreifung zu verhindern, muss man dem Druckgefälle entgegenwirken. Das lässt sich durch Zugabe so genannter Kostabilisatoren erreichen. Bei Öl-in-Wasser-Emulsionen kommen dafür Substanzen in Frage, die noch deutlich stärker hydrophob (Wasser meidend) sind als die Ölmoleküle. Sie verteilen sich beim Mischen der beiden Flüssigkeiten gleichmäßig auf alle Tröpfchen. Dort liegen sie deshalb anfangs in derselben Konzentration vor. Das ändert sich jedoch, wenn die größeren Tröpfchen auf Kosten der kleineren wachsen; denn dabei diffundieren nur die Ölmoleküle, nicht aber die ultrahydrophoben Kostabilisatoren. Deren Konzentration nimmt daher in den wachsenden Tröpfchen

AUF EINEN BLICK

NANOTEILCHEN NACH MASS

1 Emulsionen bestehen aus feinen Tröpfchen einer Flüssigkeit, die gleichmäßig in einer nicht damit mischbaren anderen verteilt sind. Milch ist das Paradebeispiel einer Öl-in-Wasser-Emulsion.

2 In technisch herstellbaren **Miniemulsionen** messen die Tröpfchen nur **30 bis 500 Nanometer im Querschnitt**. Sie können als winzige Reaktionskammern dienen, in denen beispielsweise durch Polymerisation ein Kunststoff entsteht. Auf diese Weise lassen sich Nanokügelchen oder -kapseln einheitlicher Größe herstellen, die vielerlei Anwendungen haben.

3 So können sie als **Transporter für Medikamente im Körper** dienen. Ebenso lassen sich damit Masken für die Nanostrukturierung von Oberflächen erzeugen. Daraus ergeben sich womöglich Verfahren zur Herstellung elektronischer Bauteile, die einfacher und preiswerter sind als die moderne Röntgenlithografie.

Emulsionen bestehen aus nicht mischbaren Flüssigkeiten, von denen die eine in Form winziger Tröpfchen in der anderen verteilt ist. Chemiker sprechen von der dispersen und der kontinuierlichen Phase. Oft handelt es sich bei den Flüssigkeiten um Wasser und eine ölige Substanz. Prominentes Beispiel einer natürlichen Emulsion ist Milch. Sie enthält feine Fetttröpfchen in Wasser. Bei der Majonäse verhält es sich dagegen umgekehrt: Hier sind feine Wassertröpfchen im Öl verteilt.

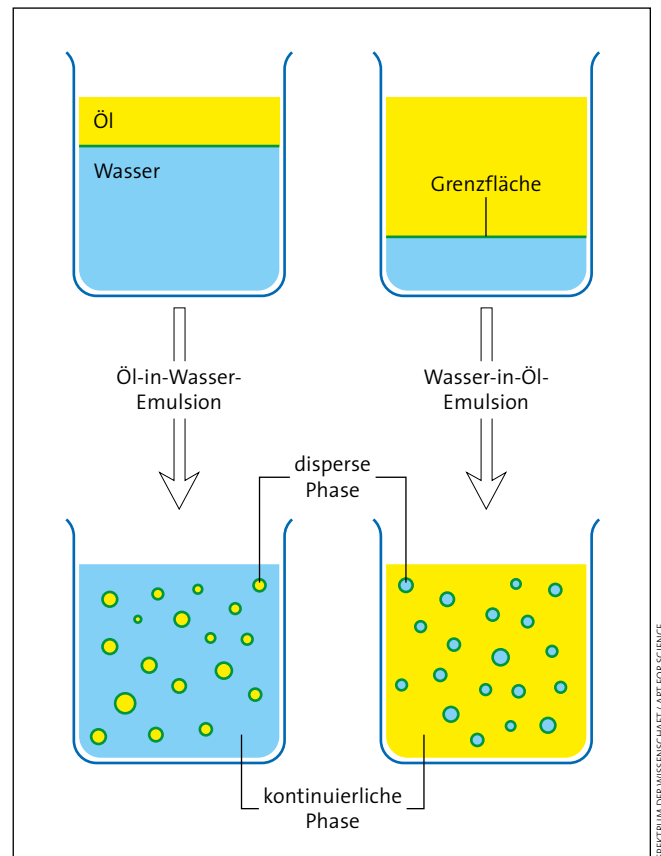
ab und in den schrumpfenden zu. Solche Konzentrationsunterschiede sind energetisch allerdings ungünstig, weshalb Systeme generell danach streben, sie durch Diffusion von Molekülen zu den höher konzentrierten Regionen hin auszugleichen. Diese Tendenz wird als Osmose bezeichnet und erzeugt den osmotischen Druck. Der ist in unserem Fall dem Laplace-Druck entgegengerichtet und bewirkt eine Rückdiffusion von Molekülen in Richtung der schrumpfenden Tröpfchen. Das System bleibt so im Gleichgewicht – und die Emulsion stabil. Allerdings funktioniert die Methode nur, wenn die Tröpfchengröße am Anfang nicht zu uneinheitlich ist.

All das lässt sich übrigens auch bei der Milch beobachten. Normalerweise setzt sich das MilCHFett schon kurz nach dem Melken als Rahm von der wässrigen Phase ab. Um dies zu verhindern, muss man die Fetttröpfchen möglichst fein verteilen. Das geschieht beim Homogenisieren unter Hochdruck. Die dabei auftretenden Scherkräfte sorgen dafür, dass die Größe der Fetttröpfchen von ursprünglich 10 bis 30 Mikrometern (tausendstel Millimetern) auf etwa ein bis zwei Mikrometer abnimmt. Homogenisierte Milch aus dem Supermarkt rahmt deshalb im Gegensatz zum unbehandelten Rohprodukt nicht mehr auf.

Für zusätzliche Stabilität sorgen bestimmte natürliche Bestandteile. So enthält Milch den Eiweißstoff Lezithin, der als ionisches Tensid wirkt und das Verschmelzen der Fetttröpfchen unterdrückt. Außerdem dient das MilCHFett mit der geringsten Wasserlöslichkeit als Kostabilisator.

Und wie verhält es sich bei Wasser-in-Fett-Emulsionen wie Butter? Hier muss der Kostabilisator statt besonders hydrophob stark hydrophil sein, sich also sehr gut in Wasser, nicht aber in Fett lösen. Diese Anforderung erfüllen etwa Kochsalz und Zucker.

Eng verwandt mit Emulsionen sind Suspensionen. Sie enthalten statt der Tröpfchen winzige feste Teilchen. Es handelt sich also um Gemische aus einer Flüssigkeit und einem fein darin verteilten unlöslichen Festkörper. Emulsionen und



Suspensionen gehören beide zu den so genannten Dispersionen. Das sind ganz allgemein innige Gemische aus Stoffen, die sich nicht oder kaum ineinander lösen oder chemisch miteinander verbinden. Zu ihnen zählen auch Aerosole: feine Verteilungen von Feststoffen oder Flüssigkeiten in einem Gas. Beispiele sind Nebel oder Rauch.

Winzige Reaktoren

Tagtäglich kommt jeder von uns mehrfach in Kontakt mit Dispersionen – nicht nur in der Küche mit Sahne, Margarine oder Majonäse oder im Badezimmer mit Bodylotions, Kremen und Zahnpasta, sondern auch beim Basteln und Arbeiten mit Farben und Klebstoffen wie etwa Holzleim. Unter Dispersionen verstehen Chemiker Systeme, in denen Teilchen oder Tröpfchen mit Durchmessern zwischen 1 und 1000 Nanometern gleichmäßig verteilt sind. Diese dispergierten Partikel bezeichnet man dann als Kolloide und die Dispersionen als kolloidale Systeme.

Kolloide haben große Bedeutung für Wissenschaft und Technik. Einerseits lassen sich an ihnen fundamentale physikalische Erkenntnisse gewinnen. Andererseits eröffnen sie wegen der geringen Größe der dispergierten Partikel und der vielseitigen Möglichkeiten zur Materialkombination eine breite Palette von Anwendungen in den verschiedensten Bereichen.

Schon früh haben Kolloidforscher versucht, die Natur nachzuahmen oder sogar zu übertreffen, um künstliche Dispersionen für verschiedenste Anwendungen zu erzeugen.

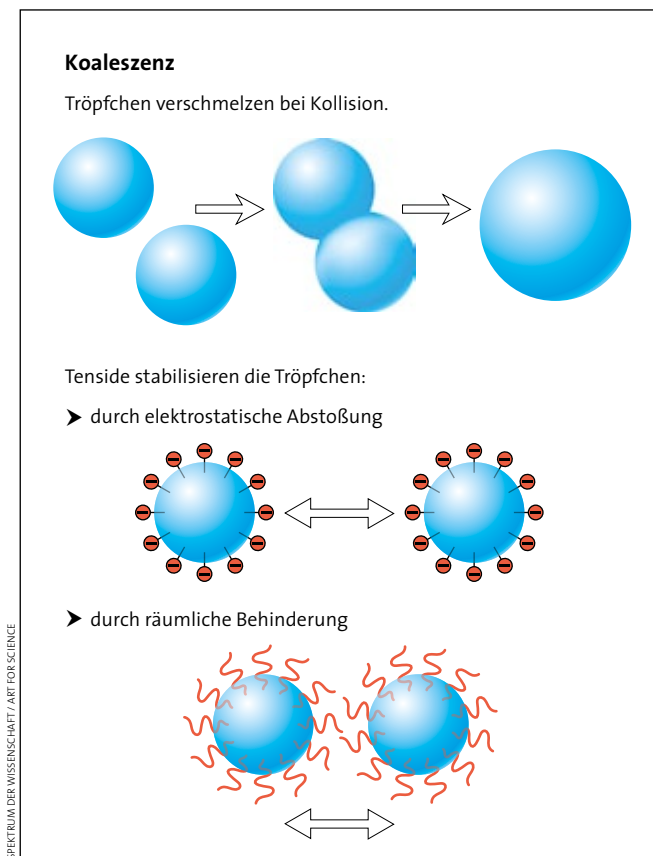


MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Nanotechnologie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/nano



Ein Meilenstein gelang dabei John Ugelstad (1921–1997) von der Norwegischen Technischen Hochschule (Norges tekniske høgskole) in Trondheim und Mohamed S. El-Aasser von der Lehigh University in Bethlehem (Pennsylvania). In den 1970er Jahren entwickelten beide ein Verfahren zur Herstellung stabiler »Miniemulsionen«. Diese enthalten Tröpfchen, die noch deutlich kleiner sind als in homogenisierter Milch: Ihr Durchmesser liegt zwischen 30 und 500 Nanometern. Um sie zu erzeugen, versetzt man eine ölige und eine wässrige Komponente mit einer genau dosierten Menge an Tensid sowie einem Kostabilisator und verwirbelt das Gemisch per Ultraschall. Die Dosierung des Tensids ist entscheidend: Nimmt man zu wenig, bleibt die Emulsion nicht stabil. Bei einer zu großen Menge bilden die Tenside im Wasser Mizellen, in die das Öl unkontrolliert diffundiert.

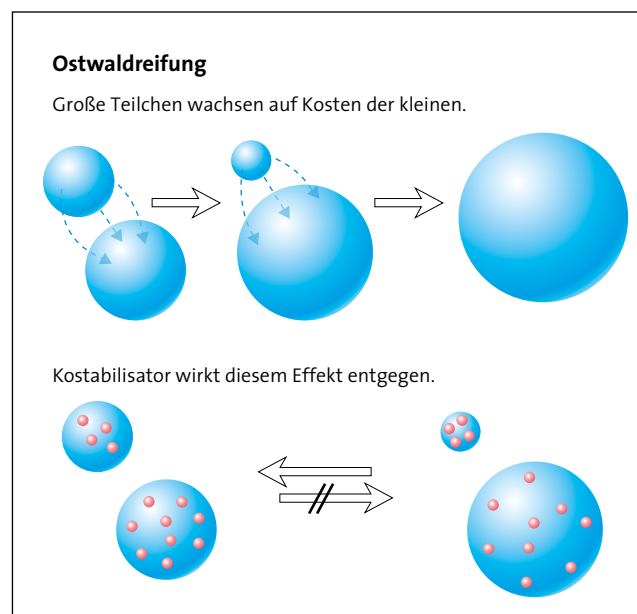
In einer Emulsion wachsen größere Tröpfchen auf Kosten der kleineren. In letzteren herrscht wegen der stärkeren Krümmung ihrer Oberflächen nämlich ein höherer Druck. Das bewirkt, dass Moleküle aus den kleineren in die größeren Tropfen diffundieren. Diese so genannte Ostwaldreifung lässt sich durch Zugabe eines Kostabilisators unterdrücken. Dabei handelt es sich um eine Substanz, die praktisch nur in den Tröpfchen löslich ist. Wenn diese sich verkleinern oder vergrößern, nimmt ihre Konzentration folglich zu oder ab. Das erhöht beziehungsweise verringert den osmotischen Druck in den Teilchen und wirkt so der Größenänderung entgegen.

Von Natur aus sind Emulsionen instabil. So neigen die Tröpfchen dazu, miteinander zu verschmelzen (oben). Durch Zugabe von Tensiden lässt sich dem entgegenwirken. Solche waschaktiven Substanzen haben ein hydrophiles (Wasser liebendes) und ein hydrophobes (Wasser meidendes) Ende und lagern sich deshalb an der Oberfläche der Tröpfchen an. Dabei unterdrücken sie durch räumliche Behinderung oder elektrostatische Abstoßung das Verschmelzen.

Die Miniemulsionen haben sich dagegen als idealer Ausgangspunkt für die Herstellung einer breiten Palette hochinteressanter Materialien erwiesen, die auf spezielle Funktionen zugeschnitten sind. Die drei wichtigsten Vertreter dieser Stoffklasse – Nanokügelchen, Nanokapseln und Januspartikel – sind das Ergebnis einer Kombination von Kolloid- und Polymerchemie. Bei ihrer Synthese dienen die Tröpfchen als winzige Reaktionsgefäße (Grafik S. 90).

Zur Herstellung polymerer Nanoteilchen werden deren Bausteine – Chemiker sprechen von Monomeren –, die in der Regel eine hydrophobe, ölige Flüssigkeit darstellen, in Wasser emulgiert und danach dazu gebracht, sich zu langen Kettenmolekülen zu verbinden. Dabei entstehen winzige Kunststoffkügelchen einheitlicher Größe. Für das Verfahren eignen sich so gut wie alle gängigen Ausgangsmaterialien und Polymerisationsarten. So ist es möglich, die unterschiedlichsten Kunststoffe in Form von Dispersionen herzustellen.

Die Miniemulsionstechnik erlaubt aber auch, Nanoteilchen aus bereits fertig synthetisierten Polymeren zu produzieren. Die lipophilen Kunststoffmoleküle werden dazu in einer leicht flüchtigen öligen Flüssigkeit gelöst. Diese lässt man nach dem Emulgieren mit Wasser komplett verdunsten, wobei die Polymere ausfallen. Das Verfahren hat den Vorteil, dass sich der Kunststoff vor dem Überführen in die Dispersion von den für seine Herstellung benötigten Katalysatoren



oder Nebenprodukten befreien und eingehend charakterisieren lässt.

Wässrige Dispersionen polymerer Nanoteilchen haben große Bedeutung für zahlreiche industrielle Anwendungen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine organischen Lösungsmittel enthalten, die häufig toxisch und kostspielig sind. Das macht sie umweltfreundlich, vielseitig einsetzbar und preiswert. Beispielsweise dienen sie zur Veredelung von Oberflächen. Nach dem Auftragen der Dispersion können die enthaltenen Nanoteilchen durch einfaches Erhitzen miteinander verschmelzen und einen geschlossenen Film bilden. Dessen Eigenschaften hängen von der Art des Kunststoffes ab. Besonders widerstandsfähige Polymerharze, Polyurethane oder Polyester haben sich beispielsweise bei Autolacken bewährt, denen sie eine hohe Kratzfestigkeit verleihen. Dagegen sind weiche Kunststoffe wie Polybutadien oder Polyisopren typische Elastomere, die sich etwa als Klebstoffe eignen.

Eine Sonderform von Nanoteilchen sind die Januspartikel, benannt nach dem doppelgesichtigen römischen Gott des Anfangs und des Endes. Für ihre Herstellung werden zwei nicht miteinander mischbare Polymere in ein- und demselben Lösungsmittel emulgiert. Sie verteilen sich dabei gleichmäßig auf die Tröpfchen, bilden dort aber jeweils zwei getrennte Phasen. Beim Verdampfen des Lösungsmittels entstehen so schließlich Teilchen mit zwei unterschiedlichen Hälften. Januspartikel mit einer schwarz gefärbten und einer weißen Hälfte lassen sich – wenn die beiden Seiten auch noch unterschiedlich geladen sind – zum Beispiel für so genannte elektronische Tinte in Displays verwenden: Bei Ausrichtung mit einem elektrischen Feld zeigt entweder schwarz oder weiß zur Oberfläche und gibt so den gewünschten Kontrast.

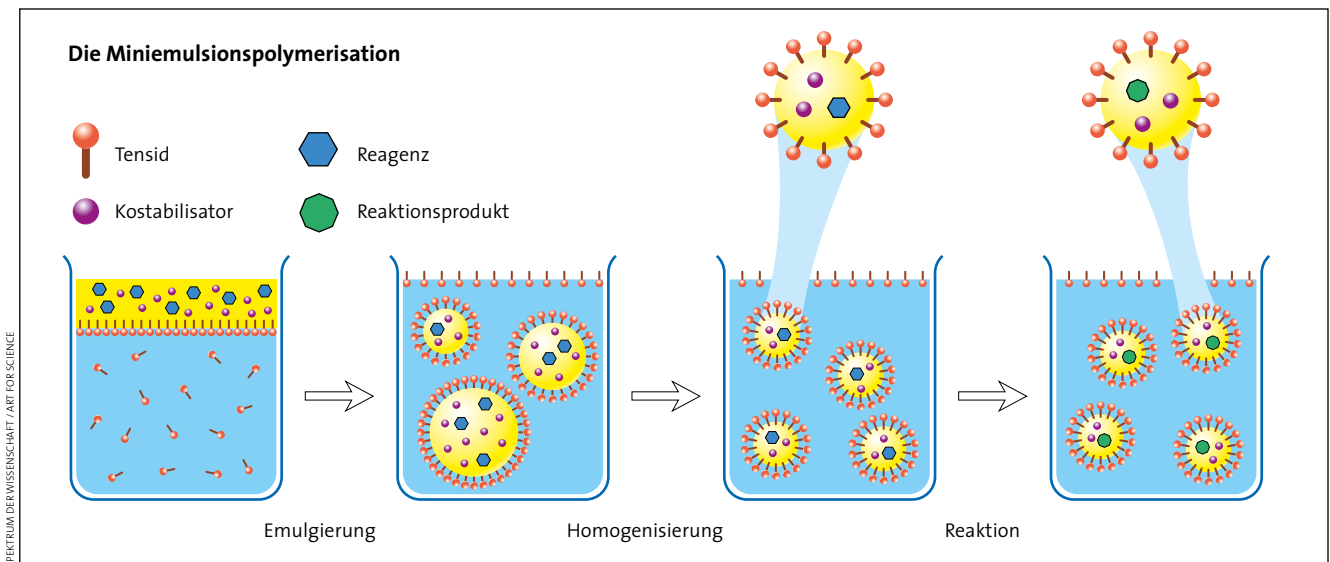
Miniemulsionen eignen sich als Ausgangspunkt zur Synthese von einheitlichen Nanoteilchen. Ihre Herstellung ist hier veranschaulicht. Das zugesetzte Reagenz kann zum Schluss beispielsweise polymerisieren, so dass winzige Kunststoffkügelchen entstehen.

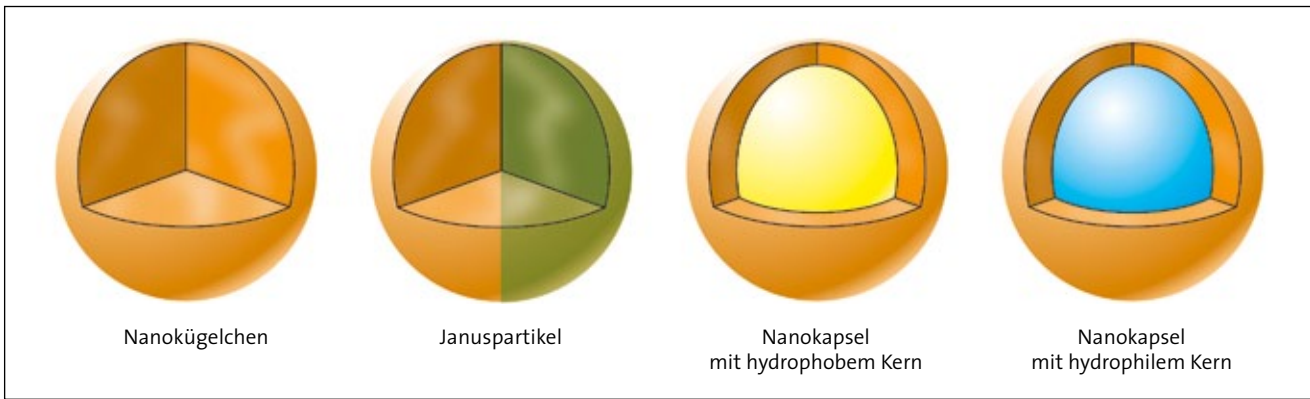
Nanokapseln schließlich bestehen aus einer Kunststoffschale und einem flüssigen oder festen Kern. Auch ihre Herstellung gelingt auf einfache Weise mit der Miniemulsionspolymerisation. Die zu umhüllende Substanz wird dabei mit dem Monomer gemischt und dann emulgiert. Ist sie hydrophober als die Schale, arbeitet man in einer Öl-in-Wasser-Emulsion. Die Öltröpfchen enthalten dabei das Monomer und die zu verkapselnde Substanz.

Während der anschließenden Polymerisation verbinden sich die Monomermoleküle zum festen Kunststoff. Dieser lagert sich auf der Außenseite des Tröpfchens zur wässrigen Umgebung hin ab, da er weniger wasserabweisend ist als der flüssige oder feste Inhaltsstoff. Dadurch bildet sich automatisch die gewünschte Schale. Industriell wird dieses Verfahren bereits in großem Maßstab genutzt, um Farbpigmente – zum Beispiel Rußpartikel – in eine polymere Schutzhülle zu packen und so zu verhindern, dass sie verklumpen.

Die Verkapselung hydrophiler Komponenten erfolgt dagegen in einer Wasser-in-Öl-Emulsion. Dabei gibt es mehrere Syntheserouten. Eine arbeitet mit zwei verschiedenen Monomeren, von denen das eine in dem Wassertröpfchen, das andere dagegen im umgebenden öligen Milieu gelöst ist. Beide treffen sich an der Grenzfläche und reagieren dort miteinander zur polymeren Schale der winzigen Kapsel. Beim Nanofällungsprozess werden dagegen wasserunlösliche Polymere in das Öl eingebracht. Dieses besteht aus einer Mischung zweier Flüssigkeiten, von denen die eine leicht flüchtig ist. In ihr ist das Polymer löslich, in der anderen, schwerer flüchtigen jedoch nicht. Beim Verdampfen der leicht flüchtigen Flüssigkeit fällt das Polymer deshalb auf der Außenseite der wässrigen Nanotröpfchen aus und bildet so die Hüllstruktur.

Die Möglichkeit, wasserlösliche Wirkstoffe zu verkapseln, hat vor allem für die Medizin große Bedeutung. Die Kernspintomografie bietet dafür ein gutes Beispiel. Bei der Untersuchung einzelner Organe wird dem Patienten zunächst ein Kontrastmittel gespritzt, das aus Nanoteilchen eines magne-





Je nach Synthesebedingungen lassen sich aus Miniemulsionen Nanokügelchen, Januspartikel – sie bestehen aus zwei unterschiedlichen Hälften – oder Nanokapseln herstellen.

tischen Eisenoxids (Fe_3O_4) besteht. In reiner Form zerfallen diese jedoch leicht in wässrigen Medien und lösen sich somit auch teilweise im Blut auf. Das kann zum Eisenschock führen. Deshalb braucht das Kontrastmittel eine schützende Hülle, die sich auf die geschilderte Weise produzieren lässt.

Intelligente Nanotransporter

In der Medizin genügt es jedoch meist nicht, Wirkstoffe nur geschützt zu transportieren. Vielmehr will man sie auch an bestimmte Zielorte dirigieren. Das gilt etwa für Tumormarker, die entartete Zellen aufsuchen und sie kenntlich machen sollen, was die Krebsdiagnose erheblich verbessert. Die verpackten magnetischen Eisenoxidpartikel eignen sich auch für diesen Zweck. Dazu muss man ihre Oberfläche nur auf chemischem Weg mit passenden Antikörpern bestücken, so dass sie sich ausschließlich an die Tumorzellen heften.

In vielen Fällen sollen die Nanokapseln am Zielort schließlich die eingelagerten Wirkstoffe freisetzen. Bei diesen handelt es sich in der Regel um Substanzen, welche die entarteten Zellen schädigen oder zerstören. Oft sind sie allerdings nicht selektiv genug und ziehen deshalb auch gesundes Gewebe in Mitleidenschaft. Das ist etwa der Grund für die unerwünschten Nebenwirkungen einer Chemotherapie.

Angestrebt werden deshalb »intelligente« Nanokapseln, die ihre Wirkstoffe erst am Zielort auf einen äußeren Reiz hin freisetzen. Mit dem Miniemulsionsprozess konnten wir auch das erreichen. Dazu umhüllten wir ein Antitumormedikament mit einem synthetischen Polyester. Dieser löst sich in

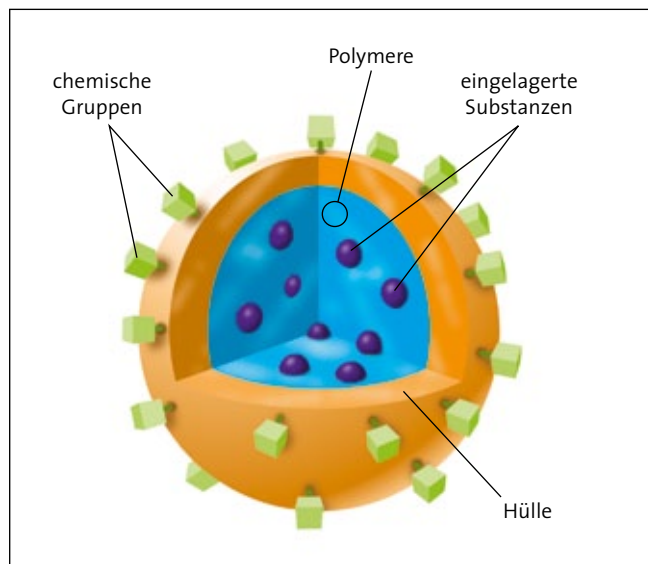
Aus Miniemulsionen erzeugte Nanoteilchen lassen sich für die verschiedensten Funktionen maßschneidern. Das kann über eingelagerte Substanzen, chemische Gruppen auf der Oberfläche oder die Art des verwendeten Polymers geschehen. Außerdem ist es möglich, die Partikel als Kügelchen, Kapseln oder Gel zu synthetisieren. Nicht zuletzt bringt es oft Vorteile, dass sie in fein verteilter Form – als Dispersion – vorliegen.

einem leicht sauren Milieu auf. Solche Bedingungen herrschen im Innern von Tumoren; denn diese leiden meist unter mangelnder Sauerstoffzufuhr und gewinnen ihre Energie deshalb überwiegend durch Milchsäuregärung. In einer neutralen Umgebung bleiben die Kapseln dagegen verschlossen, so dass gesunde Zellen verschont werden.

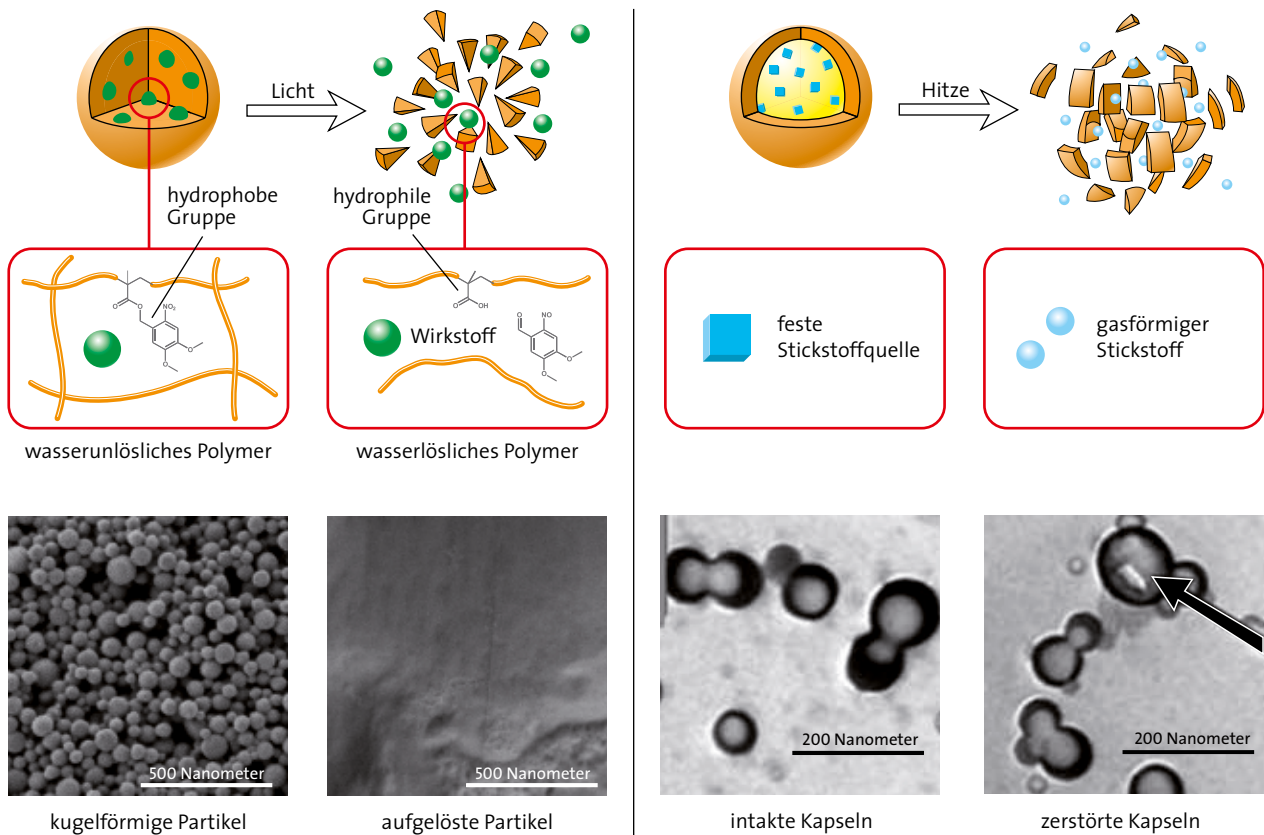
Als Signal für intelligente Nanotransporter kommen außer dem chemischen Milieu auch berührungslose Reize wie Licht oder Temperaturänderungen in Frage. Die Nanotransporter können ihre Fracht dann sozusagen auf Knopfdruck freisetzen. Als Detektor muss dabei nicht unbedingt das Polymer selbst dienen. Man kann in die Kapselhülle auch spezielle Substanzen einbetten, die auf den äußeren Reiz reagieren. Konzepte zu licht- oder thermosensitiven Nanopartikeln und -kapseln haben wir vor Kurzem in unserer Arbeitsgruppe entwickelt (Kasten S. 92).

Bei den bisher genannten Anwendungen von Nanopartikeln, vor allem im biomedizinischen Bereich, kommt es darauf an, die Eigenschaften der Teilchen selbst für den jeweiligen Zweck maßzuschneidern. Die winzigen Kügelchen lassen sich aber auch zur Strukturierung von Oberflächen nutzen, um so besondere Effekte zu erzielen.

Vorgemacht hat es den Forschern die Natur. So schillern die Flügel mancher Schmetterlinge oder Käfer in leuchten-



Öffnen der Nanokapsel am Zielort



Forscher konnten mit dem Miniemulsionsverfahren erzeugte Nanoteilchen auch mit Schaltern versehen, so dass sie auf einen äußeren Reiz hin gezielt ihren Inhalt freigeben. Im Beispiel links spalten sich bei Bestrahlung mit UV-Licht hydrophobe Molekülteile von den Polymerketten ab. Auf diese Weise wird der ursprünglich Wasser abstoßende Kunststoff hydrophil und

löst sich folglich in Wasser auf. Zurück bleibt die eingelagerte Substanz. Als auslösender Reiz kann aber auch eine Temperaturänderung dienen. Im Beispiel rechts enthält eine Kunststoffnanokapsel außer dem Wirkstoff eine Substanz, die bei Erwärmung gasförmigen Stickstoff abgibt, der schließlich die Kapselhülle sprengt.

den Farben, ohne ein einziges Farbstoffmolekül zu enthalten. Der Grund dafür sind regelmäßige Strukturen auf der Oberfläche, die zum Beispiel aus hochgeordneten Kolloidpartikeln bestehen. Diese wirken wie Beugungsgitter, die optische Interferenzen erzeugen, indem sie Licht jener Wellenlängen verstärken, die mit den Abmessungen der Teilchen übereinstimmen. Dadurch leuchtet die Oberfläche in den entsprechenden Farben.

Desgleichen beruht der berühmte Lotuseffekt bestimmter Blätter auf winzigen Noppen, die in regelmäßigen Mustern angeordnet und zusätzlich von einer wächsernen, hydrophoben Schicht überzogen sind. Dadurch bietet sich Wassertropfen nur eine extrem kleine Kontaktfläche, so dass sie abperlen und anhaftenden Schmutz mitnehmen. Bei Fassaden, Fenstern, Kleidung und im Sanitärbereich wird dieser Selbstreinigungseffekt inzwischen schon vielfach technisch genutzt.

Interesse an der kontrollierten Strukturierung von Oberflächen auf der Größenskala von Nanometern hat auch die

Elektronik, deren Bauteile immer kleiner werden. Hier wie bei anderen kommerziellen Anwendungen sollte das ideale Verfahren nicht nur möglichst einheitliche und hochgeordnete Strukturen liefern, sondern auch schnell, großflächig anwendbar und preiswert sein. Diese Anforderungen lassen sich aber oft nur schwer miteinander vereinbaren. So ermöglichen modernste Lithografiemethoden, die mit Elektronenstrahlen oder extrem kurzwelligem UV- oder Röntgenlicht arbeiten, zwar eine hohe Präzision, benötigen jedoch sehr teure Instrumente. Technisch weniger anspruchsvolle Methoden wie die klassische Fotolithografie mit längerwelligem UV-Licht sind dagegen preiswert und schnell. Allerdings liegt ihre Ortsauflösung bei mehreren hundert Nanometern: Feinere Details lassen sich damit nicht erzeugen.

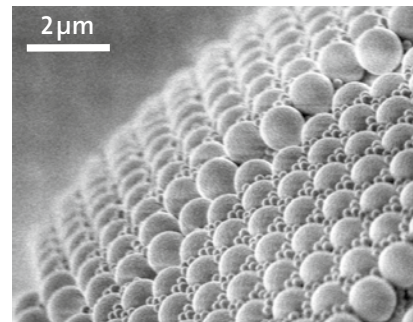
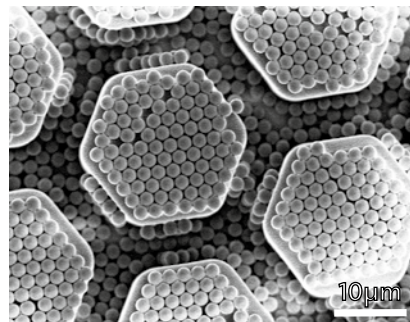
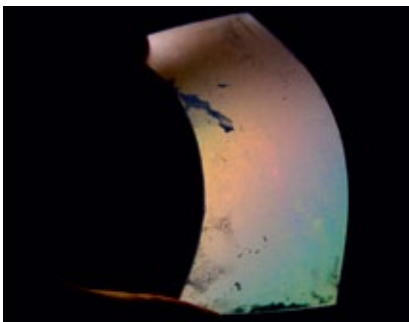
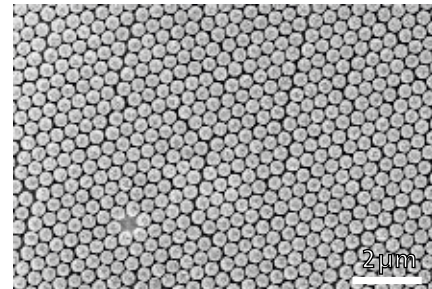
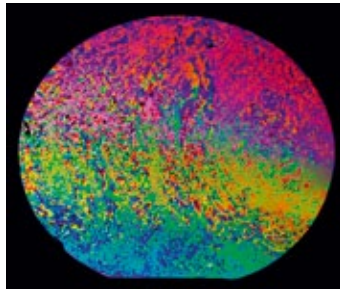
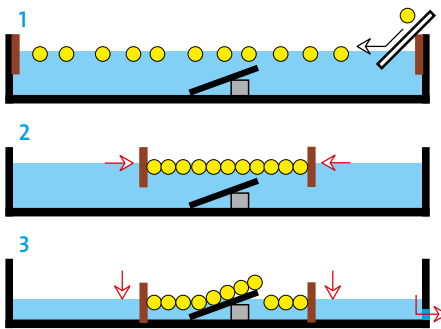
Um Oberflächen großflächig und mit wenig apparativem Aufwand sehr präzise strukturieren zu können, haben wir ein Verfahren entwickelt, das auf der zweidimensionalen Kristallisation von kolloidalen Nanopartikeln beruht. Es

Nanostrukturierung von Oberflächen

Mit **Miniemulsionsverfahren** gelingt es auch, Objekte mit einer einlagigen Schicht aus Nanokügelchen zu überziehen (im Bild oben links). Dazu bringt man die dispergierten Teilchen vorsichtig auf eine Wasseroberfläche, die den zu beschichtenden Gegenstand bedeckt. Die Partikel verbinden sich dort zu dicht gepackten »Flößen«, die man durch Einengen der Oberfläche zusammenschieben kann. Die so entstandene geschlossene Monolage setzt sich beim Ablassen des Wassers auf dem Gegenstand ab. Hier wurde auf diese Weise ein Siliziumwafer mit einer Schicht Nanokügelchen überzogen, die ihn durch Inter-

ferenz bunt schillern lässt (oben Mitte). Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt die regelmäßige Anordnung der Partikel (oben rechts).

Auch **komplexere sowie hierarchisch aufgebaute Strukturen** lassen sich erzeugen. Hier sind Kolloidmonolagen auf einer flexiblen Plastikfolie (unten links) und vorstrukturierten Mikrosäulen (unten Mitte) sowie eine komplexe Anordnung von kleineren und größeren Teilchen auf der Oberfläche eines wesentlich größeren Kügelchens (unten rechts) gezeigt.



nutzt aus, dass sich die Größe der Teilchen in einem Bereich zwischen 50 Nanometern und mehreren Mikrometern exakt einstellen lässt. Dabei schwankt der Durchmesser der Kolloide nur um zwei bis fünf Prozent. Für die meisten Zwecke reicht das aus – man bedenke, dass die Größentoleranz für offiziell zugelassene Spielbälle beim Fußball immerhin auch drei Prozent beträgt.

Zweidimensionale Kristallisation

Derart einheitliche Kügelchen bilden von allein – durch Selbstorganisation – geordnete periodische Strukturen, in denen jedes einzelne von genau sechs Nachbarn umgeben ist. Dieselbe Anordnung haben zum Beispiel Auslagen von Orangen oder Äpfeln an Marktständen. Kristallografen sprechen von einem hexagonalen Gitter.

Unser Verfahren zielt darauf ab, auf festen Substraten so genannte Monolagen solcher Kolloide zu deponieren, die aus nur einer einzigen Kugelschicht bestehen. Dazu bedecken

wir das zu beschichtende Objekt zunächst mit Wasser, auf das wir eine Kolloiddispersion aufbringen. Wenn wir vorsichtig genug sind, sinken die Teilchen nicht ab, sondern reihen sich nebeneinander an der Wasseroberfläche auf. So lässt sich die gesamte Wasseroberfläche schließlich mit einer einlagigen Kolloidschicht bedecken, wobei die Teilchen ein hochgeordnetes hexagonales Gitter bilden.

Wird die Flüssigkeit anschließend abgelassen, senkt sich die Monolage auf das Substrat ab. Dessen Beschaffenheit spielt dabei keine Rolle; es kann sich um Metall, Kunststoff, Keramik oder jedes andere feste, nicht wasserlösliche Material handeln. Die Oberfläche muss auch nicht glatt sein. Die zweidimensionale Kristallisation zur Herstellung von Monolagen gelingt deshalb mit Siliziumwafern ebenso wie mit flexiblen Plastiksubstraten und topografisch vorstrukturierten Oberflächen. Auch das Übereinanderschichten von Monolagen aus unterschiedlich großen Kügelchen ist möglich (Kasten oben).



Regelmäßige Anordnungen von Kolloidpartikeln eignen sich auch als Masken für Ätzprozesse, um Muster aus nanometerdünnen Säulen auf der Unterlage zu erzeugen. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Glasoberflächen entspiegeln. Denn die Säulen sorgen für eine graduelle Veränderung des Brechungsindex entlang der Nanostruktur, was die Grenzfläche optisch unscharf macht und dadurch eine klare Brechkante verhindert. Auch selbstreinigende Oberflächen auf Basis des Lotuseffekts lassen sich so herstellen.

Neue Form der Lithografie

Mit unseren Methoden zum Erzeugen von Nanokapseln aus Miniemulsionen konnten wir außerdem molekulare, metallhaltige Substanzen, so genannte Metallkomplexe, in polymere Kolloidpartikel einlagern. So erhielten wir funktionale Bausteine für Monolagen, die eine neuartige Form der Lithografie ermöglichen. Dabei dienen die Kolloidanordnungen nur als Vorstufen für Muster aus rein metallischen Nanopartikeln. Nach dem Aufbringen einer Monolage der metallkomplexhaltigen Nanokapseln auf einem Objekt wird deren Kunststoffschale durch ein Sauerstoffplasma verbrannt. übrig bleiben Schlackepartikel, die sich genau an den Berührungspunkten der ehemaligen Kolloidteilchen mit dem Substrat befinden. Diese bestehen aus den Metallkomplexen und lassen sich bei hohen Temperaturen in reine, kristalline Metallpartikel umwandeln.

Deren Größe ist exakt einstellbar. Sie hängt nämlich von der ursprünglichen Menge an Metallkomplex in den Nanokapseln ab. Da dies beliebig wenig sein kann, lassen sich extrem kleine Partikel erzeugen – mit Durchmessern unter zehn Nanometern. Solche Anordnungen von Metallteilchen können dann beispielsweise als Masken dienen, um entsprechend dünne Säulen aus einem Siliziumsubstrat zu ätzen.

Dabei wird der Abstand der Partikel vom Durchmesser der ursprünglichen Nanokapseln bestimmt. Der lässt sich gleichfalls sehr genau einstellen. Somit verbindet unser Verfahren die Vorteile der kolloidalen Lithografie – hohe Geschwindigkeit, großflächige Anwendung und niedriger apparativer Aufwand – mit einer Präzision im Bereich weniger Nanometer, die sonst nur mit sehr großen und teuren Instrumenten erreichbar ist. Verwendung finden hochgeordnete Anordnungen von Nanopartikeln außer zur Entspiegelung und für selbstreinigende Oberflächen auch für neuartige Datenspeichermedien, die mit magnetischen Nanopartikeln arbeiten.

Da sich mit dem Miniemulsionsprozess mehrere Metallkomplexe in definierten Mengenverhältnissen verkapseln lassen, sind auch komplexe Metalllegierungen damit zugänglich. So gelang es unserer Gruppe kürzlich, magnetische Eisen-Platin-Legierungen als Nanopartikel auf einem Substrat zu deponieren.

Das sind nur einige Beispiele für die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Miniemulsionen oder ganz allgemein Kolloiden. Ihr Anwendungsspektrum wird in dem Maß wachsen, wie es gelingt, ihnen immer spezifischere Eigenschaften zu verleihen. Aber auch die fundamentalen physikochemischen Eigenschaften der ungewöhnlichen Materialien lohnt es noch genauer zu untersuchen. Das betrifft so vermeintlich triviale Fragen wie die nach der maximalen Konzentration von Kolloiden in einer Flüssigkeit, bei der diese noch fließfähig bleibt. Interessant ist auch, inwieweit sich dispergierte Nanoteilchen als einfache Modelle zum Erforschen der Kristallisation – schließlich lagern sie sich in der gleichen, dicht gepackten Gitterstruktur zusammen wie Metalle – und von Materialeigenschaften wie der Ermüdung oder der Ausbreitung von Rissen eignen. Anwendungen und Grundlagenforschung werden sich so auch künftig in fruchtbarer Weise ergänzen. ~

DIE AUTOREN



Daniel Klinger (links) und **Nicolas Vogel** haben 2011 am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz promoviert. Seit Anfang

2012 ist Klinger wissenschaftlicher Mitarbeiter an der University of Santa Barbara (Kalifornien). Vogel forscht derzeit an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts). **Katharina Landfester** ist seit 2008 Direktorin am MPI für Polymerforschung. Nach ihrer Habilitation im Jahr 2002 an der Universität Potsdam erhielt sie 2003 zunächst eine Professur für makromolekulare Chemie an der Universität Ulm.

QUELLEN

Butt, H.J. et al.: Physics and Chemistry of Interfaces. Wiley-VCH, Weinheim 2006

Klinger, D., Landfester, K.: Stimuli-Responsive Microgels for the Loading and Release of Functional Compounds – Fundamental Concepts and Applications. In: Polymer 53, S. 5209–5231, 2012

Landfester, K.: Miniemulsionspolymerisation und Struktur von Polymer- und Hybridnanopartikeln. In: Angewandte Chemie 121, S. 4556–4576, 2009

Nayak, S., Lyon, L.A.: Weiche Nanotechnologie mit weichen Nanopartikeln. In: Angewandte Chemie 117, S. 7862–7886, 2005

Vogel, N. et al.: From Soft to Hard: the Generation of Functional and Complex Colloidal Monolayers for Lithography. In: Soft Matter 8, S. 4044–4061, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1192457



Ursula Wolf

Ethik der Mensch-Tier-Beziehung

Vittorio Klostermann, Frankfurt am Main 2012.

188 S., € 16,80

ETHIK

Praktische Philosophie des Tierschutzes

Dem Wolf fehlt die moralische Dimension des Menschen.
Aber deswegen ist er nicht minderwertig – sagt Wolf.

Tiere leiden nach wie vor im großen Stil – auch wenn längst ein breiter gesellschaftlicher Konsens besteht, dass ihnen keine vermeidbaren Schmerzen zugefügt werden sollten. Immer noch begeben der Mensch Tieren zu meist in ausbeuterischer oder gar zerstörerischer Absicht. Ein bedrückender Umstand, den Ursula Wolf zum Anlass nimmt, die ethischen Dimensionen des Problems neu auszuloten.

In der Verfassung Neuseelands genießen Menschenaffen Menschenrechte. Ansonsten hat der Tierschutz nur in Deutschland und in der Schweiz den Rang eines verfassungsmäßig verbrieften Staatsziels. Artikel 20a des deutschen Grundgesetzes stellt seit 2002 die Tiere neben den natürlichen Lebensgrundlagen explizit unter den Schutz des Staates. Und die schweizerische Bundesverfassung spricht sogar vom »Schutz der Würde der Kreatur«. Die schnöde Praxis ist von diesen hehren theoretischen Ansprüchen weit entfernt. Bei objektiver Betrachtung tut sich eine Gerechtigkeitslücke auf – mehr noch: ein moralischer Abgrund.

So nimmt der Verbrauch an Tieren für die menschliche Ernährung dramatisch zu. Mittlerweile summiert sich die Zahl der Nutztiere in industrieller Haltung weltweit auf 450 Milliarden – mehr als 60 für jeden Erdbewohner. Zudem leisten jährlich rund 100 Millionen Wirbeltiere einen mehr oder weniger qual-

vollen Beitrag zum menschlichen Erkenntnisgewinn. Allein in Deutschland wurde 2010 mit 2,84 Millionen Tierversuchen ein neuer Rekord aufgestellt. Im Jahr 2000 waren es noch 1,8 Millionen.

Ursula Wolf, Professorin für Philosophie an der Universität Mannheim, macht dem Menschen weder das Recht auf Nahrung noch die Freiheit der Forschung streitig. Ihr geht es auch nicht darum, Missstände und Verantwortungslosigkeiten lediglich anzuprangern. Vielmehr möchte sie grundsätzlich abklären, »ob wir moralische Verpflichtungen gegenüber Tieren haben und in welchem Sinn und in welcher Stärke«.

Die Autorin skizziert zunächst die wichtigsten moralphilosophischen Ansätze von der Antike bis zur Gegenwart. Dazu gehören etwa Platons Konzeption des Guten, Immanuel Kants aus der Vernunft geborener Imperativ, Arthur Schopenhauers altruistische Mitleidsmoral oder Peter Singers »Animal Liberation«, welche die utilitaristisch-egalitaristische Einbeziehung der Tiere in die Moral einfordert. Wolf arbeitet aus alledem einen zeitgemäßen theoretischen Ansatz heraus, der es zumindest erleichtern soll, im alltäglichen Handeln künftig mehr Rücksicht auf das Wohlbefinden der Tiere zu nehmen.

Wolf möchte ihre philosophische Erläuterung »eines durchdachten und konsistenten tierethischen Stand-

punkts« nicht als theoretische Übung, sondern als Fundament für das konkrete praktische Handeln verstanden wissen. Ihre Moralkonzeption des generalisierten Mitleids lehnt sich zwar an Schopenhauer an, geht jedoch über dessen einfache Mitleidsmoral hinaus. Bei aller Anerkennung der Tiere als empfindungs- und leidensfähige Wesen trägt sie dem Unterschied zwischen Mensch und Tier Rechnung. Selbst wer Tiere als moralische Wesen ansieht und etwa Menschenrechte für Menschenaffen fordert, muss ihnen deshalb noch längst nicht die Rechte von Staatsbürgern zugestehen.

Allerdings könnte man meinen: Wenn alle Tiere »ein moralisches Recht auf Beachtung der Grundbedingungen ihres Wohlbefindens« haben, dann müsste man ihnen eigentlich auch »das Leiden und die Angst, welche Raubtiere den anderen Tieren zufügen«, ersparen. Der wesentliche Unterschied zwischen uns und den Raubtieren besteht jedoch nicht im Leid der Opfer, sondern darin, dass letztere keine moralischen Akteure sind. Einzig der Mensch kann sich selbst die Pflicht auferlegen, Leid zu begrenzen.

Entscheidend für das Gewicht – und die Grenzen – der Moral ist letztendlich die Perspektive der jeweils handelnden Person. Ob es um Massentierhaltung, Tierversuche, Jagd, Zirkus oder Tiere im Zoo geht – erst in der konkreten Situation erweist sich, wer etwa für bessere Haltungsbedingungen auch einen höheren Preis für Tierprodukte akzeptiert oder sogar zur Einschränkung seines Fleischkonsums bereit ist.

Dafür, dass der Mensch sich herausnimmt, Tiere nahezu beliebig für seine Zwecke zu gebrauchen, sind allerdings nicht nur Gleichgültigkeit und Egoismus verantwortlich. Die alltägliche Moral, so Wolf, ist vielmehr immer noch von der tief verwurzelten Vorstellung geprägt, dass der Mensch in besonderer Weise ein wertvolles Wesen sei – so wertvoll, dass andere Wesen allein zu seinem Nutzen erschaffen worden sind. Doch unter dem moralischen Status, den Wolf dem Menschen zuschreibt, versteckt sich nicht irgendeine obs-

kure Werteigenschaft, die andere Wesen nicht haben. Er bedeutet lediglich, dass der Mensch im Gegensatz zum Tier unter bestimmte moralische Normen fällt: »Dass auf verschiedenartige Wesen teilweise verschiedene Normen anwendbar sind, und nicht auf jedes alle, heißt nicht, dass diese Wesen in ihrem Status oder Wert verschieden sind, sondern ist einfach eine Folge ihrer unterschiedlichen Ausstattung bzw. der unterschiedlichen Beziehungen zwi-

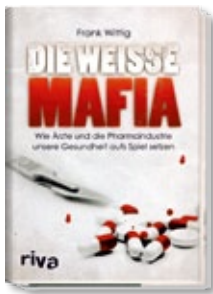
schen ihnen.« Tiere zählen also nicht weniger als der Mensch, nur weil sie jene moralische Dimension des Lebens nicht haben. Der alles entscheidende Punkt ist, dass Tiere eine unvergleichbare Leidensfähigkeit haben. Daher gibt es für Wolf auch »keinen Grund, Tiere in den Hinsichten, die sie mit uns teilen, schwächer zu gewichten«.

Ein außerordentlich kluges Buch, das jedem Leser zur Einsicht verhilft. Ob die Lektüre auch den Tieren nützt, bleibt

indes ungewiss. »Die Mehrheitsauffassung«, so Wolfs illusionsfreie Einschätzung, »ist wohl immer noch diejenige, dass das Wohlbefinden der Tiere zwar beachtet werden sollte, aber nur dort, wo dies für uns zu keinerlei Verzicht führt.«

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist und Publizist in Celle.



Frank Wittig
Die weiße Mafia
Wie Ärzte und die Pharmaindustrie unsere Gesundheit aufs Spiel setzen
riva, München 2013, 250 S., € 19,99

GESUNDHEITSSYSTEM

Geld regiert die Medizin

Wo große Summen umgesetzt werden, entsteht Anreiz für kriminelles Handeln. Aber wieso sollen gerade Ärzte die größten Kriminellen sein?

Frank Wittig ist Wissenschaftsjournalist beim Südwestrundfunk und beschäftigt sich seit Jahren mit Missständen in unserem Gesundheitssystem. Für seine Dokumentationen erhielt er zahlreiche Preise, darunter den Journalistenpreis des Deutschen Netzwerks Evidenzbasierte Medizin (DNEbM) für das Feature »Betrifft: Überflüssige Operationen«. Die evidenzbasierte Medizin (EbM) stützt ihre Therapieempfehlungen auf Metaanalysen mehrerer klinischer Studien, die untersucht haben, ob eine Therapie statistisch signifikante Vorteile für den Patienten bringt oder nicht. Ausschlaggebend sollen dabei die Zielgrößen »längeres Leben« oder »verbesserte Lebensqualität« sein.

Das Konzept der EbM ist vor allem ökonomisch sinnvoll; für Wittig allerdings scheint es das Maß aller Dinge zu sein. Wenn jedoch der Arzt einen kon-

kreten Patienten vor sich hat, den er mit einem Stent an einer Engstelle in den Herzkranzgefäßen möglicherweise vor einem Herzinfarkt schützen kann, dann ist die Tatsache, dass klinische Studien einen Nutzen dieser Maßnahme im Allgemeinen statistisch nicht hinreichend belegen konnten, für ihn weit weg. Er orientiert sich an dem vorwiegend mechanistischen Menschenbild der heutigen Medizin und tut das, was er gelernt hat: Er versucht die Körperfunktionen wieder herzustellen und weiteren Schaden abzuwenden – logisch nachvollziehbar und überzeugend. Dagegen unterstellt Wittig Kardiologen, sie würden bewusst neue Therapiemöglichkeiten entwickeln, die sich in einigen Jahren als nutzlos herausstellen – »ein nachhaltiges Geschäftsmodell, das sich ein paar Jahre lang gut an den Kunden verkaufen lässt«. Das klingt doch ein

wenig nach Verschwörungstheorie. Was Wittig als bewusste Täuschung und Geldschneiderei darstellt, ist eher die Trägheit einer Planwirtschaft.

An Beispielen wie der arthroskopischen Knorpelglättung am Knie, Gebärmutterentfernungen, vorbeugenden Herzkatheteruntersuchungen und Früherkennung von Prostatakrebs stellt der Autor dar, wie Ärzte wider besseres Wissen Operationen durchführen, deren Nutzen in klinischen Studien widerlegt wurde, die aber besser vergütet werden als konservative Behandlungsmaßnahmen. Er klagt sie pauschal an, nicht an das Wohl des Patienten, sondern nur an den eigenen Geldbeutel zu denken. Aber nicht die Ärzte haben sich das seit 2004 obligatorische Abrechnungssystem nach Fallpauschalen ausgedacht, sondern Bürokraten, die offensichtlich nur »technische« Aktionen am Patienten honorieren. Und es war auch nicht die Idee von Ärzten, sich Betriebswirte vor die Nase zu setzen, die ihnen diktieren, wie viele Patienten sie mindestens zu operieren haben.

Weiter berichtet Wittig, wie Pharmaunternehmen Daten in klinischen Studien zur Zulassung eines Medikaments manipulieren, wie sie die Karrieren ehrgeiziger Mediziner fördern und als Sponsoren die Meinung vorgeblich unabhängiger Gremien beeinflussen. Er stellt die führenden Köpfe der medizinischen Fachgesellschaften an den Pranger, alles renommierte Mediziner, die nach seiner Vorstellung sämtlich mit der Industrie verbandelt sind, da sie ja Karriere gemacht haben, und wirft ih-

nen vor, beim Erstellen von Therapieleitlinien nur an die Sicherung ihres Einkommens zu denken.

Sicher hat Wittig in vielen Dingen nicht Unrecht. Insbesondere die enge Verbindung von Industrie, Meinungsbildnern und medizinischer Forschung gibt Anlass zu Bedenken (siehe die Artikel in diesem Heft S. 30 und 36). Aber es ist einseitig, die Misere unseres Gesundheitssystems allein auf die Geldgier der Beteiligten zurückzuführen. Die Sache liegt viel komplexer, schon weil es sich nicht um unbelebte Ware handelt und der Erfolg der Dienstleistung in der Regel nicht garantiert werden kann. Wenn tatsächlich menschliches Handeln nur noch durch finanzielle Anreize gesteuert würde, wäre das ein Armutszeugnis für unsere Gesellschaft, aber nicht der Fehler einer einzelnen Berufsgruppe.

Hier misst der Autor die Moral von Mitarbeitern der Pharmaindustrie sowie Geräteherstellern einerseits und Ärzten andererseits mit zweierlei Maß. Während er die Machenschaften der

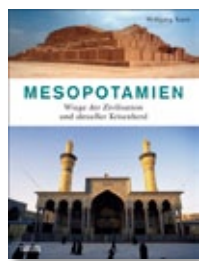
Pharmaindustrie allenfalls als »unerhört« bezeichnet, nennt er Ärzte »freche Lügner und Betrüger«, unterstellt ihnen »schamlose Geldgier« und beschuldigt sie des »Diebstahls« und der »Körperverletzung«. Die Erwartungshaltung an Ärzte ist offensichtlich extrem hoch: Sie sollen weder nach Macht und Anerkennung streben noch finanzielle Interessen haben und sich am besten mit dem Dank und dem Vertrauen ihrer Patienten zufrieden geben. Ein Vertrauen, das dieses Buch weit gehend zerstört.

Beim Thema »Übertherapie am Lebensende« scheint Wittig zum ersten Mal auch andere Beweggründe in Betracht zu ziehen. Vielleicht sei es – Welch Wunder – die Absicht zu helfen, welche die Ärzte zuweilen zu blindem Aktionismus verführe. In seinem Schlusswort sagt er zwar, es gebe viele Mediziner, die trotzdem einen guten Job machen. Dennoch bleibt nach der Lektüre dieses Buchs der Eindruck bestehen, man könne seinem Arzt eigentlich nicht mehr vertrauen.

Die breite gesellschaftliche Diskussion zur Medizinwende, die Wittig mit seinem Buch anstoßen will, ist sicher notwendig. Der Leser findet durchaus erhellende Informationen zu den Verflechtungen verschiedenster Interessengruppen in unserem Gesundheitssystem. Insofern mag das Buch lesenswert sein. Wittig macht es sich jedoch zu einfach, indem er Ärzten reine Habgier und Opportunismus unterstellt und sie zu den hauptschuldigen »Profiteuren, Kollaborateuren und Mitläufern« macht. Für wen das Wasser auf seine Mühlen ist, der findet in diesem Buch Bestätigung. Für alle anderen sollte die Botschaft ausreichen, dass ein gesundes Misstrauen im Kontakt mit unserem Gesundheitssystem durchaus angebracht und das Einholen einer Zweitmeinung absolut legitim ist.

Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.



Wolfgang Korn
Mesopotamien
Wiege der Zivilisation und aktueller Krisenherd
Theiss, Stuttgart 2013, 176 S., € 39,95

ARCHÄOLOGIE

Zurück zu den Wurzeln

Mit einer grandiosen Fleißarbeit führt der Autor durch 17000 Jahre Menschheitsgeschichte und sucht die Anfänge aller Zivilisation.

Wurzelt alle europäische Kultur letztlich in Mesopotamien, jener heute als »Krisenherd« und Quelle fundamentalistischer Ideologien bekannten Region, zu der Teile der Türkei und Syriens sowie der Irak gehören? Mit dieser These im Kopf nimmt der Wissenschaftsjournalist Wolfgang Korn seine Leser mit auf eine Studienreise durch

die Zeit, von den ersten Dörfern und Städten der Menschheit über altorientalische Reiche wie Babylon und Assur bis in die unerfreuliche Gegenwart.

Das stramme Programm wird dabei nie langweilig. Experten kommen zu Wort, die den altorientalischen Gesellschaften auf der Spur sind, mal durch das Studium der in Keilschrift notierten



In solchen Skulpturen assyrischer Paläste des 1. Jahrtausends v. Chr. erkannten viele westliche Betrachter die goldenen Cherubim des Alten Testaments wieder.



Josef Honerkamp

Was können wir wissen? Mit Physik zur Grenze verlässlicher Erkenntnis

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2013. 367 S., € 24,95

Das Buch hat eine gut verdauliche Häppchenstruktur. Es sammelt Beiträge, die der emeritierte Professor für theoretische Physik im Blogportal scilogs.de online publiziert hat. Für den Druck hat er sie thematisch zu einer Folge kurzer Kapitel geordnet, die einen weiten Bereich zwischen Physik und Naturphilosophie abdecken. Im ersten Teil »Verlässliches über Raumzeit und Quanten« gibt er unter anderem zu modischen Spekulationen über die Nähe von Quantenmechanik und Buddhismus ein kluges Urteil ab. Der zweite Teil behandelt Komplexität und Zufall; hier ist Honerkamp in seinem Element und erörtert ganz ohne Mathematik knifflige Themen wie Emergenz und Quanteninformatik. Drei weitere Teile wagen sich an philosophische Fragen: die Mathematik als Sprache der Natur, das Problem der Willensfreiheit und das prekäre Verhältnis von Naturwissenschaft und Religion. Insgesamt ein zuverlässiger Wegweiser zu den Rändern unseres Wissens. MICHAEL SPRINGER



Hans-Jörg Bullinger, Brigitte Röthlein

Morgenstadt. Wie wir morgen leben: Lösungen für das urbane Leben der Zukunft

Hanser, München 2012. 286 S., € 24,90

Schon seit sechs Jahren leben weltweit mehr Menschen in Städten als auf dem Land, und von denen wohnt jeder zehnte in einer Megacity mit mehr als zehn Millionen Einwohnern. Flächenverbrauch, Ressourcenverschwendung, Versorgung, Müll und Abwasser – ebenso vielfältig wie die Probleme sind die Lösungswege, die Hans-Jörg Bullinger, zum Zeitpunkt der Drucklegung noch Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, und die freie Wissenschaftsautorin Brigitte Röthlein anbieten. Das ist interessant und gut geschrieben, erweist sich aber als Sammelwerk von Projekten, an denen Fraunhofer-Institute maßgeblich beteiligt sind – und Erfolge vorzuweisen haben. Von Fehlschlägen, Irrwegen oder »fremden« Projekten ist nicht die Rede. Die Fraunhofer-Gesellschaft und ihre Institute sind in Deutschland sicher die erste Adresse für angewandte Wissenschaft, aber durch die Beschränkung auf deren Werke erhält das Buch einen sehr werblichen Charakter. KLAUS-DIETER LINSMEIER



Nadja Podbregar, Dieter Lohmann

Im Fokus: Strategien der Evolution. Geniale Anpassungen und folgenreiche Fehlritte

Springer Spektrum, Heidelberg 2013. 272 S., € 19,95

Wer sich gern von den zigtausendfachen Erscheinungen in der Welt der Lebewesen und vom Reichtum der Evolution faszinieren lässt, ist mit diesem kleinen, aber inhaltsreichen Band gut bedient. Nadja Podbregar und Dieter Lohmann vom wissenschaftlichen Redaktionsbüro MMCD in Düsseldorf erzählen lebendig und gut verständlich von unzähligen, oft erstaunlichen Phänomenen und Anpassungen bei großen und kleinen Organismen. Biologen dürften vieles davon wissen, aber für Laien ist das Buch eine Fundgrube – ob es darum geht, wie Wüstentiere dem Hitzetod entkommen, wie räuberische Lebewesen der Tiefsee ihre Beute beleuchten, wie Wale navigieren oder wie die Dinosaurier überhaupt entstehen konnten. Alle Fassetten der Evolution werden angesprochen, vom Massensterben bis zum Kannibalismus. Und auch der Mensch findet sich wieder. ADELHEID STAHNKE

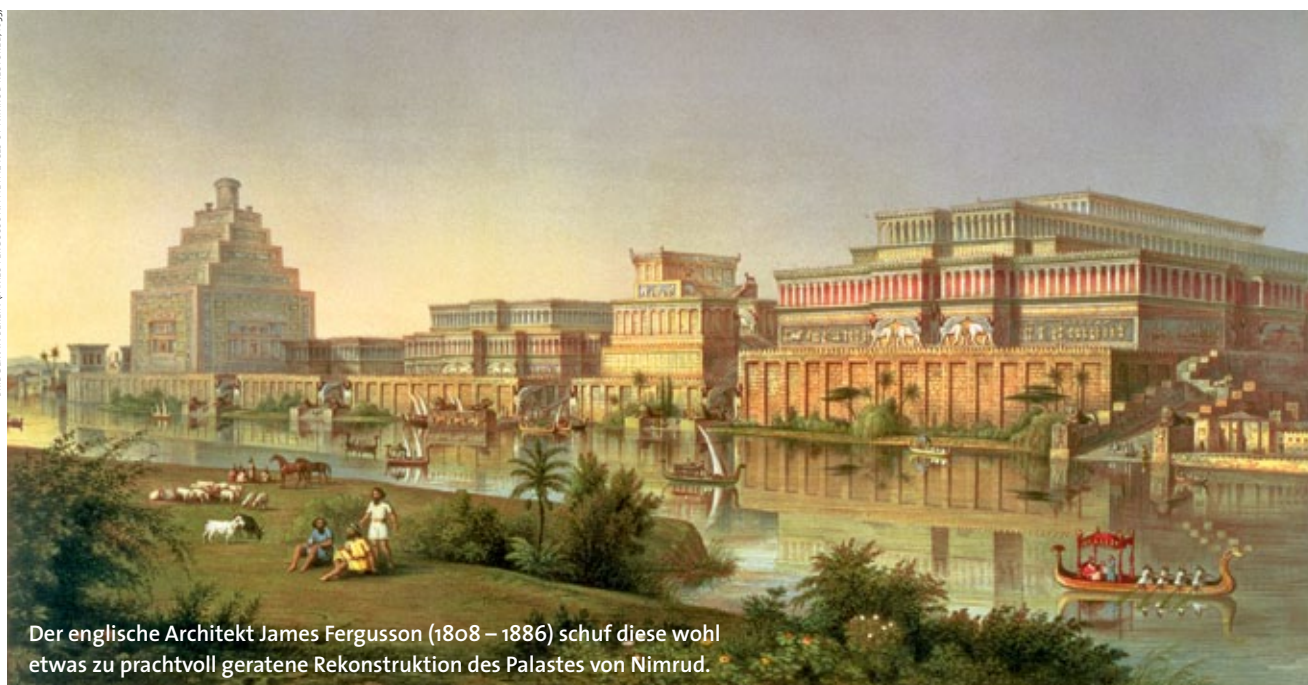


Ben Moore

Elefanten im All. Unser Platz im Universum

Aus dem Englischen von Friedrich Griese und Monika Niehaus. Kein & Aber, Zürich 2012. 382 S., € 24,90

Der Brite Ben Moore, Professor für Astrophysik an der Universität Zürich, versteht ohne Zweifel sein Fach. In klaren und eingängigen Worten erklärt er uns die ganze Kosmologie, von den ersten Millisekunden nach dem Urknall bis zu jener trostlosen fernen Zukunft, in der man keine Sterne mehr am Himmel sehen kann, weil sie alle durch die kosmische Expansion außer Sichtweite geraten sind. Dunkle Materie, dunkle Energie, Bildung der chemischen Elemente eingebettet in den Lebenszyklus der Sterne, Entstehung der Planeten – all dies fügt er zu einem konsistenten, aktuellen Gesamtbild zusammen. Die eingestreuten Geschichten aus seinem Leben sind eine willkommene Auflockerung, und seine Amateuraussichten über die Geschichte der Menschheit und ihres Wissens – na ja, die stören nicht besonders. CHRISTOPH PÖPPE



Der englische Architekt James Fergusson (1808 – 1886) schuf diese wohl etwas zu prachtvoll geratene Rekonstruktion des Palastes von Nimrud.

Steuerlisten, Verträge, Gesetze, Chroniken und Göttermythen, mal durch archäologische Grabungen oder systematisches Abgehen einer Stätte mit präziser Dokumentation aller an der Oberfläche erkennbaren Fundstücke («survey»). Neben Wissen zur Geschichte vermitteln die Forscher auch Wissenschaftsgeschichte, denn manche Stätten wurden schon um die Wende zum 20. Jahrhundert untersucht. Viele Erkenntnisse von damals gelten auch heute noch, andere entsprangen dem Zeitgeist und wurden inzwischen durch neuere Methoden und Theorien in Frage gestellt.

Hielt man beispielsweise den Fruchtbaren Halbmond, eine sichelförmige Region Nordmesopotamiens, bis vor wenigen Jahren noch für die Geburtsstätte der Jungsteinzeit, in der Menschen das Jagen und Sammeln zu Gunsten einer bäuerlichen Lebensweise aufgaben, so belegen inzwischen weiter nördlich gelegene Stätten, dass die Menschheit auch andernorts damit experimentiert hat. Und galt der Dreiklang Siedlung, Landwirtschaft und Keramik als unteilbares Kriterium dieser Entwicklung, wissen Forscher heute, dass mitunter einzelne Elemente für sich erprobt und sogar wieder aufgegeben wurden.

Was trieb sie aber dazu, sich um 4000 v. Chr. auf vergleichsweise kleiner Fläche dicht zu drängen und ihre Häuser mit einer Stadtmauer zu umgeben? Diese Frage ist bis heute ungelöst. War es die Notwendigkeit, eine Vielzahl von Menschen für den Bau von Bewässerungskanälen und Dämmen aufzubieten? Oder schierer Bevölkerungsdruck? Für jede Erklärung gibt es Argumente – und auch dagegen.

So lebten in Uruk um 3000 v. Chr. gut 50000 Menschen, während zur gleichen Zeit Dörfer im Umland verlassen wurden. In Ur hingegen waren es damals wesentlich weniger Einwohner, gleichzeitig existierten nach wie vor kleinere Siedlungen im Umland. Erst 500 Jahre später hatte auch Ur den Urbanisierungsprozess vollzogen, was darauf hindeutet, dass dieser in Uruk von einer Institution veranlasst und gesteuert wurde.

Wie aber bilden sich die dazu notwendigen Hierarchien aus? Auch das eine Frage mit vielen Antworten, die der Autor kundig zu geben weiß.

Sumer, Babylonien, Assyrien, Persien – im Lauf der Jahrtausende entstanden Reiche und vergingen wieder. Wer in Mesopotamien Schwäche zeigte, wurde schnell von ehemaligen Vasallen oder einem Neuankömmling verdrängt.

Alexander der Große eroberte Persien und hinterließ es den Seleukiden. Diese wiederum unterlagen im 3. Jahrhundert v. Chr. den aus Asiens Steppen kommenden parthischen Reiterkrieger. Eine Randnotiz der Geschichte: Hätte der römische Feldherr Crassus nicht 54 bis 53 v. Chr. einen Feldzug gegen die Parther geführt, wären Seidenstoffe vielleicht nie nach Rom gelangt – und es wäre keine Seidenstraße entstanden, um den Bedarf daran zu decken.

Mit der griechischen oder der islamischen Eroberung lässt Korn die Geschichte nicht enden, sondern erzählt weiter: von den Machtkämpfen innerhalb des Islams, die bis heute anhalten, über Kalifen und Osmanen und die Zeit der Kolonialisierung bis hin zu den Golfkriegen. Mit einem essayistischen Vergleich zwischen dem Nihilismus und Materialismus unserer heutigen westlichen Gesellschaft und dem mesopotamischer Kulturen schließt der Autor den Kreis. Hier spannt er den Bogen vielleicht ein wenig weit und verliert sich etwas in der Spekulation, doch das kann den guten Gesamteindruck nicht schmälern.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Günther Bloch, Elli H. Radinger
Affe trifft Wolf
Dominieren statt kooperieren?
Die Mensch-Hund-Beziehung
 Kosmos, Stuttgart 2012. 192 S., € 19,99

SOZIALVERHALTEN

Die Kunst, mit Hunden zu leben

Das Verhalten von Wölfen erzählt uns, wie wir mit Hunden umgehen sollten.

Mit dem Affen sind natürlich wir Menschen gemeint und mit dem Wolf die Hunde. Die Autoren sind erfahrene Hundehalter und beobachten zudem seit vielen Jahren Wolfsrudel in Nordamerika. Bloch arbeitet außerdem als Hundetrainer und -berater. In diesem Buch legen die beiden Experten dar, worauf es bei einer harmonischen Hundehaltung ankommt. Zwar wollen sie dafür ausdrücklich keine Anleitung vorlegen – letztlich tun sie es aber doch, wenn auch mehr auf übergeordneter »psychologischer« Verständnisebene. Jedes Kapitel schließt mit praktischen Ratschlägen und Orientierungshilfen.

Ihre Kernthese: Wir Menschen haben als Primaten eine grundsätzlich andere

soziale Einstellung als Hunde. In der Weise von Affengesellschaften, bei denen ein »Boss« das Sagen hat und darauf auch Wert legt, stehen für uns Dominanzstrukturen im Vordergrund. Diese betonte Hierarchie versuchen wir oft unseren Hunden aufzuzwingen. Die kommen damit zwar zurecht, wenn es denn sein muss, aber eigentlich sind sie – wie ihre wölfischen Vorfahren – eher auf gemeinsames Tun und Harmonie programmiert.

Nach den Beobachtungen der Autoren an Wölfen und auch verwilderten Hunden ist das Zusammenleben vorrangig vom sozialen Miteinander bestimmt. Die Rangpositionen verschwinden dahinter oft.

Ein selbstbewusster Hund lässt sich begrüßen und erwartet Bekundungen der Unterwürfigkeit vor allem von einem Jungtier wie dem schwarzweißen Timber (Bild links); wird dieser zu aufdringlich, geht er sehr schnell zum Drohverhalten über (rechts).



Adelheid Stahnke

Die Rezensentin ist promovierte Ethologin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Hanno Charisius, Richard Friebe, Sascha Karberg

Biohacking

Gentechnik aus der Garage

Hanser, München 2013. 286 S., € 19,90

GENTECHNIK

Die Gen-Bastelstube für zu Hause

Drei Journalisten zimmern sich ein biologisches Labor zusammen und betreiben im Büro Gentechnik – ein Versuchsprotokoll.

Molekularbiologen analysieren an Universitäten und in professionellen Laboren das Erbgut von Pflanzen und Tieren. Dort züchten sie, ausgestattet mit den neuesten Geräten und unter strengsten Sicherheitsauflagen, gentechnisch veränderte Organismen – ein Job für Experten, die genau wissen, was zu tun ist. So sollte man meinen. Und so irrt man sich.

Langsam und von der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen findet die Gentechnik ihren Weg aus den Hightech-Laboren in die heimische Küche – oder das kleine Berliner Büro von Hanno Charisius, Richard Friebe und Sascha Karberg. Die drei Journalisten beschreiben, wie sie sich völlig legal DNA-Sequenzen liefern lassen, mit denen man das Gen für das tödliche Gift Rizin herstellen kann, ihr eigenes Erbgut nach einem »Sportler-Gen« durchforsten und mit kriminalbiologischen Methoden genetische Fingerabdrücke erstellen.

Kann man heutzutage wirklich mit einfachen, frei zugänglichen Mitteln Erbgut analysieren oder gar manipulieren? Was für eine gefährliche molekularbiologische Suppe brodelt da außerhalb der akademischen Genforschung? Diesen Fragen gehen die Autoren nach – und werden dafür auf Zeit selbst zu »Do-it-yourself-Biologen«. Spannend und auch für den biologischen Laien verständlich geschrieben lassen sie den Leser an ihrem »beispiellosen, zweijährigen Selbstversuch« teilhaben.

Das Handwerk für ihre Experimente eignen sie sich auf einer Reise in die USA an. In einem heruntergekommenen Haus in der Nähe von Boston treffen sie auf Nerds, die nicht wie früher Computerplatinen verlöten, sondern »Bio-Bausteine« zusammensetzen, Bakterien gentechnisch mit allen erdenklichen Eigenschaften ausstatten und Zellen züchten, die nach jeder Teilung die Farbe wechseln. Schnell wird klar: Grundständige Genforschung ist in den Vereinigten Staaten längst kein universitäres Monopol mehr. In Garagen oder offenen Gemeinschaftslaboren gehen Wissenschaftler und Laien ihrem Spieltrieb nach, aus Spaß an der Sache und ganz ohne das akademische Korsett zielgerichteter Forschung.

Schnell haben Charisius, Friebe und Karberg ihre Grundausbildung abgeschlossen. Eine Maschine zum Vervielfältigen von DNA bekommen sie für schlappe 320 Euro bei E-Bay. Chemikalien beziehen sie über Apotheken und Lieferanten für Arztpraxen – alles ganz legal. Für 3500 Euro ist am Ende ein einfaches Minilabor komplett.

Der erste Untersuchungsgegenstand ist eine Sushi-Probe aus dem benachbarten Restaurant. Kommt dort vielleicht nicht der teure Fisch auf den Tisch, den die Speisekarte verspricht? Ein Gentest könnte Klarheit schaffen. Hierfür muss aus dem Erbgut des Fisches nur ein artspezifisches Gen untersucht werden. Mit einiger Mühe gelingt es den Hobby-

forschern tatsächlich, ein solches zu isolieren. Aber um zu wissen, um welchen Fisch es sich handelt, müsste das Gen sequenziert werden – und das kann nur ein professionelles Labor leisten.

Deutlich weiter kommen die Journalisten auf dem Pfad der Kriminalbiologie: Sie erstellen einen genetischen Fingerabdruck und überführen einen Verdächtigen, der seit Längerem in Berliner Parks sein Unwesen treibt. Trickreich und unbemerkt nehmen sie Speichelproben und sind sich anschließend einigermaßen sicher: Der Übeltäter muss »klein, schwarz und pudelähnlich« sein. Das zumindest legt der DNA-Vergleich des Hundesabbers mit den im Park verstreuten Tretminen nahe.

Kann man heutzutage mit Amateurmitteln Erbgut analysieren oder gar manipulieren? Vermutlich ja, doch zuverlässig oder gar einfach durchführbar sind die Analysen nicht. Und ein Killerbakterium wird wohl noch lange nicht in irgendeinem Hinterhof entstehen – allein, weil der Aufwand zu groß und das Knowhow der Hobbybiologen noch zu begrenzt ist.

So steckt die spielerische Do-it-yourself-Biologie wohl noch in den Kinderschuhen, auch wenn die Autoren sie in der Tradition einer »Bürgerwissenschaft« sehen, von der sie sich mehr demokratische Teilhabe an der viel diskutierten Gentechnik erhoffen. Von einem »aufgeklärten Bio-Bürgertum« ist die Rede, das als »Gegenstück und kompetente Kontrollinstanz zu den Bioeliten im akademischen, privatwirtschaftlichen und Verwaltungs-Sektor« dienen könnte.

Bis dahin ist es sicher noch ein langer Weg – aber das Buch macht Lust darauf, diesen mitzugehen und selbst einmal auszuprobieren, wie weit man als Biohacker kommen kann. An das Equipment kommt man zurzeit nicht ganz so günstig wie die Autoren; aber bei E-Bay habe ich kürzlich immerhin einen Genkopierer für 699 Euro gesehen.

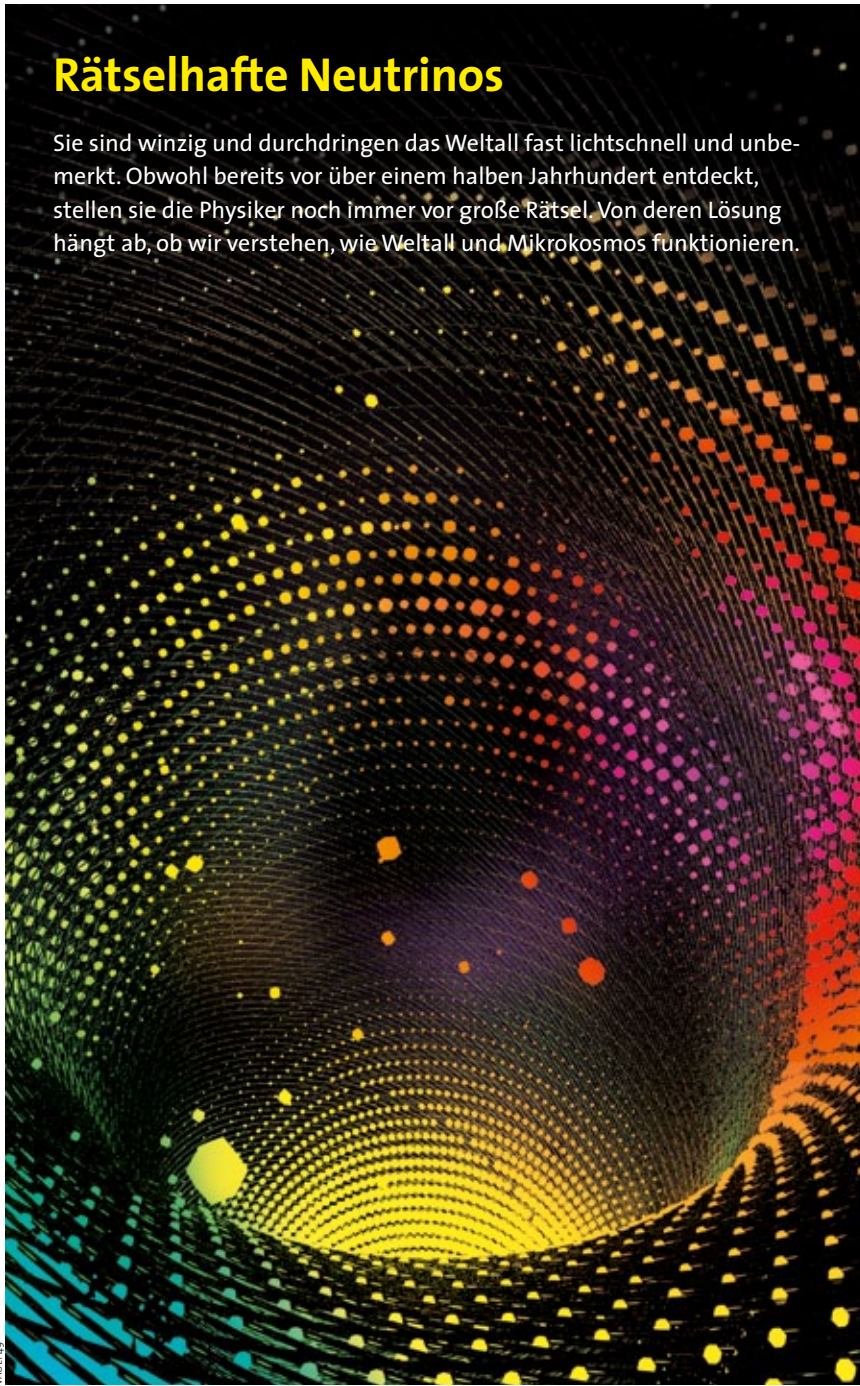
Tim Haarmann

Der Rezensent ist promovierter Geograf und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Bremen.

Rätselhafte Neutrinos

Sie sind winzig und durchdringen das Weltall fast lichtschnell und unbemerkt. Obwohl bereits vor über einem halben Jahrhundert entdeckt, stellen sie die Physiker noch immer vor große Rätsel. Von deren Lösung hängt ab, ob wir verstehen, wie Weltall und Mikrokosmos funktionieren.

VAULT_49



Epigenetik neurodegenerativer Erkrankungen

Warum bei Leiden wie der Alzheimerdemenz massiv Hirnzellen absterben, ist noch immer nicht wirklich klar. Nun zeigt sich, dass Mechanismen eine Rolle spielen, die mit der Aktivierung von Genen zu tun haben. Daraus ergeben sich viel versprechende neue Therapieansätze.

Wissenschaftliches Fehlverhalten im Fokus

Zu Guttenberg, Koch-Mehrin, Schavan – prominente Plagiatsskandale schüren Zweifel an der Qualitätssicherung in der Forschung. »Spektrum« diskutiert mit Bernhard Eitel, dem Rektor der Universität Heidelberg, und Bernhard Kempen, dem Vorsitzenden des Deutschen Hochschulverbands.



HANS JURCHVOGEL

Marco Polo – forscher Schwindler oder Forschungsreisender

17 Jahre habe er in China verbracht, versicherte der venezianische Kaufmann. Kritikern gilt er als Betrüger, der mit viel Fantasie von anderen abschrieb. Doch besaß Marco Polo Insiderinformationen zum Wirtschafts- und Finanzsystem Chinas, die nur einen Schluss zulassen: Die Wunder, von denen er berichtete, sah er tatsächlich mit eigenen Augen.



TRAVIS BATHORNE

Bienengroße Roboter

Kaum ein Gramm schwer, sollen sie fliegen und kooperativ Ziele verfolgen können: etwa Verschüttete nach einem Erdbeben ausfindig machen. Die gewaltigen technischen Hindernisse auf dem Weg zum ersten voll funktionsfähigen Modell sind bereits zum größten Teil überwunden.

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

DAMIT AUS NEUGIER WISSEN WIRD!

In Kooperation mit  IPN

Spektrum **neo**

DER WISSENSCHAFT

Nr. 5

Das Wissenschaftsmagazin für junge Leserinnen und Leser

Unsere Erde

Spektrum **neo**

Eine Leseempfehlung der
Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH 

mit Poster!

Regen, Blitze, Hitze
Wo das Wetter alle Rekorde bricht

Vulkane
Wenn die Erde Feuer spuckt

Meere
neo-Reporter machen Jagd auf Monsterwellen

JETZT ALS **ABO** VERSCHENKEN

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert. Jetzt abonnieren und sparen: Vier Ausgaben pro Jahr für je € 5,50 inkl. Inlandsversand (statt € 6,50 im Einzelkauf)!

www.spektrum-neo.de/abo



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

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



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

www.spektrum.de/digitalabo



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND