

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ARCHÄOLOGIE
Die Astronomie
der Kelten



SEPTEMBER 2013

SCHWERPUNKT
FOTOSYNTHESE
Wie Pflanzen mit
Licht Wasser spalten –
und wie sich das
technisch nutzen
lässt

BUNDESTAGSWAHL

Mathematische Fallstricke
im neuen Gesetz

TECHNIK

So soll die Costa Concordia
geborgen werden

DER DUNKLE KOSMOS

AKTUELLER ÜBERBLICK:
Unser Wissen über das
unbekannte Universum

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



DAMIT AUS NEUGIER WISSEN WIRD!

In Kooperation mit  IPN

Spektrum **neo**

DER WISSENSCHAFT

Nr. 6

Das Wissenschaftsmagazin für junge Leserinnen und Leser

Tierisch intelligent

Was denken Hunde, Elefanten & Co?



Empfohlen von  Stiftung Lesen

mit Poster!

Wildes Leben in der Stadt
Anpassungskünstler

Sprache
Gut gekrächzt: Wie sich Tiere unterhalten

Kraken
Achtarmige Schlaumeier der Meere

Auch im Handel erhältlich!

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)!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum-neo.de/abo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Der Teufel steckt im Detail

Am 13. Januar 2012, um 21.45 Uhr, kollidierte das italienische Kreuzfahrtschiff »Costa Concordia« bei der Insel Giglio vor der toskanischen Küste mit einem Felsen und schlug leck. Seitdem liegt es mit über 60 Grad Schlagseite auf Grund. Nach aufwändigen Vorarbeiten steht nun die Bergung an – ein technisches Vorhaben, das sämtliche bisherigen Operationen dieser Art an Größe und Komplexität übertrifft. Das Wrack liegt im Pelagos-Schutzgebiet, dem größten europäischen Reservat für Meeressäuger wie Delfine und Zwergwale. Die steil abfallende Felswand, auf der das Schiff in prekärer Lage ruht, beherbergt wertvolle Korallenriffe und Seegrasswiesen. Der erste Schritt der Bergung – das Aufrichten und Stabilisieren des Wracks – ist besonders heikel. Sollte die Costa Concordia dabei auseinanderbrechen oder den unterseeischen Abhang hinabrutschen, wäre der ökologische Schaden unabsehbar. Und die Uhr tickt: Je länger das Schiff im Salzwasser liegt, desto stärker korrodiert das Material.

Entsprechend umfangreich sind die Vorkehrungen, die eine solche Katastrophe verhindern sollen; sie reichen von der Errichtung massiver Stahlplattformen unter Wasser, die es später wieder möglichst spurlos zu entfernen gilt, über die Montage regulierbarer Schwimmkörper am Rumpf bis zu einer umfangreichen Verstärkung des Schiffsbodens. Wie die für September geplante Aktion im Einzelnen ablaufen soll und welche technischen Kniffe die Experten dabei nutzen, erfahren Sie ab S. 52.

Ebenfalls im September, am 22., findet die Wahl zum 18. Deutschen Bundestag statt – mit einer Premiere hinter den Kulissen. 2008 hatte das Bundesverfassungsgericht Teile des Wahlgesetzes, wie es seit 1956 galt, für verfassungswidrig erklärt. Im Speziellen kritisierte es das so genannte negative Stimmgewicht, also die Tatsache, dass wegen der Verrechnung von Überhangmandaten zusätzliche Stimmen für eine Partei diese im Endeffekt Abgeordnetenmandate kosten können. Zwar verabschiedete der Bundestag 2011 ein neues Wahlgesetz, doch erwies dieses sich keineswegs als besser. Prompt kassierte das Verfassungsgericht das Vorhaben erneut. Das Ergebnis ist eine weitere Revision des Gesetzes, die im Mai in Kraft trat und nun bei der Bundestagswahl erstmals zur Anwendung kommt.

Eine Schlüsselrolle in dem Verfahren spielte der Physiker Martin Fehndrich. Er war einer der beiden Kläger, die den ersten Gerichtsspruch bewirkten, und war auch beim zweiten Anrufen des Bundesverfassungsgerichts beteiligt. Ab S. 72 schildert Fehndrich, was sich bei dem Gesetz in mathematischer Sicht geändert hat – und warnt davor, dass es die Arbeitsfähigkeit des neuen Parlamentes schwer wiegend beeinträchtigen könnte.

Nachdenklich grüßt Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Das Universum scheint vor allem aus Dunkler Materie und Dunkler Energie zu bestehen. Wie Teilchen- und Astrophysiker diese Phänomene zu enträtseln versuchen, beschreibt der renommierte Theoretiker **Volker Springel** von der Heidelberger Universität ab S. 60.



Nur Zufall – oder steckt Methode dahinter? Diese Frage stellen sich der Astrophysiker **Bruno Deiss** (links) und der Archäologe **Allard Mees**, wenn sie in der Geometrie keltischer Grabanlagen Entsprechungen am Nachthimmel entdecken (S. 78).



Markus Antonietti forscht am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung über die künstliche Fotosynthese, deren Stand und Aussichten er ab S. 44 schildert. **Stephanie Wohlgemuth** hat bei ihm promoviert.

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Akustische Levitation • Erfindung des Ackerbaus • Erdbeben lassen Vulkane schrumpfen • Elektrostatik bei Spinnennetzen • Strompulse stoppen Blutungen • Lavafluten auf dem jungen Merkur

11 Bild des Monats

Eine Eiszeitfigur, neu zusammengesetzt

12 Forschung aktuell

Protonengeschosse aus dem Sternengrab
Supernova-Explosionswolken schleudern schnelle Protonen ins All

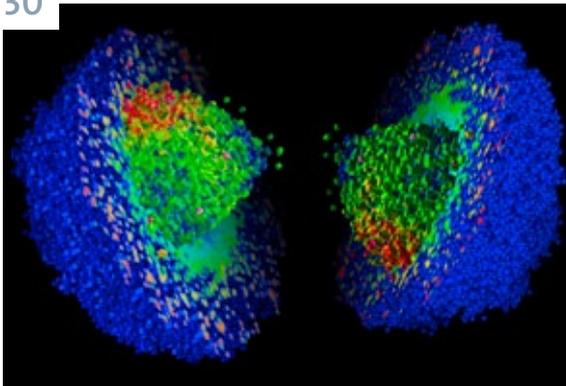
Hilfreiche Transporter in Nutzpflanzen
Wie Transportproteine die Erträge von Getreidearten steigern könnten

Beuteschau nach der Varusschlacht?
Was römische Schildbeschläge verraten

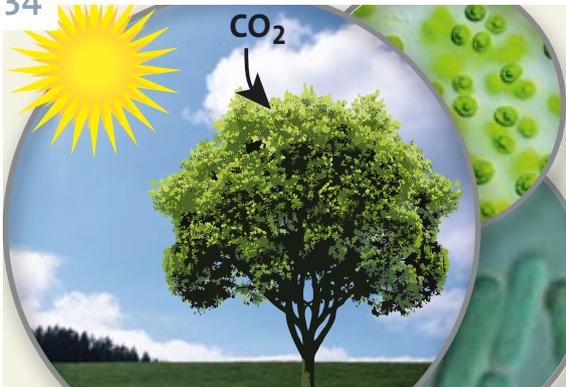
Das pubertierende Genom
Epigenetische Auslöser der Geschlechtsreife

SPRINGER'S EINWÜRFE
Gläserner Mensch im Netz

30



34



56



BIOLOGIE & MEDIZIN

SERIE KREBS

24 Nano-Arzneitransporter

Katherine Bourzac

Indem sie Arzneistoffe in nanometergroßen Partikeln verkapseln, verbessern Forscher die Krebstherapie.

30 Krebsvorhersage

Katharine Gammon

Mathematische Modelle helfen, die evolutionäre Entwicklung von Tumorzellen zu verstehen.



▶ 34 Wie Pflanzen Wasser spalten

Wolfgang Lubitz und Nicholas Cox

Während der Fotosynthese wird Wasser in seine elementaren Bestandteile zerlegt. Erst seit Kurzem verstehen Wissenschaftler wichtige Details dieses Vorgangs.

TECHNIK & COMPUTER

44 Künstliche Fotosynthese

Stephanie Wohlgemuth und Markus Antonietti

Metallische »Blätter« haben bereits heute einen höheren Wirkungsgrad als ihre natürlichen Vorbilder.



▶ 52 Die Bergung der Costa Concordia

Barbie Latza Nadeau

Das geplante Heben und Aufrichten des havarierten Kreuzfahrtschiffs ist technisch höchst anspruchsvoll.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

56 Die Augen des Stiers

H. Joachim Schlichting

Unser Auge kann polarisiertes Licht nicht ohne Weiteres von unpolarisiertem unterscheiden. Ein »Berry-Sandwich« hilft.

► TITELTHEMA

SERIE ASTRONOMIE (VI)

60 Der Dunkle Kosmos

Volker Springel

Gewöhnliche Materie scheint im Universum kaum eine Rolle zu spielen. Laut aktuellen Theorien dominieren unsichtbare Dunkle Materie und Dunkle Energie. Mit raffinierten Beobachtungstechniken versuchen Forscher, diesen mysteriösen Phänomenen auf die Spur zu kommen.

78



..... MENSCH & KULTUR

► 72 Bundeswahlgesetz – dritter Versuch

Martin Fehndrich

Das Wahlsystem für die anstehende Bundestagswahl ist komplizierter denn je – aber es wahrt den Proporz.

► 78 Keltische Sternenforscher

Allard Mees und Bruno Deiss

Vermutlich beeinflussten die »Großen Mondwenden« die Ausrichtung keltischer Gräber und Kultanlagen.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

84 Die Wissenschaft von den klebrigen Kugeln

Brian Hayes

Es ist überraschend schwer, Packungen relativ weniger Kugeln mit möglichst vielen Berührungspunkten zu finden.

..... ERDE & UMWELT

92 Der steinige Weg zur friedlichen Koexistenz

Pat Shipman

Wölfe queren die Grenzen des Yellowstone-Nationalparks. Wie wird man den Interessen der Anwohner gerecht?

96 Wölfe in Deutschland

Ursula Loos

Gelingt es, sie in die Kulturlandschaft zu integrieren?

92



98 Rezensionen

Michael Eckert: Arnold Sommerfeld • *Claudi Alsina und Roger B. Nelsen*: Bezaubernde Beweise • *Daniel Chamovitz*: Was Pflanzen wissen – wie sie sehen, riechen und sich erinnern • *Thomas A. Szlezák*: Homer oder die Geburt der abendländischen Dichtung u.a.

105 Wissenschaft im Rückblick

Vom Luftschiff zum Kunstherz

106 Vorschau

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft
Die auf der Titelseite angekündigten
Themen sind mit ► gekennzeichnet.



Achat-Blumenwiese

Blumenwiese im Achat

Wim Noorduyn und seine Mitarbeiter stellten experimentell Nanostrukturen her, die verblüffend Blumen ähneln. (»Nano-Rose«, Bild des Monats, Juli 2013, S. 11)

Günther Sterba, Markkleeberg: Anbei sende ich Ihnen das Foto einer Blumen-

wiese, die ich als Kristallisationsstruktur in einem Achat fand. Die Farben und die Unschärfe sind natürliche Gegebenheiten, keine durch Behandlung oder Abbildungsfehler entstandenen Zustände. Im Hinblick auf die im Heft vorgestellte Nanorose und die im zugehörigen Text erwähnten anderen Nanoblumen finde ich folgende Fakten besonders interessant:

- **Chemie:** Auch Achat ist eine Siliziumverbindung (Siliziumoxid), die durch die Einlagerung verschiedener Fremdelemente fast in allen Farbtönen vorkommt.
- **Alter:** Die Achatstruktur wurde in einem Stück aus Brasilien gefunden. Die dortigen Achate sind etwa 60 bis 80 Millionen alt.
- **Zur Zeit der Entstehung** dieser Achatstrukturen gab es noch keine Blumen dieser Art.
- **Diese blumenähnlichen Strukturen** kommen nur in einem einzigen Band (einer Schicht) des vielschichtigen Achats vor. Unterschiede in den Schichten werden oft als Resultate phasenartiger Temperaturbedingungen interpretiert.
- **Mir ist keine Abbildung** oder Beschreibung bekannt, in der bereits solche natürlichen Nanoblumen vorgestellt wurden.

Neutrinos mit negativer Energie?

Die drei Physiker Marianne Göger-Neff, Lothar Oberauer und Stefan Schönert berichteten über den aktuellen Wissens-

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 Findekle (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. 0 6221 9126-711, Fax 0 6221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 0 6221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 0 6221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 0 6221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 0 6221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 0 6221 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. 0 711 7252-192, Fax 0 711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 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: Patrick Priesmann, Tel. 0 211 887-2315, Fax 0 211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Nicole Klemmer, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0 211 887 1373

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0 211 887-2387, Fax 0 211 887-2686

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 Zu-

gänglichmachung, 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 Rechteinhaberschaft 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 Dandane, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



stand zu den Eigenschaften der Neutrinos. (»Große Geheimnisse um kleine Teilchen«, Juli 2013, S. 46)

Karl-Otto Eschrich, Potsdam: In einem Buch zur experimentellen Physik hatte ich vor einiger Zeit einmal gelesen, dass beim Zerfall langsamer Neutronen die Energiebilanz in seltenen Fällen so aussieht, dass die Summe der Energien der Zerfallsprodukte Proton und Elektron größer ist als die des Neutrons, was eine negative Energie des Neutrinos (genauer: Anti-Elektron-Neutrinos) zur Folge hätte. Können Forscher heute solche Messungen bestätigen?

Antwort der Autorin Marianne Göger-Neff:

Dabei dürfte es sich um die negativen Massenquadrate handeln, die in den 1990er Jahren etwa von dem Mainzer Tritiumzerfallsexperiment gemessen wurden. Der Grund dafür waren nicht genau verstandene systematische Effekte innerhalb der Tritiumquelle (damals ein gefrorener Tritiumfilm).

Betrachtet man einen Betazerfall und misst das Energiespektrum der Elektronen, kann man dieses Spektrum in der Nähe des Endpunkts näherungsweise schreiben als

$$dN/dE \sim (E_0 - E)^2 - m_\nu^2/2.$$

Andererseits führt eine Faltung des Spektrums mit einer Gaußverteilung mit der Standardabweichung σ zu einer Zählrate (für $m_\nu = 0$):

$$dN/dE \sim (E_0 - E)^2 + \sigma^2.$$

Das heißt: $m_\nu^2 = -2 \sigma^2$. Es ist daher sehr wichtig, die Prozesse innerhalb der Tritiumquelle ganz genau zu verstehen. Jeder unerkannte Effekt, der die Energieauflösung beeinflusst, führt unweigerlich zu einem negativen m_ν^2 .

Die damals unverstandenen Effekte waren zum Beispiel:

► Der Tritiumfilm veränderte sich im Lauf der Messung. Ein Teil des Tritiums dampfte ab, die Oberfläche wurde rau. Das führte zu unterschiedlichen Energieverlusten der Elektronen beim Ausreten.

► Obwohl der Film nur wenige Moleküllagen dick war, konnte es teilweise zu inelastischen Stößen der Elektronen in-

nerhalb des Films kommen, die die Elektronen abbremsen.

► Im Lauf der Messung lud sich der Film elektrisch auf (etwa eine Milliarde Zerfälle pro Sekunde, wobei die Elektronen den Film verlassen und die positiv geladenen Ionen zurückbleiben). Durch die elektrische Abstoßung bekommen die Elektronen zusätzliche Energie.

Die letzten Messungen des Mainzer Experiments 1999 und 2001, bei denen auf alle diese Effekte korrigiert wurde, führten zu einer mit null verträglichen Neutrinomasse. Bei KATRIN versucht man, mit der gasförmigen, fensterlosen Tritiumquelle möglichst alle dieser Energieverlusteffekte für die Elektronen zu vermeiden und die verbleibenden gut zu verstehen.

Waldemar Sabais, München: Die Sache mit den Betazerfällen scheint mir noch sehr mysteriös zu sein, von den inversen ganz zu schweigen. In verkürzter Form steht da für Betazerfall: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$; und für den inversen Betazerfall: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$.

Für einen Laien wie mich passt hier etwas mit der Massenerhaltung nicht ($m_n \approx 939,565 \text{ MeV}/c^2$; $m_p \approx 938,272 \text{ MeV}/c^2$), wenn ein Proton in ein schwereres Neutron zerfällt und dabei noch ein Positron anfällt. Ganz witzig wäre es, wenn das so stimmen würde, dann hätten wir den halben Urknall erklärt, weil durch abwechselnden Zerfall von n und p mit Hilfe des Neutrinos ν_e eine ganze Menge von Positronen und Elektronen erzeugt werden würde.

Antwort der Autorin Marianne Göger-Neff:

Im Artikel haben wir nicht erwähnt, dass die Neutrinos eine bestimmte Mindestenergie haben müssen, um den inversen Betazerfall auszulösen. Dann stimmt auch die Energieerhaltung.

Diese Mindestenergie kann man sich leicht ausrechnen: Sie beträgt für den inversen Betazerfall an freien Protonen $m_n + m_e - m_p = 1,8 \text{ MeV}$. Das heißt, nur Elektron-Antineutrinos, die eine kinetische Energie von mehr als 1,8 MeV haben, lassen sich über den inversen Betazerfall detektieren (die Neu-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

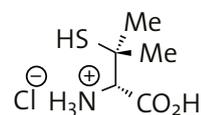
trinomasse haben wir dabei vernachlässigt).

Erratum

(»Chemie als abstrakte Kunst«, Juli 2013, S. 82)

Im Reaktionsschema der Penizillinsynthese nach John C. Sheehan auf S. 86 ist ein Druckfehler: In der mittleren chemischen Formel der obersten Zeile trägt das Stickstoffatom eine negative Ladung statt richtig einer positiven (Bild).

AMERICAN SCIENTIST:
MONTAGNON, K.C.,
MOLECULES THAT
CHANGED THE WORLD.
WILEY-VCH, 2008



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

PHYSIK

Schweben auf der Dauerwelle

Als akustische Levitation bezeichnet man die Methode, Dinge mittels Schallwellen schweben zu lassen. Nun gelang es Forschern von der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich, damit Objekte gezielt durch den Raum zu dirigieren. Auf diese Weise konnten sie Tröpfchen verschiedener Flüssigkeiten sowie feste Partikel aufeinander zubewegen und in Kontakt bringen.

Akustische Levitatoren bestehen aus einer akustischen Quelle und

einem gegenüberliegenden Reflektor. Zwischen diesen bauen sich stehende Schallwellen auf. Durch den Schalldruck verharren leichte Gegenstände an den Wellenknotenpunkten. Mit Hilfe von fünf solcher Levitatoren ließen die Wissenschaftler millimetergroße Tröpfchen von wässrigen Lösungen und flüssigen Kohlenwasserstoffen sowie feste Partikel schweben. Indem sie die Schallwellen räumlich und zeitlich modifizierten, konnten sie die Position der Objekte verändern.

In verschiedenen Experimenten brachten sie kleine Flüssigkeitsproben zusammen und beobachteten deren Vermischung, oder sie ließen sie mit Partikeln kollidieren. Zudem gelang es ihnen, Fremd-DNA in menschliche Zellen einzuschleusen, indem sie ein Tröpfchen Zellsuspension mit einem Tröpfchen DNA-Lösung vereinigten – unter Zugabe einer speziellen Substanz, die das Eindringen der DNA in die Zellen förderte.

Der Vorteil des Verfahrens ist, dass man chemische oder biologische Prozesse außerhalb von Reaktionsgefäßen ablaufen lassen und beobachten kann. Damit fallen potenzielle Verunreinigungen weg. Auch kann die akustische Levitation – im Gegensatz zur magnetischen oder elektrischen – alle möglichen Materialien schweben lassen.

PNAS 10.1073/pnas.1301860110, 2013



Mit Hilfe stehender Schallwellen können Forscher Flüssigkeitströpfchen (grün) schweben lassen.

DIMAS POLIUKAKOS, ETH ZÜRICH

Spektrum DER WISSENSCHAFT **DIE WOCHE**

Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin

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

www.spektrum.de/diewoche

VORGESCHICHTE

Ackerbau in Vorderasien mehrmals erfunden

Vor etwa 11 500 Jahren spielte sich im »Fruchtbaren Halbmond«, einem Gebiet im Norden der arabischen Halbinsel, eine folgenschwere Veränderung ab: Menschen gingen dazu über, sesshaft zu werden und Nahrungspflanzen anzubauen. Diese Entwicklung begann wohl an mehreren Orten gleichzeitig. Das belegen Ausgrabungen im Iran, vorgenommen von Forschern um die Tübinger Archäologin Simone Riehl.

Die Wissenschaftler untersuchten den Siedlungshügel Chogha Golan im iranisch-irakischen Grenzgebiet. Dort stießen sie auf etliche Zeugnisse eines langsam einsetzenden Pflanzenanbaus in der Zeit zwischen 10 000 und 7800 v. Chr. Ähnliche, zeitgleiche Entwicklungen lassen sich auch weiter nördlich nachweisen, etwa in der heutigen Türkei.

Chogha Golan war in jener Zeit von Menschen bewohnt, die den Funden zufolge in großen, wohlhabenden Gemeinschaften organisiert waren. Die Archäologen förderten vorgeschichtliche Werkzeuge zu Tage, die der Getreideverarbeitung dienten. Vor allem aber entdeckten sie Reste von Vorläuferformen heutiger Feldfrüchte wie Gerste, Weizen, Linse, Erbse und Emmer. Allerdings ist oft unklar, ob diese Reste von wilden oder bereits domestizierten Pflanzen stammen.

Wie die Forscher schreiben, sprechen die Befunde für eine eigenständige Entwicklung des Ackerbaus im heutigen Iran. Freilich sei nicht ausgeschlossen, dass am Übergang zur sesshaften Lebensweise ein wechselseitiger Kulturtransfer zwischen verschiedenen Regionen stattgefunden habe.

Science 341, S. 65–67, 2013

Schwere Erdstöße lassen Vulkane schrumpfen

Erdbeben können sich über hunderte Kilometer hinweg direkt auf Vulkane auswirken. Nach dem Tohoku-Beben der Stärke 9,0, das sich im März 2011 vor der japanischen Küste ereignete, sackten noch in 200 Kilometer Entfernung mehrere vulkanisch aktive Regionen um bis zu 15 Zentimeter ab. Dies berichten Youichiro Takada und Yo Fukushima von der Kyoto University (Japan). Ähnliche Beobachtungen haben Forscher um Matthew Pritchard von der Cornell University (USA) gemacht: Sie stellten fest, dass nach dem Maule-Erdbeben 2010 in Chile einige Vulkane in den südlichen Anden mehrere Zentimeter an Höhe verloren.

Sowohl bei Japan als auch unter den südamerikanischen Anden liegen Subduktionszonen: Bereiche, in denen sich ozeanische Platten unter Kontinentalplatten schieben. Bei dem Vorgang kommt es hin und wieder zu schweren Erschütterungen. Die dabei freigesetzten seismischen Wellen wandern durch das Erdinnere und scheinen das Einsinken der Vulkane auszulösen – wie genau, ist umstritten. Die Forscher um Pritchard nehmen an, infolge von Gesteinsverformungen verlagere sich Tiefenwasser in der Erdkruste, wodurch der Untergrund nachgibt. Dagegen vermuten die japanischen Wissenschaftler, die Ursache liege in den Mag-

makammern unter den Vulkanen: Deren flüssiges Gestein würde durch die Stoßwirkung deformiert und nach unten ausweichen.

Nature Geoscience 10.1038/ngeo1855, 2013

Nature Geoscience 10.1038/ngeo1857, 2013



MARKMARK28 / CC-BY-SA-3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY-SA/3.0)

Der japanische Vulkan Zao und andere Feuerberge sanken nach dem Tohoku-Beben 2011 um mehrere Zentimeter ab.

Elektrostatisch auf Beutefang

Spinnennetze strecken sich herannahenden Insekten entgegen, haben Victor Manuel Ortega-Jimenez und Robert Dudley von der University of California in Berkeley beobachtet. Der Effekt beruht auf elektrostatischer Anziehung. Die Forscher sammelten

verschiedene Kerbtiere (Honigbienen, Schmeißfliegen, Tauflieden und Blattläuse), töteten diese, luden sie elektrostatisch auf und ließen sie auf Spinnennetze fallen. Das gleiche Experiment führten sie mit Wassertropfen und nicht aufgeladenen Insekten durch.

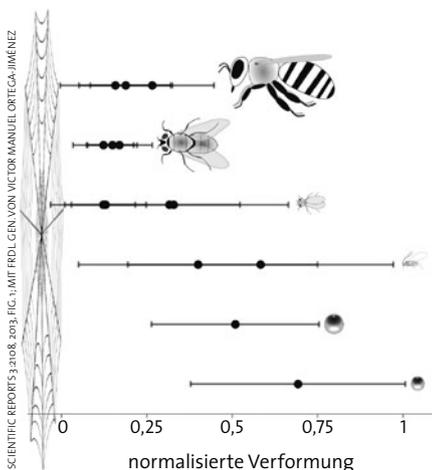
Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigten, dass einzelne Fäden des Spinnennetzes sich den geladenen Tieren entgegenstrecken, den ungeladenen jedoch nicht.

Nähern sich geladene Insekten einem Spinnennetz, ziehen sie es elektrostatisch an. Gezeigt ist die normalisierte (auf die Körperlänge bezogene) Verformung des Netzes für Honigbienen, Schmeißfliegen, Tauflieden, Blattläuse und Wassertropfen (von oben nach unten).

Somit wird der Effekt durch elektrostatische Wechselwirkungen vermittelt. Die Auslenkung der Fäden lag bei ein bis zwei Millimetern und war bei den größten getesteten Insekten (Honigbienen) maximal: Diese hatten die größte Oberfläche, trugen somit die größte Ladungsmenge und zogen die Fäden deshalb am stärksten an.

Die den Tierkörpern künstlich mitgegebene Ladung entspreche in etwa derjenigen, die Insekten in der Natur tragen, schreiben die Wissenschaftler. Die Luft etwa enthalte bei Windstille einen Überschuss an positiven Ionen, deren Ladung zum Teil auf fliegende Insekten überginge. Welchen Einfluss die elektrostatisch bedingte Verformung von Spinnennetzen auf den Beutefang hat, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Scientific Reports 3:2108, 2013



MEDIZIN

Strompulse stoppen Blutverlust

Um schwere Blutverluste bei Unfall- oder Kriegsopfern zu vermeiden, binden Ersthelfer die verletzte Adern ab. Was aber, wenn die Wunde an einer unzugänglichen Stelle im Körper liegt? Hier könnte das Verabreichen kurzer, starker Strompulse helfen, die Blutung zu stoppen.

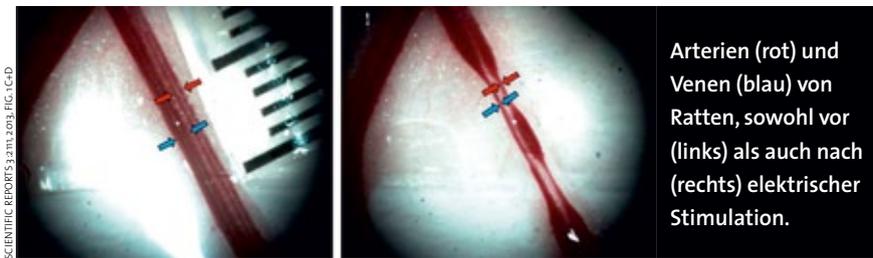
Forscher um Yossi Mandel von der Stanford University schnitten narkotisierten Ratten große Blutgefäße auf. Anschließend behandelten sie die Verletzung mit elektrischen Pulsen. Diese waren zwischen 1 und 1000

Mikrosekunden (millionstel Sekunden) lang und hatten eine Amplitude zwischen 0 und 300 Volt. Je länger und stärker die Pulse waren und je rascher sie aufeinander folgten, desto kräftiger zogen sich die beschädigten Gefäße zusammen, was weiteren Blutverlust verhinderte oder zumindest eindämmte. Der Effekt trat binnen Sekunden ein. Nach Beenden der elektrischen Stimulation weiteten sich die Adern über mehrere Minuten hinweg wieder. Sie ließen sich aber durch wiederholte Stromstöße erneut verengen.

Vermutlich wirken die Elektropulse, indem sie die glatte Muskulatur der Gefäße reizen und kontrahieren lassen. Zudem stimulieren sie wohl auch Nerven im Umfeld der Adern. Die Forscher hoffen, dass sich der Effekt medizinisch nutzen lässt. Denkbar wären kleine, batteriebetriebene Pulsgeneratoren, die ein Ersthelfer direkt in die Wunde schiebt. Sie würden wieder entnommen, sobald der Verunglückte im Krankenhaus besser versorgt werden kann.

Schon in den 1970er Jahren hätten Mediziner versucht, starke Blutungen mittels elektrischer Stimulation zu stoppen, schreiben die Forscher. Die damals minutenlange Reizung habe allerdings zu Gewebeschäden geführt. Bei ihrer neuen Methode seien solche Nebenwirkungen nicht zu beobachten gewesen.

Scientific Reports 3:2111, 2013



Arterien (rot) und Venen (blau) von Ratten, sowohl vor (links) als auch nach (rechts) elektrischer Stimulation.

SCIENTIFIC REPORTS 3:2111, 2013, FIG. 1C-D

ASTRONOMIE

Merkurs heiße Jugend

Der Planet Merkur hat turbulente Zeiten hinter sich. Bis vor fünf Jahren kannten Wissenschaftler nicht einmal die Hälfte seiner Oberfläche, doch schon damals vermuteten sie, dass früher sehr viel Lava auf ihm geflossen sein muss. Wissenschaftler um Simone Marchi vom NASA Lunar Science Institute (Colorado, USA) kommen nun zu dem Schluss, dass vor etwa vier Milliarden Jahren die gesamt-

te Planetenoberfläche von geschmolzenem Gestein geflutet war.

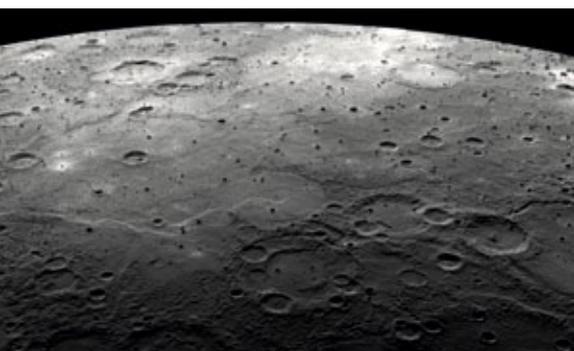
Die Forscher werteten Aufnahmen der NASA-Raumsonde Messenger aus, die den Merkur seit 2011 umkreist. Sie konzentrierten sich auf einen besonders alten Teil der Oberfläche. Dort sind zahlreiche Krater erkennbar, zwischen denen weite Ebenen liegen – wahrscheinlich erstarrte Lava. Aus der Kraterdichte errechneten die Wissenschaftler grob das Alter dieser Flächen. Hierfür griffen sie auf Modelle zur Altersbestimmung der Mondoberfläche

zurück und übertrugen sie auf den Merkur.

Demnach begann eruptiertes Magma vor zirka vier Milliarden Jahren, die Oberfläche des sonnennächsten Planeten großflächig zu überfluten. Das war kurz nach Beginn des »Großen Bombardements« (englisch: Late Heavy Bombardement) – jener Zeit, als auf die noch jungen inneren Planeten zahlreiche Asteroiden stürzten. Erst 350 Millionen Jahre später versiegten die Lavaströme wieder, als auch die Einschläge langsam nachließen.

Die Ursache der Lavafluten ist nicht genau bekannt. Wegen des zeitlichen Zusammentreffens mit dem Großen Bombardement vermuten die Forscher jedoch, dass sie von besonders schweren Einschlägen hervorgerufen wurden.

Nature 499, S. 59–61, 2013



NASA/JHUAPL/CARNegie INSTITUTION OF WASHINGTON

Im Oktober 2008 flog die Nasa-Raumsonde Messenger dicht am Merkur vorbei und nahm dabei Bereiche seiner Oberfläche auf, die vorher unerforscht waren. Zweieinhalb Jahre später trat die Sonde in eine Umlaufbahn um den Planeten ein.

EIN KOPF FÜR DEN LÖWEN



Diese 1931 in der Vogelherd-Höhle im süddeutschen Lonetal entdeckte eiszeitliche Tierfigur ist endlich wieder vollständig: Als Forscher um Nicholas Conard von der Universität Tübingen die Überreste früherer Grabungen noch einmal genauer untersuchten, entdeckten sie das fehlende Fragment des Kopfes. Zu sehen ist die 8,3 Zentimeter lange

Löwenfigur nun im Museum der Universität Tübingen. Die Höhle am östlichen Rand der Schwäbischen Alb ist berühmt für ihre bis zu 35000 Jahre alten, aus Knochen und Mammutelfenbein geschnitzten Figuren, Flötenfragmente und Schmuckstücke. Diese zählen zu den ältesten Nachweisen von Kunst des modernen Menschen.

KOSMISCHE STRAHLUNG

Protonengeschosse aus dem Sternengrab

Erstmals haben Weltraumteleskope nachgewiesen, dass Supernova-Explosionswolken extrem energiereiche Protonen ins Universum schleudern. Das hundertjährige Rätsel um die kosmische Strahlung steht damit kurz vor seiner Lösung.

VON JAN HATTENBACH

Mehr als 100 Jahre nach der Entdeckung der kosmischen Teilchenstrahlung scheint sich nun endlich das Rätsel ihrer Herkunft zu lüften. In zwei Supernovaüberresten entdeckten Astrophysiker mit Hilfe des italienischen Satelliten AGILE und des amerikanischen Weltraumteleskops Fermi verräterische Gammastrahlung. Diese entsteht, so erklären die Forscher, wenn extrem schnelle Protonen auf andere Materieteilchen treffen. Ihre Energie können die Protonen aber nur in den expandierenden Supernovawolken ge-

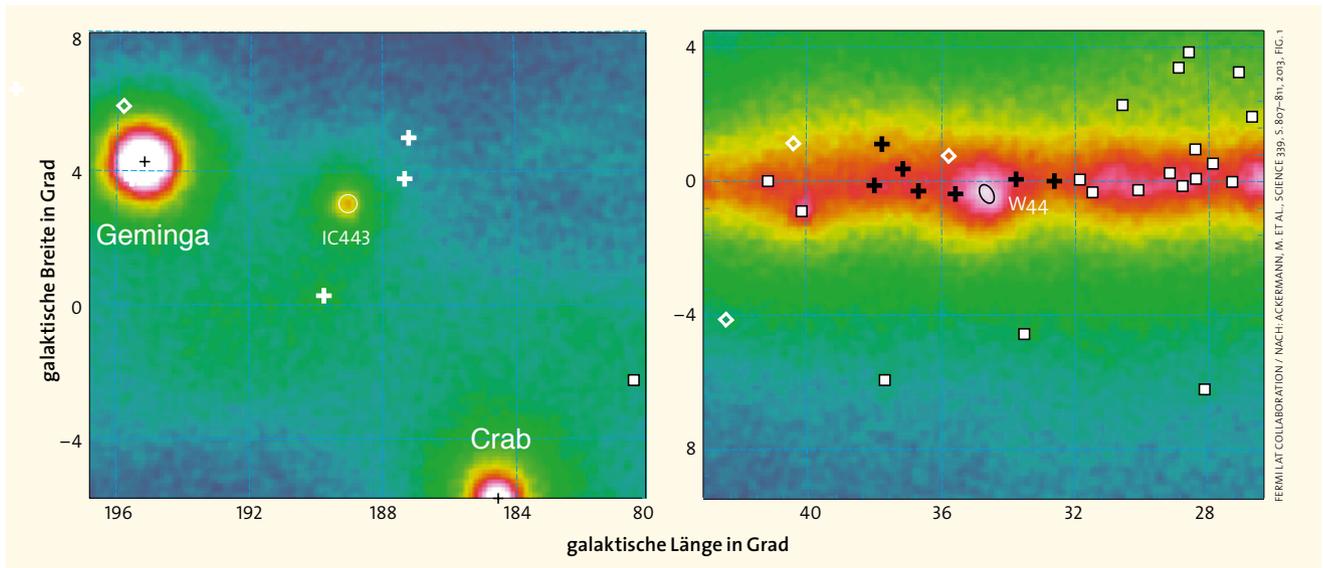
wonnen haben. Damit ist es erstmals gelungen, Orte im Universum aufzuspüren, an denen solche Beschleunigungsvorgänge stattfinden.

Pausenlos regnen Protonen, schwere Atomkerne und auch Elektronen als kosmische Strahlung auf die Erde. Den Löwenanteil mit rund 90 Prozent machen Protonen aus, also Wasserstoffkerne. Woher die Teilchen stammen und wie sie ihre hohen Energien erhalten, war bislang unklar, doch gelten Überreste von explodierten Sternen, so genannte Supernovae, schon lange als

heiße Kandidaten. Demzufolge werden in Wolken, die vor allem aus Wasserstoff bestehen und im Lauf von Jahrtausenden vom Explosionsort aus expandieren, einzelne Protonen durch wiederholte Stöße untereinander auf die beobachteten hohen Energien beschleunigt. Für dieses Szenario spricht auch, dass sich das Wolkenmaterial praktisch genau so zusammensetzt wie die auf der Erde eintreffende kosmische Strahlung, und dass die Zahl der in der Milchstraße bekannten Supernovaüberreste die in Erdnähe gemessene Teilchenrate erklären könnte.

Leider kann man an der Herkunftsrichtung eines kosmischen Protons nicht ablesen, woher es stammt. Denn Wasserstoffkerne sind elektrisch geladen, ihre Flugbahnen werden durch die im Weltall allgegenwärtigen Magnetfelder also unvorhersagbar verändert. Astrophysiker gehen das Problem darum

Der Supernovaüberrest IC 443 ist auf einer Gammastrahlungskarte (links) als isolierte Quelle gut vom Hintergrund zu unterscheiden. (»Geminga« und »Crab« bezeichnen benachbarte Pulsare; Kreuze und Quadrate markieren die Positionen weiterer Gammaquellen.) Hingegen liegt W44 gemeinsam mit vielen weiteren Strahlungsquellen in Richtung des Zentrums unserer Galaxie und damit in einem regelrechten »Nebel« aus Gammastrahlung (rechts). Dieser Hintergrund muss präzise vermessen und von den Messdaten abgezogen werden, sodass allein die Strahlung von W44 übrig bleibt.





HERSCHEL: QUANG NGUYEN LUONG & FRÉDÉRIQUE MOTTE, HOBY'S KEY PROGRAM CONSORTIUM & HERSCHEL SPIRE / PACS / ESA CONSORTIA; XMM-NEWTON: ESA / XMM-NEWTON

auf indirektem Weg an. Kollidieren energiereiche Protonen kurz nach dem Beschleunigungsvorgang mit anderen Materieteilchen – während das Explosionsmaterial der Supernova in umgebende Gas- und Staubwolken eindringt –, entstehen Sekundärteilchen, darunter auch ungeladene Pionen. Letztere zerfallen innerhalb von milliardstel Sekunden in zwei Gammaphotonen, verwandeln sich also in elektromagnetische Strahlung sehr hoher Energie. Diese breitet sich geradlinig vom Ort des Geschehens aus und gelangt so in die Gammadetektoren von AGILE und Fermi.

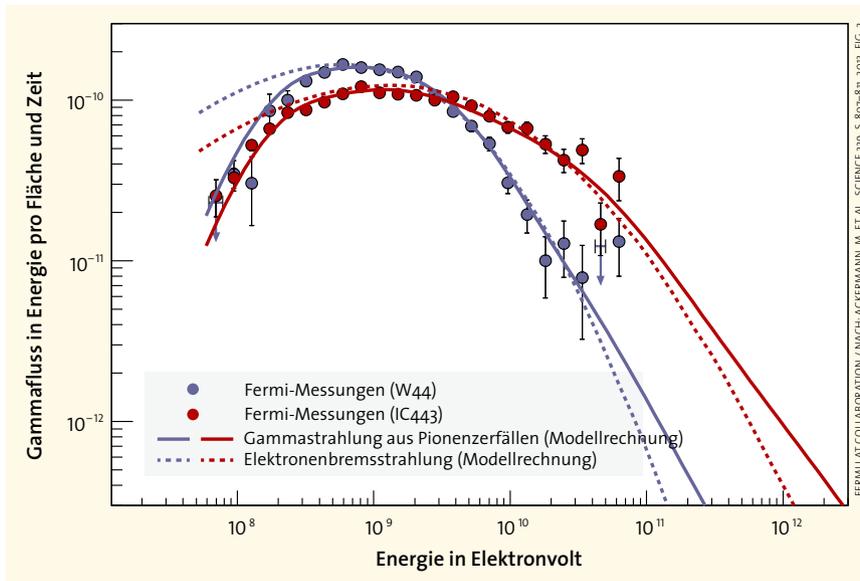
Tatsächlich registrierten Forscher bereits aus mehreren Supernovaresten Gammastrahlung. Bislang konnten sie jedoch nicht sicher sein, ob diese wirklich von Pionzerfällen stammt, denn

In dieser Region im Sternbild Adler explodierte vor rund 20 000 Jahren ein Stern. Die mit den Weltraumteleskopen Herschel und XMM Newton erstellte Aufnahme des Supernovarests W44 zeigt expandierende Gashüllen (violett), die sich mit hoher Geschwindigkeit vom Ort der Explosion fortbewegen. In ihnen werden Teilchen auf hohe Energien beschleunigt, von denen einige als kosmische Strahlung auch die Erde erreichen.

auch Elektronen erzeugen Gammastrahlung, wenn sie in den Materiewolken abgebremst werden. Dank verbesserter Verfahren, um die Daten der Teleskope zu analysieren, drangen die Wissenschaftler mittlerweile aber in einen Energiebereich der Gammastrahlung vor, zu dem Elektronen nur noch einen sehr geringen Beitrag leisten.

So konnte das AGILE-Team Ende 2011 verkünden, Gammastrahlung aus dem 10 000 Lichtjahre entfernten Supernoväüberrest W44 in dem sehr hohen

Energiebereich zwischen 50 Megaelektronvolt und 10 Gigaelektronvolt gemessen zu haben. Genau dort sollte die aus dem Zerfall neutraler Pionen stammende Gammastrahlung besonders intensiv sein, die von den Elektronen verursacht aber kaum in Erscheinung treten. Doch es blieben Fragen offen wie die, ob man wirklich sicher sein konnte, dass man die Hintergrundstrahlung korrekt von den Messwerten abgezogen hatte. Im Februar 2013 bestätigten die Amerikaner dann aber die Resultate ih-



Stammt die Gammastrahlung aus den Supernovaüberresten W44 und IC443 wirklich nicht von abgebremsten Elektronen (gestrichelte Linien)? Um das zu prüfen, vermaß der Weltraumsatellit Fermi die Verteilung der Gammaenergie. Das Resultat: Die Messdaten (blaue und rote Kreise) stimmen im Bereich um 100 Millionen Elektronvolt (10^8 eV) klar mit den theoretischen Vorhersagen für Pionzerfälle (durchgezogene Linien) überein.

rer italienischen Kollegen (Ackermann, M. et al., Science 339, 2013). Überdies hatte Fermi nicht nur W44 vermessen, sondern dieselbe Art von Strahlung auch aus dem Supernovarest IC 443 registriert (Diagramm S. 12 und oben).

Die Wahl war nicht zufällig auf diese beiden Objekte gefallen, erläutert Olaf Reimer, Astro- und Teilchenphysiker an der Universität Innsbruck und Mitglied der Fermi-Kollaboration: »Bei W44 und IC 443 handelt es sich um mittelalte Supernovaüberreste, bei denen die Explosion des Sterns jeweils mehr als 10 000 Jahre zurückliegt« – Zeit genug also für eine Expansion in einen größeren Raumbereich und die nötige Beschleunigung der Protonen. »Außerdem existieren dichte Molekülwolken in ihrer Umgebung, die ideale Bedingungen für Proton-Proton-Kollisionen bieten.« Um sicherzugehen, dass die gemessene Gammastrahlung nicht von Elektronen stammt, untersuchten Reimer und seine Kollegen mit aufwändigen Simulationen, welche theoretischen Modelle die gemessenen Spektren am besten erklären. Mit eindeutigem Ergebnis: Elektronen kommen als Ursprung der Gammastrahlung nicht in Frage, sie stammt

also mit hoher Wahrscheinlichkeit von zerfallenden Pionen.

Dank der hohen Ortsauflösung von Fermi konnten die Forscher schließlich auch sicherstellen, dass die gemessenen Gammaphotonen tatsächlich aus den Supernovaüberresten und nicht etwa aus deren Umgebung stammten.

Stochern im Gamma-»Nebel«

Das war insbesondere bei W44 eine schwierige Aufgabe. Denn das Objekt befindet sich von der Erde aus gesehen in Richtung des Zentrums der galaktischen Scheibe, wo eine Vielzahl von Sternen und Gaswolken für einen regelrechten »Nebel« aus Gammastrahlung sorgt.

Endgültig gelöst ist das Rätsel dennoch nicht: Bei anderen Supernovaüberresten ließ sich bislang nämlich keine Gammastrahlung entdecken. Die Erklärung könnte aber ganz einfach lauten, dass es dort eben an dichten Molekülwolken fehlt. Diese Vermutung deckt sich auch mit der Beobachtung, dass insbesondere »junge« Supernovaüberreste, die sich noch nicht sehr weit ins Weltall ausgedehnt haben, keine Gammastrahlung aussenden, die auf Pionzerfälle zurückführbar wäre.

Ernsthafte Zweifel daran, dass sowohl W44 als auch IC 443 kosmische Protonenbeschleuniger sind und zumindest ein Teil der energiereichen kosmischen Strahlung aus Supernovaüberresten stammt, werden aber schon jetzt nur noch wenige Forscher haben. Endgültig entschieden wäre die Angelegenheit, wenn der Nachweis kosmischer Neutrinos aus denselben Quellen gelänge. Auch diese ungeladenen Elementarteilchen sollten bei Protonenkollisionen entstehen, aber nicht bei der Abbremsung von Elektronen. Und wie die Gammastrahlung durchqueren sie die kosmischen Magnetfelder in direkter Linie, können also Aufschluss über ihre Quelle geben.

Doch leider ist der Nachweis von Neutrinos weit schwieriger als die Messung der Gammastrahlung. Sie könnten Lichtjahre weit durch Materie fliegen, ohne auch nur ein einziges Mal mit einem Atomkern zusammenzustoßen, sodass man riesige Detektoren wie etwa IceCube benötigt, um auch nur einige wenige von ihnen aufzuspüren. Die über 5000 kugelförmigen Detektoren dieses größten Neutrinodetektors der Welt sind bis zu zwei Kilometer tief in das ewige Eis des Südpols eingeschmolzen. Sie lauern auf extrem kurze und schwache Lichtblitze, die bei den seltenen Kollisionen von Neutrinos mit Atomkernen im Innern der Erde entstehen.

Mit ersten Erfolgen: Im April gab die IceCube-Kollaboration die Messung von 28 Neutrinos bekannt – den ersten, die wahrscheinlich nicht aus der Erdatmosphäre, sondern aus dem tiefen Weltall kamen. Stammen einige von ihnen aus Supernovaüberresten? Um das zu überprüfen, bräuchten die Forscher noch mehr Daten, denn die wenigen Teilchen könnten auch rein zufällig aus bestimmten Richtungen kommen. Trotzdem dürfte es nicht mehr lange dauern, bis die Wissenschaftler eine der quälendsten Fragen der Astroteilchenphysik zu den Akten legen können.

Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist in Aachen. In seinem Blog »Himmelslichter« auf Scilogs.de schreibt er über alles, was am Firmament passiert.

Hilfreiche Transporter in Nutzpflanzen

Zahlreiche Transportproteine helfen Pflanzen etwa bei der Aufnahme von Spurenelementen oder schützen vor giftigen Metallen und Salzen. Dank dieser Moleküle könnten sich schon bald die Erträge verschiedener Getreidearten steigern lassen.

VON JULIAN JAKUBIAK

Etwa 30 Prozent der Böden auf der Erde sind sauer: Ihr pH-Wert liegt unter fünf. Das schafft Probleme für viele Getreidearten, die uns als Grundnahrungsmittel dienen. So setzen saure Böden giftige Aluminiumionen frei. Diese beschädigen die Wurzelspitzen anfälliger Pflanzen und hemmen ihr Wurzelwachstum, weil sie das Zellskelett verändern. Damit beeinträchtigen sie auch die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen. Die Toleranz verschiedener Getreidearten gegenüber Aluminium ist dabei sehr unterschiedlich – und davon abhängig, inwieweit eine Art diese Ionen aus ihren Wurzeln wieder hinausbekommt.

Von zentraler Bedeutung hierfür sind verschiedene Transportproteine. Diese sitzen in der Zellmembran und schleusen bestimmte Substanzen durch sie hindurch oder erleichtern zumindest den Vorgang. So schützen sich Pflanzen auch vor den schädlichen Aluminiumionen.

Schon seit Längerem ist bekannt, dass Aluminium ein als TaALMT1 bezeichnetes Protein in Weizen aktiviert. Dieses steuert einen Ionenkanal, der so genannte Malat-Ionen aus der Wurzelspitze ausströmen lässt. In der Zellwand außerhalb des Zytoplasmas binden diese organischen Ionen dann das Aluminium, was dieses wiederum neutralisiert.

Im Jahr 2009 demonstrierten australische Wissenschaftler in einem Laborversuch bereits das Potenzial dieses Mechanismus: Sie brachten das Gen in Gerste ein, eine gegenüber Aluminium

besonders empfindliche Getreideart – und verbesserten damit beträchtlich die Erträge auf saurem Untergrund.

Vor drei Jahren stieß ein Forscherteam um Jixing Xia von der University of California in San Diego auf eine weitere pflanzliche Strategie gegen Aluminium: In Reis arbeiten mehrere Transportproteine zusammen, um die Metallionen in den Vakuolen der Pflanzenzellen zu binden und sie somit vom Stoffwechsel fernzuhalten. Genanalysen haben zudem offenbart, dass in Reis unterschiedliche Varianten dieser Transportproteine vorkommen. Das erklärt die beobachteten Schwankungen in der Aluminiumtoleranz verschiedener Reissorten.

Abwehrstrategien gegen schädliches Natrium

Doch auch mit anderen Problemen haben viele Getreidearten zu kämpfen. So kann Bewässerung die Erträge von Nutzpflanzen verschlechtern, weil sich dadurch mit der Zeit der Salzgehalt der Böden erhöht. Denn das verwendete Wasser enthält immer Spuren von Kochsalz, das nach Verdunsten im Erdreich verbleibt.

Dem wirken Pflanzen mit Transportern aus der so genannten HKT-Familie entgegen, die für Natrium- und Kaliumionen zuständig sind und die übermäßige Anreicherung von Natrium in den Blättern unterbinden: Sie entfernen das Metall aus dem so genannten Xylem – dem Leitungsgewebe, das Nährsalze und Wasser zu den Blättern befördert. Schon seit Längerem kennt

Internationale Fachmesse
Ideen · Erfindungen · Neuheiten

iENA

2013

31. Okt. – 3. Nov.



- **Neue Ideen für den Markt.**
Die iENA 2013 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.
- **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.
- **iENA-Symposium**
Freitag, 1. Nov. 2013, 10-13 Uhr
„Patentpolitik in Europa“
(Teilnahme im Eintritt enthalten)
- **Fachberatung und Information**
Messe Nürnberg · Halle 12

In Kooperation mit:

Süddeutsche Zeitung

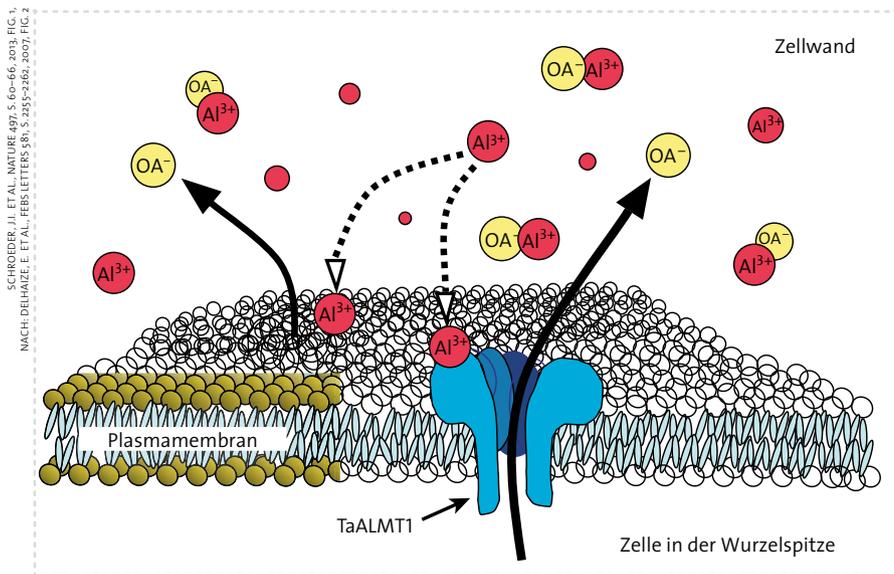


International
Federation of
Inventors'
Associations



Veranstalter/Organisation
AFAG Messen und Ausstellungen GmbH
Projektmanagement iENA 2013
Messezentrum 1, 90471 Nürnberg
☎ 09 11 - 9 88 33 - 570
☎ 09 11 - 9 88 33 - 579

iena@afag.de · www.iena.de



Die Grafik zeigt einen in der Plasmamembran von Wurzelspitzenzellen eingebetteten TaALMT1-Ionenkanal (blau): In sauren Böden aktivieren Aluminiumionen das Protein (gestrichelte Linie). Das führt zum Ausfluss der Malationen in die Zellwand außerhalb des Zytoplasmas. Dort binden diese Moleküle (gelb) dann die Aluminiumionen, um die Zellen in der Wurzelspitze zu schützen.

man diesen Mechanismus in Reispflanzen, doch 2012 konnten Forscher um Rana Munns von der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation im australischen Canberra auch in Weizen Gene aus der HKT-Familie nachweisen.

Der pflanzliche Zuckerspender

Wie wichtig es für Pflanzen ist, ihr photosynthetisches Gewebe zu schützen, zeigt eine ganz andere Proteingruppe: so genannte SWEETs (Abkürzung für »Sugars Will Eventually be Exported Transporters«). Lange suchten Forscher vergeblich nach den Transportern, mit denen Blattzellen Saccharose in die Leitbündel freisetzen. Diese im Zuge der Fotosynthese entstehende Zuckerform ist ein Schlüsselmolekül, weil sie Energie für das Wachstum liefert. Im Jahr 2010 wurden amerikanische Wissenschaftler um Li-Qing Chen von der Carnegie Institution for Science in Stanford fündig: Sie identifizierten etwa 20 SWEET-Gene, einige davon in verschiedenen Modellorganismen und manche auch in Reis.

Die Entdeckung der SWEETs brachte eine weitere Erkenntnis: Die Proteine

haben entscheidende Bedeutung für Krankheitserreger wie etwa die Verursacher des weit verbreiteten Feuerbrands. Denn deren Vermehrung hängt stark von der Nährstoffversorgung der Wirtspflanzen ab. Feuerbrand auslösende Bakterien steigern daher in infizierten Pflanzenzellen die Synthese der SWEETs.

Wissenschaftlern um Ting Li von der Iowa State University in Ames ist es mit diesem Wissen im vergangenen Jahr gelungen, gegen Feuerbrand resistente Reis zu züchten (*Nature Biotechnology* 30, S. 390–392, 2012). Sie hemmten den Erreger mit Hilfe so genannter TALENs (Transcription Activator-like Effector Nucleases): molekularer Skalpelle, die ein Genom an beliebiger Stelle zerschneiden und zudem modifizieren können, indem sie dort DNA-Sequenzen einfügen.

Der Vorteil dieses seit 2011 verwendeten DNA-bindenden Proteins besteht darin, dass es im Gegensatz zu anderen nicht nur zu einem ganz bestimmten Genabschnitt passt. Vielmehr besteht es aus wiederholten Aminosäuresequenzen – so genannten Repeats –, die an einer Stelle variabel sind. Dabei

binden sich die vier existierenden TALE-Repeats jeweils spezifisch an eine der vier Nukleobasen. Kommt im Genom nun eine abweichende Base vor, kann man im TALE einfach einen Repeat gegen einen anderen austauschen – somit lässt sich zu jeder beliebigen Gensequenz das dazu passende Molekül erzeugen.

Der Feuerbranderreger konnte die Produktion der modifizierten SWEET-Transporter nicht länger anregen. Er verhungerte also, weil der Reis ihn nicht ausreichend mit Zucker versorgte.

Die Erforschung der Mechanismen pflanzlicher Transportproteine ist vor allem beim Reis sehr wichtig, da er das Grundnahrungsmittel für mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung darstellt. Über zwei Milliarden Menschen leiden an Eisen- und Zinkmangel, weil ihre Nahrung nicht genug von diesen Spurenelementen enthält. Ein wesentlicher Grund dafür: Bei der Weiterverarbeitung von Reis wird durch das Polieren die äußere Schicht entfernt – und damit auch ein Großteil der wichtigen Spurenelemente wie Eisen und Zink, welche die Pflanzen zuvor mit Hilfe von Transportproteinen aus dem Boden aufgenommen haben.

2009 fanden Wissenschaftler um Si-chul Lee von der University of California in Davis heraus, wovon es abhängt, wie viel Eisen polierter Reis noch enthält. Demnach finden sich stets dann erhöhte Eisengehalte, wenn die Pflanze über viel Nicotianamin verfügt. Denn das ist beteiligt an der Bildung von Desoxymugineinsäure, die wiederum hilft, das Eisen aus dem Boden in die Pflanze zu bringen.

Als Lees Team künstlich die Gene aktivierte, die Nicotianamin synthetisieren, erhöhte sich die Eisenkonzentration in den Reiskörnern deutlich. Zudem erwies sich das angereicherte Spurenelement als biologisch verwertbar, wie Tierfütterungsversuche zeigten: Die Forscher gaben blutarmen Mäuse vier Wochen lang entweder manipulierten oder unveränderten Reis zu fressen und ermittelten anschließend ihre Hämoglobin- und Hämatokritwerte. Nach zwei Wochen waren diese bei den Na-

gern, die eisenreich ernährt wurden, wieder auf normales Niveau angestiegen, während die mit normalem Reis gefütterten Tiere blutarm blieben (PNAS 106, S. 22014–22019, 2009).

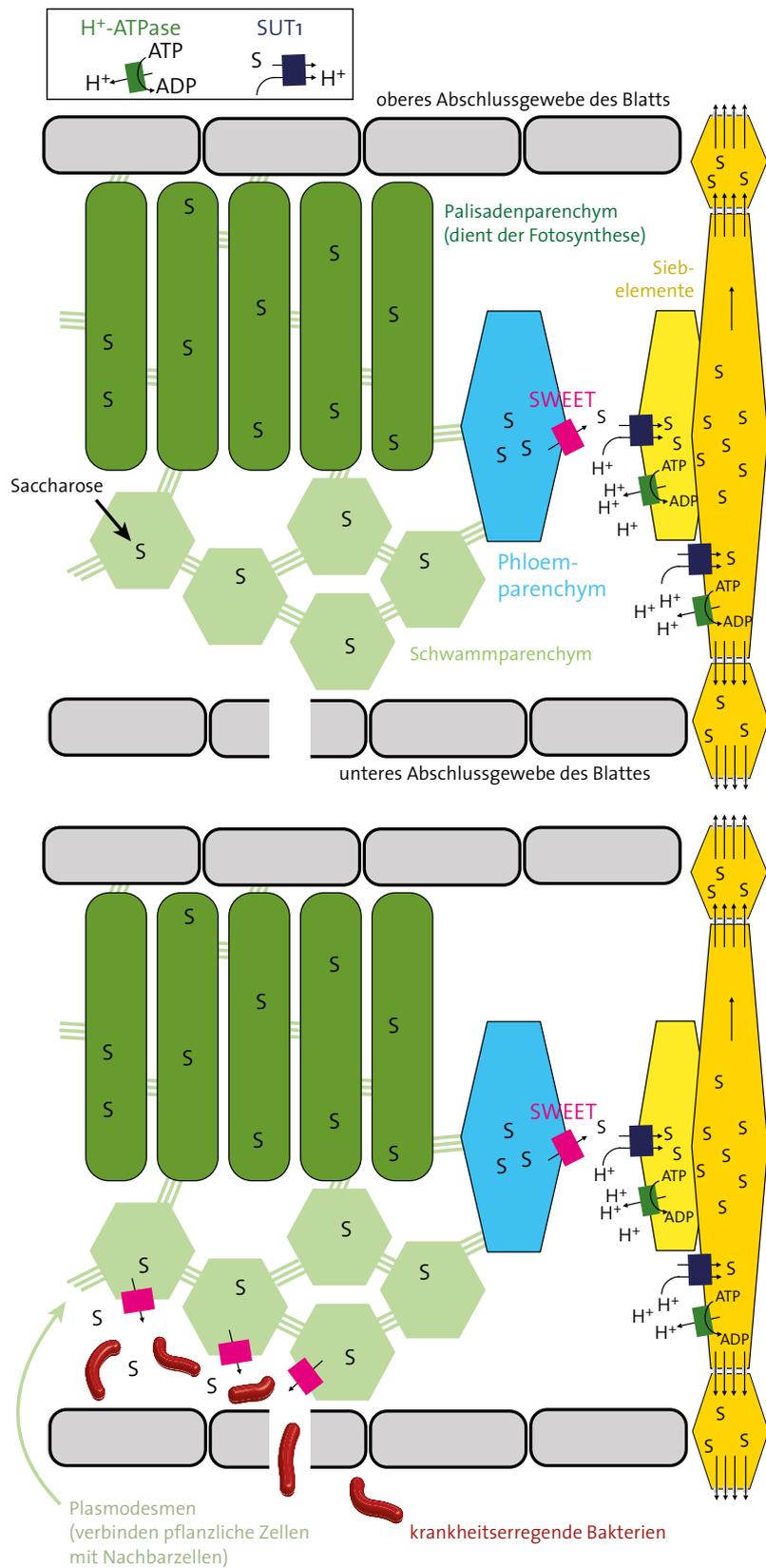
In Feldversuchen kombinierten Forscher diesen Ansatz 2012 schließlich mit der gentechnischen Anreicherung von zwei weiteren Faktoren: einem 2010 entdeckten Protein, das dafür sorgt, dass Eisenionen möglichst weit ins Innere von Reis vordringen können, sowie dem Protein Ferritin, das dafür zuständig ist, Eisen in der Pflanze zu speichern. Als Ergebnis des Versuchs stieg der Eisengehalt der Reiskörner auf mehr als das Vierfache (Scientific Reports 2, S. 543–549, 2012).

Mit Präzisionszucht die Gentechnik umgehen

Diese und andere Konzepte zur Verbesserung von Nutzpflanzen beruhen nicht allein auf den gängigen gentechnischen Verfahren, bei denen transgene Organismen entstehen. So versuchen Forscher, molekulare Marker in die Pflanzen einzubringen, um eine so genannte Präzisionszucht zu betreiben. Hierbei analysieren sie das Erbgut von potenziellen Elterngenerationen mit Hilfe künstlich hergestellter DNA-Abschnitte, die sich an die eingeschleusten spezifischen Genmarker anheften. Daraufhin wählen sie geeignete Partner zur Kreuzung aus. Bei dieser Methode enthalten die Nachkommen keine artfremden Gene in der DNA – was einen Hauptkritikpunkt an der Gentechnik beseitigt.

So ließe sich etwa die Aluminiumtoleranz von Weizen erhöhen, indem man das hierfür entscheidende Gen TaALMT1 mit solchen molekularen Markern versieht und die Pflanzen entsprechend selektiert. Und auch die stark schwankende Aluminiumtoleranz von Reispopulationen könnte man mit Hilfe der markergestützten Präzisionszucht in die gewünschte Richtung lenken, ohne dass dabei transgene Organismen nötig wären.

Julian Jakubiak ist freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.



Die SWEET-Proteine (rot) exportieren die bei der Fotosynthese produzierte Saccharose aus dem Phloemparenchym (oben). Ein Transportprotein namens SUT1 lädt die Zuckermoleküle dann in die Transport-

kanäle (Siebelemente). Krankheitserreger können in infizierten Pflanzenzellen die SWEET-Proteine anregen und so die Freisetzung von Saccharose auslösen, die eine wichtige Nahrungsquelle für sie ist (unten).

Beuteschau nach der Varusschlacht?

Die Verteilung von Metallfragmenten auf dem antiken Schlachtfeld bei Kalkriese bringt Archäologen auf neue Ideen.

VON ACHIM ROST UND SUSANNE WILBERS-ROST

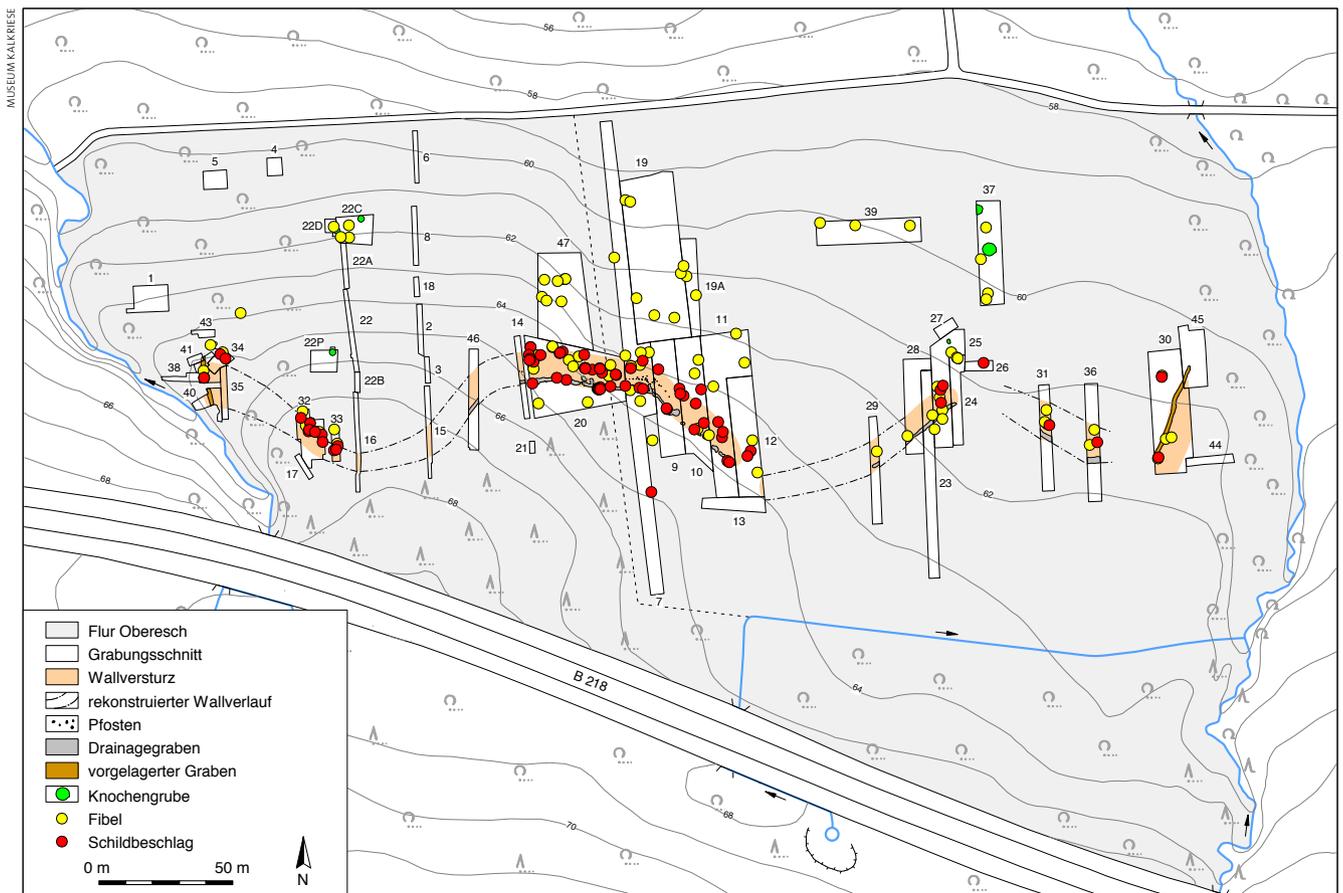
Seit vielen Jahren gilt ein gut 30 Quadratkilometer großes Gebiet nördlich von Osnabrück als wahrscheinlichster Kandidat für die Lokalisierung der legendären »Varusschlacht« 9 n. Chr. In seinem Zentrum liegt ein nur knapp zwei Kilometer breiter, stark verästeltes Engpass zwischen dem Kalkriese Berg und dem Großen Moor. Ende des 19. Jahrhunderts legten Münzfunde

die Vermutung nahe, dass dort jene Schlacht stattfand, in der dem antiken Autor Tacitus zu Folge drei römische Legionen mitsamt Hilfstruppen und großem Versorgungstross durch ein germanisches Stammesbündnis vernichtet wurden. Neue Funde von römischen Silbermünzen motivierten ab 1987 systematische Ausgrabungen, und mittlerweile erhärten etwa 6000 Mün-

zen und militärische Ausrüstungsgegenstände, Überreste einer offenbar als Hinterhalt errichteten Wallanlage sowie Gruben mit Skelettresten die Annahme. Insbesondere die Prägedaten der Münzen sprechen für eine Datierung in die Jahre um 9 n. Chr., doch hält die Fachdiskussion bis heute an.

Bei den Forschungen der letzten Jahre standen nicht nur die Ereignisse der Feldschlacht im Fokus, sondern auch die Geschehnisse danach. Dabei kamen Methoden der prähistorischen Forschung zum Einsatz: Wie bei Feuer-

Neuerdings werten Archäologen die Verteilung von Rüstungs- und Kleidungsfragmenten in der »Flur Oberesch« aus, um das Geschehen auf dem Schlachtfeld zu rekonstruieren.





steinwerkzeugen altsteinzeitlicher Lagerplätze erlaubt die Verteilung eher unscheinbarer Funde, wie Bruchstücke von Bronzebeschlägen oder Silberblechen, allerlei Rückschlüsse. Kalkriese kommt damit eine Vorreiterrolle zu, denn die Schlachtfeldarchäologie ist eine noch junge Teildisziplin der Altertumswissenschaften.

Das mit fast 5000 römischen Militaria fundreichste Areal ist das zentral im Engpass gelegene Flurstück »Obersesch«. Hier fiel auf, dass die verschiedenen Ausrüstungsteile sehr unterschiedliche Verteilungsmuster aufweisen. Während Gewandnadeln, die Umhänge auf der Schulter fixierten, Haken und Schnallen von Schienen- und Kettenpanzern in der

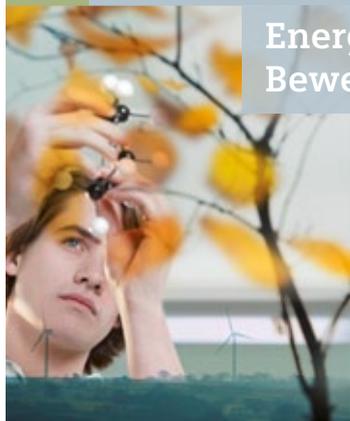
Die Ausrüstung eines römischen Legionärs war standardisiert. Daher können Forscher Kleinfunde wie Gewandspangen und Beschläge auch heute noch genau zuordnen.

Kampfzone sehr weit verstreut entdeckt wurden, verhält es sich mit Fragmenten von Schildbeschlägen ganz anders (siehe Plan links) – sie konzentrieren sich unmittelbar am erwähnten Wall.

Aus den Kampfhandlungen selbst ergeben sich keine schlüssigen Erklärungen für diese Unterschiede. Welche Aktivitäten kommen als Ursachen sonst noch in Frage? Aus antiken Schriftquellen ist bekannt, dass die Germanen sehr darauf erpicht waren, Beute zu machen. Dabei wurde Verwundeten und Toten geraubt, was die Sieger als brauchbar oder wertvoll erachteten; zurück blieben lediglich Kleinteile der Rüstung. Offenbar markieren diese Orte, an denen getötete römische Soldaten ausgeraubt wurden. Über die weitere Behandlung der Leichen wissen wir von Tacitus, dass die Germanen ihre Gegner liegen ließen und eine Bestattung der durch Tierfraß und Verwesung sicherlich bereits stark reduzierten letzten Knochenreste erst

ANZEIGE

ENCOURAGE. empowering people



Energie neu denken! Bewegt etwas für Eure Zukunft.

Mitmachen beim Schülerwettbewerb 2014 in Mathematik, Naturwissenschaften und Technik!

Wie erzeugen und nutzen wir Energie künftig umweltschonender und effizienter? Gesucht werden junge Forscherinnen und Forscher, die mit ihren Ideen für eine nachhaltige Energieversorgung die Welt von morgen gestalten.

Teilnehmen können Schülerinnen und Schüler der oberen Jahrgangsstufen in → Deutschland (ab Klasse 10) → Österreich (Oberstufe ab Klasse 6) → der Schweiz (Sekundarstufe II) → sowie der deutschen Auslandsschulen in Europa (ab Klasse 10). Die Besten präsentieren ihre Arbeiten vor Professoren der Partner-Universitäten RWTH Aachen, TU Berlin und TU München.

Es gibt Geldpreise im Gesamtwert von rund 100.000 Euro zu gewinnen!

Anmeldeschluss zur Teilnahme: 15. November 2013
Einsendeschluss für die Arbeiten: 15. Januar 2014

www.siemens-stiftung.org/schuelerwettbewerb

SIEMENS | Stiftung



Der römische Schild bestand aus Holz, das mit Metallbeschlägen gesichert und verziert wurde.

im Verlauf eines Feldzugs römischer Truppen unter Germanicus sechs Jahre später erfolgt ist. Die auf dem Oberesch entdeckten Knochengruben können mit dieser Aktion in Verbindung gebracht werden.

Dass bei den Grabungen kaum Schwerter zum Vorschein kommen, lässt sich einfach erklären: Die Waffen wanderten in das Inventar der Germanen. Für die großen römischen Schilde hatten diese zwar wohl keine Verwendung, da sie nicht zur germanischen Ausrüstung passten. Die kleinen Bruch-

stücke der metallenen Beschläge verraten aber, dass man sie von den hölzernen Schilden abgehobelt, kompakt zu recht gebogen und zum Einschmelzen abtransportiert hat.

Das erhellt freilich noch nicht, warum sich solche Fragmente nur im Wallbereich finden. Sollten die zahlreichen, jeweils gut neun Kilogramm schweren römischen Schilde einzig aus Gründen der Arbeitsorganisation zum Wall geschleppt worden sein, um sie dort an zentraler Stelle von Handwerkern zerlegen zu lassen? Auch Helme und weitere Ausrüstungsteile aus Bronze- und Silberblech, die man nicht erst zerlegen musste, waren dem Verteilungsmuster nach dorthin gebracht worden.

Bei den Römern war es durchaus üblich, erbeutete Waffen auf Haufen zusammenzutragen oder an hölzernen Gestängen zu drapieren – um den eigenen Sieg zu feiern. Zwar gibt es bislang keinerlei Berichte, dass auch germanische Krieger diesen Brauch pflegten, doch kannten sicherlich etliche von ihnen die römischen Gepflogenheiten: Mit ihrem Anführer Arminius hatten viele in den Hilfstruppen Roms gedient. Unter anderem die Verteilung

der Schildfragmente und Helmteile spricht tatsächlich dafür, dass die römischen Waffen auf und am Wall ausgestellt wurden. Schließlich bot dies den Anführern die Möglichkeit, ihre Überlegenheit zu demonstrieren und so die Voraussetzung für eine Fortsetzung des Stammesbündnisses zu schaffen. Tacitus erwähnt mit Verweis auf die Berichte Überlebender ausdrücklich eine Ansprache des Arminius und die Verhöhnung der erbeuteten Feldzeichen. Anders als bei einer römischen Schau blieben die Waffen aber nicht vor Ort, sondern wurden unter den Stämmen aufgeteilt.

Die Archäologen **Susanne Wilbers-Rost** vom Museum und Park Kalkriese und **Achim Rost** von der Universität Osnabrück leiten die Ausgrabungen in Kalkriese.

Literaturtipp

Rost, A. und Wilbers-Rost, S.: »Kalkriese 6. Die Verteilung der Kleinfunde auf dem Oberesch in Kalkriese. Kartierung und Interpretation der römischen Militaria unter Einbeziehung der Befunde« Römisch-Germanische Forschungen Band 70, Verlag Philipp von Zabern, Darmstadt/Mainz 2012.

ADOLESCENZ

Das pubertierende Genom

Beim Einsetzen der Geschlechtsreife spielen epigenetische Mechanismen eine wichtige Rolle. Erklären sie auch, warum die sexuelle Reifung immer früher beginnt?

VON STEFANIE REINBERGER

»Sind das noch Kinder oder schon junge Frauen?« kann es einem leicht durch den Kopf schießen, wenn man zum Unterrichtsschluss etwa mit dem Bus unterwegs ist. Vor allem die Mädchen bieten oft einen schon fast verstörenden Anblick. Kaum sind sie der Grundschule entwachsen, sprießen mehr oder weniger üppige Brüste. Reichlicher Gebrauch von Schminke und aufreizende Kleidung tragen weiter dazu bei, den Eindruck von Kind-

frauen hervorzurufen. Unwillkürlich fragt man sich: »Waren wir damals auch schon so reif?«

Tatsächlich scheint sich die körperliche Entwicklung zeitlich immer weiter nach vorn zu verschieben – gerade bei den Mädchen: Waren diese 1860 in Deutschland meist älter als 16, wenn die erste Regelblutung einsetzte, so lag das Durchschnittsalter 1920 bereits bei 14,6, 1950 bei 13,1, 1980 bei 12,5 und 1994 bei 12,2 Jahren. Der Landauer Sexual-

wissenschaftler Norbert Kluge prognostizierte folglich 2006 in seiner Veröffentlichung »Beiträge zur Sexualwissenschaft und Sexualpädagogik«, dass die Pubertät auch in Zukunft immer früher einsetzen wird.

Dänische Forscher um den Mediziner Anders Juul von der Universität Kopenhagen machten 2009 einen ähnlichen Trend aus (*Pediatrics* 123, e932, 2009). In ihre Kohortenstudie flossen Daten von insgesamt 2095

Mädchen ein – 1100 davon waren in den Jahren 1991 bis 1993 untersucht worden, die übrigen zwischen 2006 und 2008. Wie die Wissenschaftler feststellten, setzte die erste Monatsblutung in der zweiten Gruppe durchschnittlich rund drei Monate früher ein als bei der ersten. Kurze Zeit später veröffentlichte Juuls Team ähnliche Ergebnisse für Jungen: Das Hodenwachstum begann in einer Probandengruppe aus den Jahren 2006 bis 2008 etwa drei Monate früher als noch in den 1990er Jahren (*J. Clin. Endocrinol. Metab.* 95, S. 263, 2010).

Woran mag das liegen? Sicher ist: Die Pubertät beginnt im Kopf, genauer gesagt im Hypothalamus. In dieser Hirnregion schütten bestimmte Nervenzellen, so genannte GnRH-Neurone, das Gonadotropin-Releasing-Hormon (GnRH) oder Gonadoliberin aus. Dieses wiederum bewirkt in der Hypophyse die Freisetzung der Gonadotropine FSH und LH (follikelstimulierendes beziehungsweise luteinisierendes Hormon). Die beiden Hormone regen bei Frauen den Zyklus, bei Männern die Spermienbildung und die Testosteronproduktion an. Die Schamhaare

beginnen zu spießen, die Geschlechtsorgane vergrößern sich, und die sexuelle Reifung nimmt ihren Lauf.

Wann die Pubertät beim Einzelnen einsetzt, ist zu einem Gutteil genetisch bedingt. Das haben in der Vergangenheit unter anderem Zwillingsstudien gezeigt. Wissenschaftler konnten in den letzten Jahren eine Reihe von Genen identifizieren, die mit dem Beginn der Geschlechtsreife in Zusammenhang stehen – allen voran die Gene für Kisspeptin (KiSS1) und den Kisspeptinrezeptor (KiSS1R). Indem Kisspeptin sich an seinen Rezeptor auf der Oberfläche der GnRH-Neurone heftet, aktiviert es die Nervenzellen und setzt damit die Hormonkaskade in Gang. KiSS1 gilt daher als Pubertät auslösendes Gen.

DNA-Methylierung als Startschuss

Woher aber bekommt KiSS1 seinerseits das Signal, aktiv zu werden? Hier scheinen so genannte epigenetische Mechanismen ins Spiel zu kommen, so die Überzeugung der Forscher um Sergio Ojeda vom National Primate Research Center in Beaverton (Oregon). Demnach steuern chemische Veränderun-

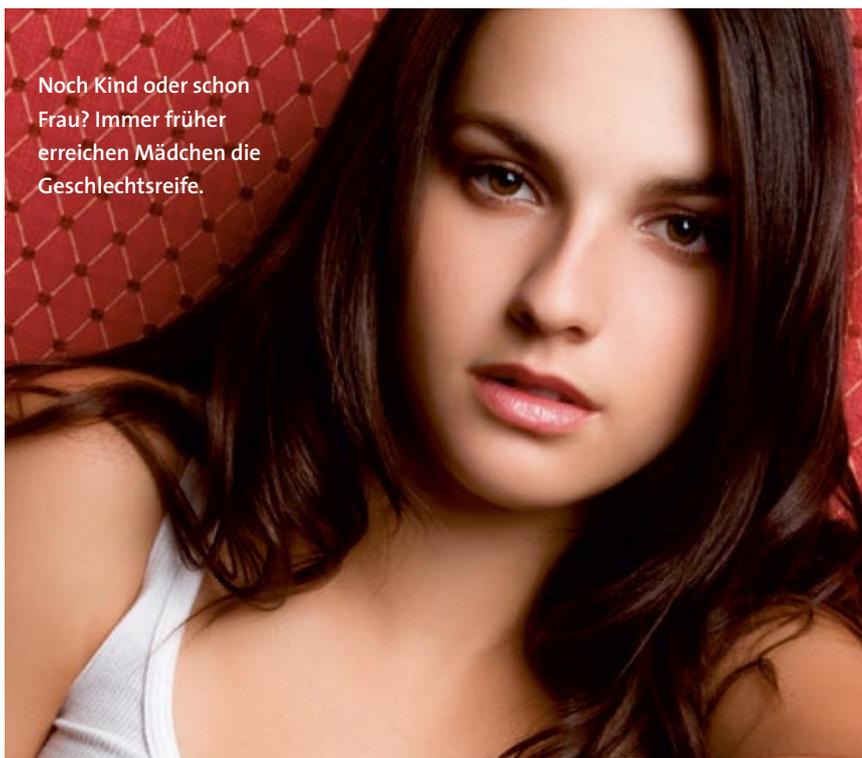
gen der DNA, ob Pubertät auslösende Gene abgelesen werden und die hormonelle Umwälzung starten. Bei der bekanntesten chemischen DNA-Modifikation binden sich Methylgruppen an die Erbsubstanz und bewirken, dass betroffene Gene weniger aktiv sind oder sogar gänzlich stumm bleiben.

Die US-Wissenschaftler überprüften ihre Hypothese im Tierversuch – bei jungen weiblichen Ratten, die kurz vor dem Eintritt in die Pubertät standen (*Nature Neuroscience* 16, S.281, 2013). Sie behandelten die Nager mit 5-Azacytidin, einem so genannten Methyltransferase-Inhibitor. Dieser verhindert, dass sich neue Methylgruppen an das Erbgut der Tiere anheften. Tatsächlich blieb bei den so behandelten Ratten die Geschlechtsreife aus: Sie bekamen keinen Eisprung, und auch die typischen zyklischen Hormonveränderungen ließen sich nicht beobachten. Dabei waren die Eierstöcke der Tiere funktionsfähig – allein der hormonelle Startschuss aus dem Gehirn fehlte.

Um diesem Effekt auf den Grund zu gehen, verglichen die Forscher im nächsten Schritt die Methylierungsmuster in Nervenzellen aus dem Hypothalamus von Ratten – und zwar von solchen vor, zu Beginn und mitten in der Pubertät. Dabei zeigte sich: Die Muster verändern sich insbesondere in einer Gruppe von regulierenden Genen, genannt Polycomb Group (PcG), sowie bei Genen, die mit ersteren wechselwirken.

Die PcG-Proteine gelten als zentrale Regulatoren, die eine Vielzahl von genetisch gesteuerten Programmen in Schach halten, indem sie die Aktivität anderer Gene hemmen. Im Hypothalamus blockieren sie unter anderem das pubertätauslösende Gen KiSS1. Auf diese Weise unterdrücken sie bei Jungtieren zunächst die Abläufe, die zur Geschlechtsreife führen. Werden die PcG-Gene epigenetisch stillgelegt, kann KiSS1 in Aktion treten, und die Pubertät beginnt.

»Es war immer klar, dass die Gene eines Organismus den Zeitpunkt der Pubertät bestimmen. Die Rolle der Epigenetik in diesem Prozess wurde aber noch nie erfasst«, erläutert Erstautor



Das Netz gewinnt Macht

Der gläserne Mensch im Fadenkreuz von Computerprogrammen

Die Sciencefiction spielt längst mit dem Gedanken, technische Apparate könnten eines nicht allzu fernen Tages die Herrschaft übernehmen und die Menschheit knechten. Beispiele sind Filme wie »Colossus«, »I, Robot« und »Terminator«. Doch anlässlich der Enthüllungen des früheren US-Geheimdienstmitarbeiters Edward Snowden zeigt sich wieder einmal, dass die technische Entwicklung jederzeit im Stande ist, die kühnsten Zukunftsvisionen zu übertreffen. Wenn man die vom Whistleblower aufgedeckten Fakten weiterdenkt, droht nicht die gewaltsame Machtübernahme menschenähnlicher Roboter – wie in einigen der erwähnten Sciencefiction-Streifen –, sondern eine viel unheimlichere Gefahr: Computernetze beginnen unauffällig damit, private Informationen zu sammeln, sie selbsttätig auszuwerten und so schließlich das Verhalten der Nutzer zu steuern.

Hätte Snowden lediglich entdeckt, dass die westlichen Geheimdienste nach Belieben auf Telefonate und E-Mails zugreifen, wäre das ein alter Hut gewesen. Schon 2001 debattierte das europäische Parlament über ein weltweit operierendes

»Bloße Allwissenheit droht in bedrückende Allmacht überzugehen«

Spionagenetz namens Echelon, das den angelsächsischen Nationen nach Ende des Kalten Kriegs vorwiegend zur Wirtschaftsspionage diente. Mit dem so genannten Krieg gegen den Terror geriet die elektronische Schnüffelei nur vollends außer Rand und Band.

Für umfassendes Datensammeln erweist sich das Internet als ideales Instrument. Wie Snowden zeigte, hat sich heimlich, still und leise ein militärisch-industrieller Informationskomplex etabliert, dem monopolähnliche Konzerne wie Microsoft, Apple, Google und Facebook zuarbeiten. Das bedeutet, dass ein Geheimdienst im Prinzip jederzeit wissen kann, wo ich mich gerade aufhalte, wohin ich unterwegs bin oder mit wem ich worüber kommuniziere.

Das finde ich zunächst kaum schlimmer als die Idee, es gebe einen allwissenden Gott. Viel mehr beunruhigt mich Folgendes: Da die riesige Datenflut jede menschliche Kapazität übersteigt, müssen Maschinen die Information auswerten. Mit einer vollautomatischen Rasterfahndung filtern sie bedenkliche Worte, Bewegungen und Kontakte heraus, erstellen Persönlichkeitsprofile, ermitteln die Wahrscheinlichkeit, dass ein Verdächtiger unerwünschte Handlungen vorbereitet.

Dazu fällt mir ein weiterer Sciencefiction-Film ein. In »Minority Report« weiß die Organisation Precrime im Voraus, wann und wo ein Verbrecher zuschlagen wird, und schreitet rechtzeitig ein, um die Tat zu verhindern. Der Film erklärt diese Möglichkeit mit der Fiktion, es gebe Mutanten mit hellseherischen Gaben. Viel wirklichkeitsnäher erscheint mir ein Computernetz, das aus dem bisherigen Verhalten einer Person auf künftige Taten schließt – und zu deren Verhinderung automatische Drohnen loschickt.

Damit droht bloße Allwissenheit in bedrückende Allmacht überzugehen. Schon wird erforscht, wie man soziales Verhalten durch »Netzwerk-Interventionen« am geschicktesten beeinflusst (siehe meinen Einwurf vor genau einem Jahr). An diesem Punkt wird sogar mir hartgesottenem SF-Fan angst und bang. Was, wenn am Ende das Programmieren solcher Interventionen einer superklugen Software zufällt, die angeblich besser als jeder Politiker weiß, was uns frommt?



Michael Springer

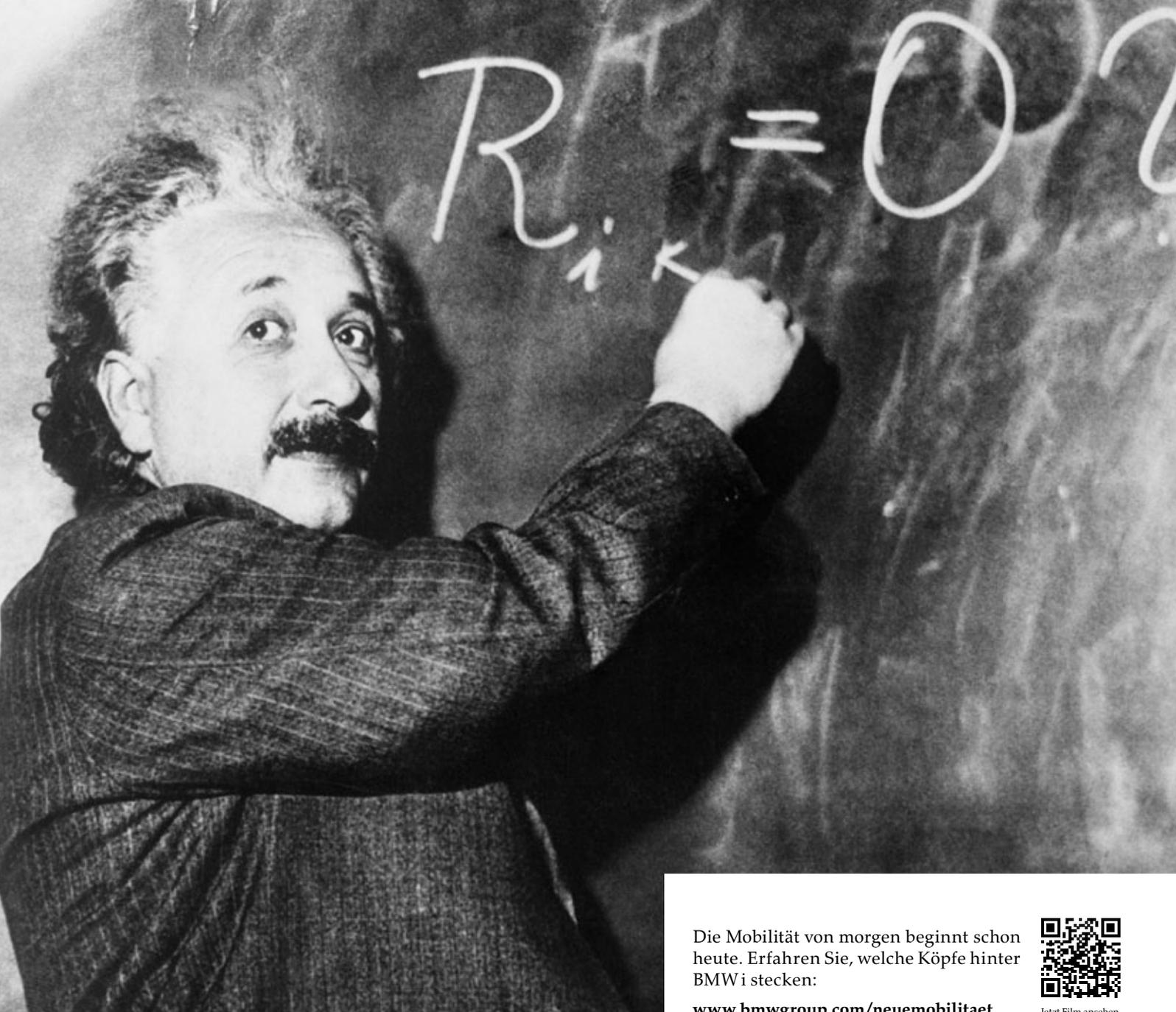
Alejandro Lomniczi die Bedeutung der Arbeit. Eine echte Erklärung für die Regulation der Pubertät liefert die Arbeit jedoch nicht – da ist der Titel der Publikation »Epigenetic control of female puberty« (Epigenetische Steuerung der weiblichen Pubertät) etwas irreführend. Beweisen konnten die US-Forscher lediglich, dass epigenetische Mechanismen am Pubertätsgeschehen beteiligt sind.

Rolle hormonartig wirkender Substanzen aus der Umwelt

Was die Untersuchung der Amerikaner auch nicht wirklich aufklärt, ist die Ursache für einen früheren Pubertätseintritt, obwohl die Pressemeldung der Oregon Health & Science University das behauptet. Allerdings deutet sie einen möglichen Zusammenhang an. Denn epigenetische Veränderungen stehen auch unter dem Einfluss von Umweltfaktoren wie Ernährung, Stress oder Giftstoffen. »Daher machen es diese Befunde denkbar, dass ein signifikanter Prozentsatz an Fällen von vorzeitiger oder verzögerter Pubertät das Ergebnis von Umweltfaktoren und anderen Veränderungen der epigenetischen Kontrolle sein könnten«, erklärt Sergio Ojeda.

Das irritierende Bild im Schulbus vermag die Arbeit der US-Forscher also noch nicht endgültig zu klären – zumal nicht alles, was nach Pubertät aussieht, auch wirklich mit Geschlechtsreife zu tun hat. So hat die Studie der dänischen Kollegen um Anders Juul vor allem einen Widerspruch aufgedeckt: Während sich der Menstruationsbeginn in zehn Jahren um drei Monate nach vorne verschoben hat, begannen die Brüste der Mädchen sogar ein ganzes Jahr früher zu wachsen – ohne entsprechenden Umbau des Hormonhaushalts. Für diese körperliche Veränderung war demnach gar nicht die einsetzende Pubertät verantwortlich. Möglicherweise spielen hier vielmehr endokrine Disruptoren eine Rolle, also hormonartig wirkende Substanzen aus der Umwelt.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.



Die Mobilität von morgen beginnt schon heute. Erfahren Sie, welche Köpfe hinter BMW i stecken:

www.bmwgroup.com/neuemobilitaet



Jetzt Film ansehen.

**MANCHE REVOLUTIONEN ENTSTEHEN
IN DEN KÖPFEN EINZELNER.
UNSERE IN DEN KÖPFEN VIELER.**

MOTOR EINER NEUEN MOBILITÄT.

**BMW
GROUP**



Rolls-Royce
Motor Cars Limited

Nano-Arzneitransporter

Konventionelle Chemotherapien haben mitunter schwere Nebenwirkungen. Nanopartikel bieten möglicherweise einen Ausweg: Sie können althergebrachte Wirkstoffe an neue Zielorte bringen und so das gesunde Gewebe schonen.

Von Katherine Bourzac

Wenn Joseph DeSimone Medikamente mittels Nanotechnik herstellt, vergleicht er sich gern mit einem Bäcker. Er mischt Pharmaka mit chemischem »Kuchenteig«, füllt die Mixtur in winzige »Backformen«, lässt sie aushärten und löst anschließend die fertigen Stücke aus der Fassung. Er kann ihnen verschiedenste Formen geben: Scheiben, Würfel, lange Stäbchen, Kringel oder auch eine pollen-, viren- oder erythrozytenähnliche Gestalt. Einen Unterschied gebe es jedoch zum Bäcker, sagt DeSimone, Chemieingenieur an der University of North Carolina in Chapel Hill: Sämtliche Partikel, die er in einem Fertigungsprozess herstelle, seien untereinander völlig identisch – unabhängig vom jeweiligen Rezept.

Materialwissenschaftler und Chemiker, die mit Nanotechnologie arbeiten, sind kreativ und pedantisch zugleich. Die Möglichkeit, Partikel nach beinahe beliebigen Vorgaben auf den millionstel Millimeter genau herzustellen, versetzt sie in die Lage, die Funktionen der Teilchen äußerst präzise zu kontrollieren. DeSimones vielgestaltige Partikel können sich beispielsweise durch Blutgefäßwände quetschen oder ins Innere eines Tumors hineinbohren. Und die Form ist nur eine von vielen Eigenschaften, die sich exakt vorgeben lassen. Nanopartikel mit spezifischer stofflicher Zusammensetzung, Größe oder Oberflächenladung können Wirkstoffe an bisher nicht erreichbare Orte transportieren und sie damit für neue Anwendungen zugänglich machen. Solche Wirkstoffträger dringen hochselektiv in Tumorgewebe ein oder schützen

ihre therapeutische Fracht davor, noch vor dem Erreichen des Ziels abgebaut zu werden.

Damit haben Medikamente auf Basis von Nanotechnik das Potenzial, eines der größten Probleme der Krebsmedizin zu lösen: hinreichende Mengen eines Arzneistoffs an die gewünschte Stelle im Körper zu bringen, und zwar möglichst ohne Nebenwirkungen oder Resistenzen hervorzurufen. Je mehr die Forscher über das Mikromilieu von Tumoren herausfinden und je besser sie lernen, Trägerpartikel im Nanometermaßstab zu entwickeln und herzustellen, desto näher kommen sie diesem Ziel. Dabei setzen sie manchmal Ansätze um, die bisher unrealisierbar schienen – etwa Wirkstoffe, die ihre Eigenschaften verändern, je nachdem, wo im Körper sie sich befinden. Oder Präparate, die auf ein Zielprotein wirken, das zuvor als pharmakologisch nicht beeinflussbar galt. Einige Labors arbeiten daran, Prinzipien aus der Robotertechnik und den Computerwissenschaften auf Medikamente zu übertragen. So sollen Nanopartikel mit Arzneimittelfracht untereinander kommunizieren, mit dem Ziel, dass sie sich stärker im Tumor anreichern.

Medizinische Verfahren auf Basis von Nanotechnologie haben sich in der Krebsmedizin bisher vor allem dadurch bewährt, dass sie potenziell giftige Wirkstoffe von gesundem Gewebe fernhielten, meint Rakesh Jain. Der Tumorbiologe arbeitet am Massachusetts General Hospital in Boston (USA) und ist an verschiedenen Pharmafirmen beteiligt. Viele Arzneien, erläutert Jain, seien zu giftig, um sie in höheren Dosen zu verabreichen oder mit anderen ebenfalls toxischen Substanzen zu kombinieren. Obwohl sie möglicherweise bestimmte molekulare Zielstrukturen hochspezifisch angreifen, wirken sie kaum gewebe selektiv – sie beeinflussen sowohl gesundes als auch entartetes Gewebe, was schwere Nebenwirkungen verursachen kann.

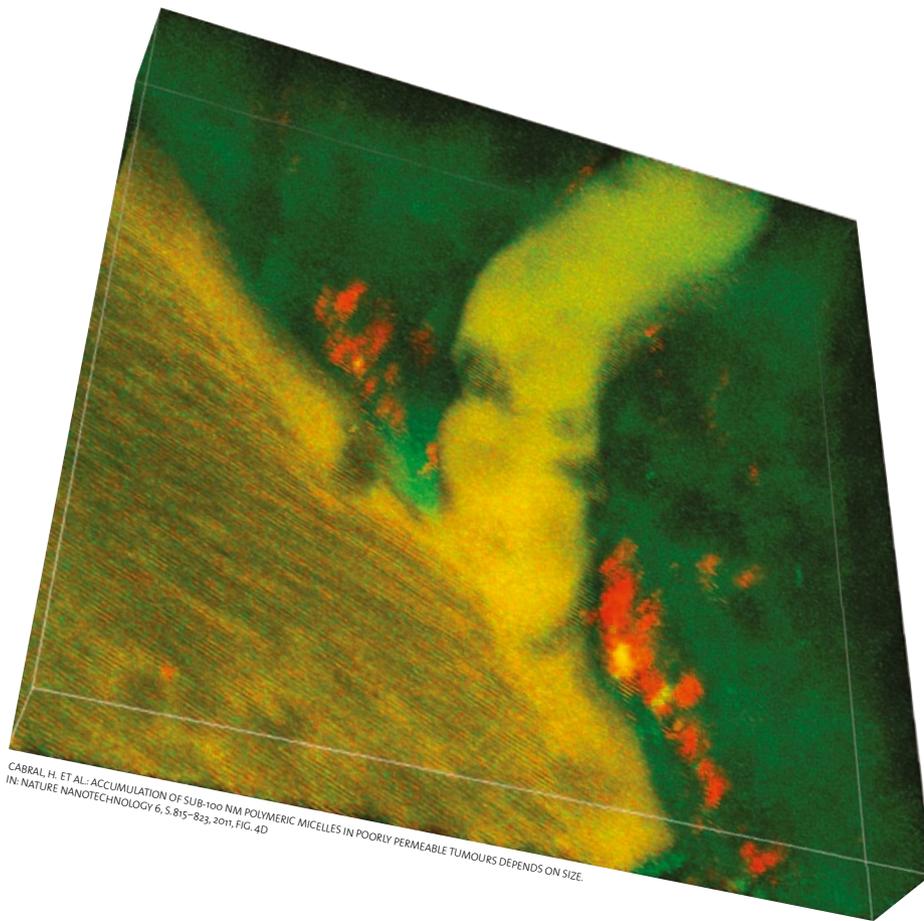
Mit Nanopartikeln lässt sich dieses Problem umgehen. Der Wirkstoff Doxorubicin beispielsweise wird mit Erfolg gegen verschiedene Krebsarten eingesetzt, kann jedoch lebensbedrohliche Schäden am Herzmuskel hervorrufen. Einen ihrer ersten Triumphe erlebte die Nanomedizin, als 1995 das Medikament »Doxil« zugelassen wurde. Dabei handelt es sich um nanometergroße Hüllen aus Fettmolekülen, die Do-

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

KREBSERKRANKUNGEN IM VISIER DER PHYSIKER

- | | | |
|--------|---------------------------------------|----------------|
| Teil 1 | ▶ Der Blick fürs Wesentliche | August 2013 |
| | ▶ Krebszellen im Kräftespiel | |
| | ▶ Berechnung des Tumors | |
| | ▶ Das Unheil kommen sehen | |
| Teil 2 | ▶ Nano-Arzneitransporter | September 2013 |
| | ▶ Evolution von Krebszellen im Modell | |

Ein rekonstruiertes 3-D-Bild zeigt, wie sich 30 Nanometer große Nanopartikel (grün) in einem Tumor der Bauchspeicheldrüse anreichern.



xorubicin enthalten. Sie verhindern sehr effizient, dass der Stoff in den Herzmuskel eindringt.

Bereits Mitte der 1980er Jahre erkannten Forscher: Partikel mit einem Durchmesser von rund 100 Nanometern sind zu groß, um die Wand gesunder Blutgefäße zu passieren. Sie treten jedoch oft aus Tumorblutgefäßen aus, denn diese Adern sind überwiegend unreif, chaotisch strukturiert und entsprechend löchrig. Die Erkenntnis gab den Anstoß dafür, das Medikament »Doxil« zu entwickeln. Um den Herzmuskel zu schützen, verpacken die Forscher den Wirkstoff in Lipidbläschen mit einem Durchmesser von etwa 100 Nanometern. Hierfür schütteln sie die Lipide zusammen mit dem Wirkstoff in wässriger Lösung, so dass sich die Fettmoleküle kugelförmig um das Doxorubicin herum anordnen. Um diese Partikel vor dem Zugriff des Immunsystems zu schützen, hüllen die Forscher sie in einen Mantel aus Polyethylenglykol. Die so modifizierten Partikel sammeln sich nach dem Verabreichen im Tumor des Patienten an, wo das Medikament allmählich aus ihnen entweicht und nahe gelegene Zellen angreift.

Das Risiko einer eingeschränkten Herzfunktion mit Blutstau beträgt bei der Doxil-Therapie nur etwa ein Drittel desjenigen bei der Gabe von unverkapseltem Doxorubicin. »Für die Patienten bedeutet das eine grundlegende Verbesserung der Lebensqualität«, sagt Rakesh Jain. Doch Wirkstoffe aus gesunden Geweben fernzuhalten, ist meist deutlich einfacher, als sie gezielt in erkrankte hineinzubekommen. Die Doxil-Partikel werden auf Grund ihrer Größe passiv daran gehindert, in gesundes Gewebe einzutreten – doch sie sind nicht in der Lage, aktiv in den Tumor einzudringen. Stattdessen sammeln sie sich in den Randzonen der Geschwulst an.

Das sei der Grund dafür, so Jain, dass nanopartikelverpackelte Medikamente die Überlebenszeit der Patienten bislang nur geringfügig verbesserten, verglichen mit konventionellen Darreichungsformen.

Mittlerweile werden deutlich raffiniertere Nanomedikamente entwickelt als Doxil, auch wenn viele davon die Grundkonstruktion einer kugelförmigen Hülle mit eingeschlossenem Pharmakon beibehalten. Um die Freigabe des Wirkstoffs am Zielort zu verbessern, bemühen sich Unternehmen wie BIND Therapeutics (Cambridge, Massachusetts) darum, weitere Eigenschaften der Partikel zu optimieren, etwa deren elektrische Ladung, chemische Zusammensetzung und Form. Geschäftsführer Scott Minick beschreibt die Arbeitsweise von BIND als »medizinisches Nanoingenieurwesen«. Im Gegensatz zu Doxil, das einfache Lipidmoleküle

AUF EINEN BLICK

MEDIKAMENT IN DER MINIVERPACKUNG

1 Nanopartikel als Träger von Arzneistoffen haben großes medizinisches Potenzial. Sie können so gestaltet werden, dass sie ihre Fracht nur in bestimmten Geweben – etwa Tumoren – freisetzen.

2 Nanoverkapselte Wirkstoffe bewähren sich bereits im klinischen Einsatz und zeigen deutlich **weniger Nebenwirkungen** als in herkömmlicher Darreichung.

3 Forscher arbeiten daran, noch effektivere und gezielter wirkende Nanomedikamente zu entwickeln. Ein viel versprechender Ansatz ist das **Stilllegen krebsrelevanter Gene** mittels **RNA-Interferenz**.

als Trägersubstanz nutzt, funktionieren die Nanomedikamente von BIND auf Basis von Polymeren, deren Eigenschaften leichter zu modifizieren sind. Dadurch lassen sich die wirkstoffbeladenen Hüllen besser an bestimmte Zielorte dirigieren, und es wird möglich, zu kontrollieren, wie schnell sie ihre Fracht freisetzen. Zudem greifen die Polymerpartikel Krebszellen gezielt an, indem sie an deren Oberflächenmoleküle binden.

Das am weitesten fortgeschrittene Präparat des Unternehmens, BIND-014, besteht aus 100 Nanometer großen Polymerkügelchen, die mit Docetaxel beladen sind – einem Wirkstoff, der Zellen während der Teilung abtötet. Wie bei Doxil sorgt auch bei BIND-014 die Größe dafür, dass die Partikel nur Wände von Tumorblutgefäßen passieren. Anders als bei Doxil ist jedoch das Innere der Kügelchen so konstruiert, dass sie das Medikament kontrolliert freisetzen. Ihre Außenhülle enthält zwei zusätzliche Bestandteile: Polyethylenglykol als Tarnkappe gegenüber dem Immunsystem sowie Moleküle, die spezifisch an Oberflächenstrukturen von Tumorzellen binden (siehe Kasten übernächste Seite).

Unerwarteter Erfolg

Die ersten Ergebnisse einer klinischen Phase-I-Studie mit BIND-014 seien viel versprechend, meint Scott Minick. »Die Patienten in dieser Studie sind im Endstadium ihrer Krebserkrankung, und wir waren eigentlich nicht davon ausgegangen, bei ihnen eine nachweisbare Wirkung des Medikaments festzustellen.« Dennoch hätten sich die Tumoren bei zwei von siebzehn Patienten nach Gabe des Präparats verkleinert.

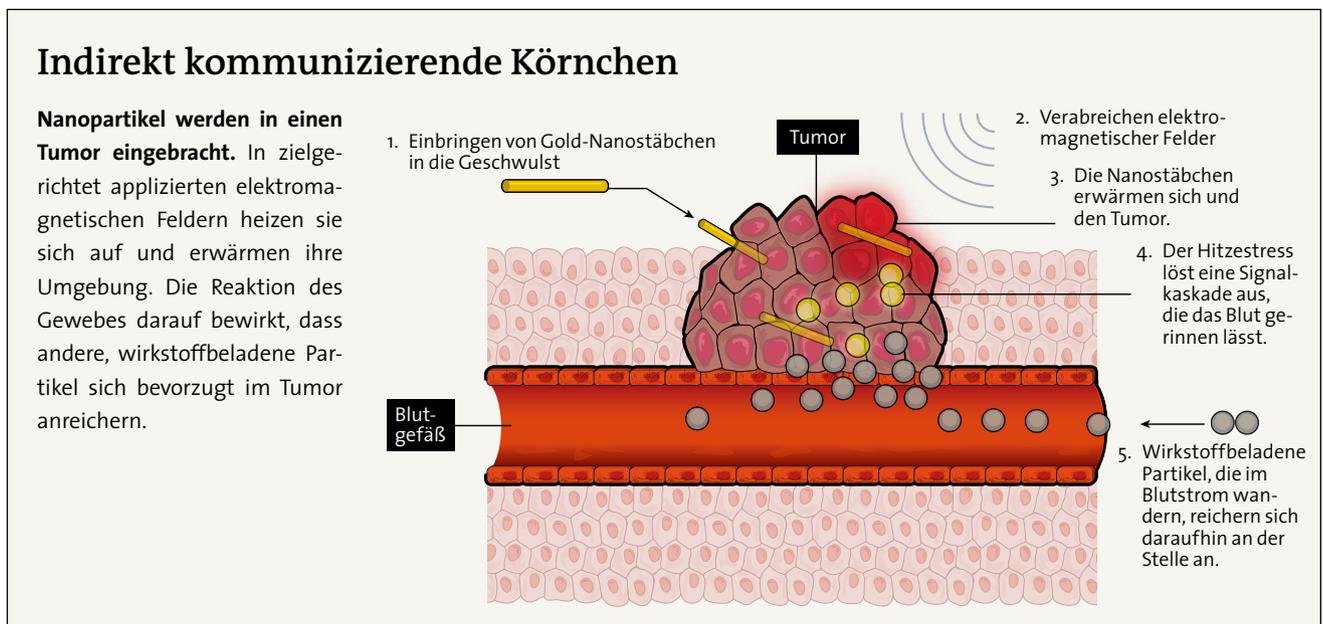
Nanomedikamente zu entwickeln, die Wände von Tumorblutgefäßen passieren können, ist nur einer von vielen Schritten beim Transport von Wirkstoff in die Geschwulst hinein. Obwohl sich ein Partikeldurchmesser von 100 Nanometern in vielerlei Hinsicht bewährt hat, ist dies keine optimale Größe. »Wenn ein so großes Teilchen den Blutstrom

verlässt, bleibt es schnell im umgebenden Gewebe stecken, dringt also kaum in den Tumor ein«, sagt Jeffrey Hubbell, Chemieingenieur an der Eidgenössischen Polytechnischen Hochschule in Lausanne, Schweiz. Kleinere Teilchen wären mobiler und böten speziell im Kampf gegen Bauchspeicheldrüsenkrebs und einige Brusttumoren einen Vorteil. Diese Geschwulste sind von einem widerstandsfähigen Netz aus Kollagenfasern durchzogen, das sich für Wirkstoffpartikel als schwer passierbar erweist.

Doch Polymernanopartikel mit verlässlichen Eigenschaften herzustellen, die deutlich kleiner sind als 100 Nanometer, ist schwierig. Kazunori Kataoka, Materialwissenschaftler an der Universität von Tokio, entwickelte den ersten Medikamententransporter auf Polymerbasis bereits Mitte der 1980er Jahre. Sein Unternehmen NanoCarrier in Kashiwa hat kürzlich ein Verfahren ausgearbeitet, um 30 Nanometer große Polymerpartikel herzustellen, die Cisplatin transportieren – ein sehr verbreitetes Mittel zur Hemmung der Zellteilung. Zurzeit durchläuft das Nanomedikament eine klinische Phase-II-Studie an Patienten mit Bauchspeicheldrüsenkrebs.

Cisplatin ist hochgiftig für die Nieren, weshalb die damit behandelten Patienten enorm viel trinken müssen. Kataoka zufolge ist das bei der nanoverkapselten Variante nicht nötig, weil sich die Partikel auf Grund ihrer geringen Größe im Tumor ansammeln statt in der Niere. »Das Nanomedikament hat in unseren klinischen Versuchen bereits viel versprechende Wirkungen gezeigt«, sagt er. In einer kleinen Phase-I-Studie habe es die mittlere Überlebenszeit der Patienten mehr als verdoppelt: von fünf auf über zwölf Monate.

Auch der Chemieingenieur DeSimone in North Carolina verfolgt ähnliche Ziele: Er sucht nach der optimalen Größe und Form, mit denen seine Nanopartikel möglichst tief in den Tumor eindringen können. »Wir möchten verstehen, wie Tumorzellen an Orte gelangen, wo sie nicht hingehören – und ihnen das nachmachen«, sagt er. Die neu entwi-



| Übersicht: Laufende klinische Studien zur Nanomedizin | | | | |
|---|----------------------|---|-------------------|--|
| Unternehmen | Therapeutikum | Zusammensetzung | Entwicklungsstand | Beschreibung |
| Calando Pharmaceuticals | CALAA-01 | Nanopartikel aus Polymeren, enthalten RNA-Fragmente, die Gene inaktivieren | Phase I | Die in den Partikeln enthaltene RNA legt in soliden Tumoren Gene still, welche für die Zellteilung benötigt werden. |
| BIND Biosciences | BIND-014 | Nanopartikel aus Polymeren, enthalten den Wirkstoff Docetaxel und binden spezifisch an Tumorzellen | Phase I | Die Wirkstoffträger koppeln an ein prostata-spezifisches Membranprotein und wirken damit sowohl gegen solide Prostatatumoren als auch deren Metastasen. |
| Nippon Kayaku | NK105 | Nanopartikel aus Polymeren, enthalten den Wirkstoff Paclitaxel | Phase III | Ermitteln des progressionsfreien Überlebens (Zeit ohne Fortschreiten der Erkrankung) nach Behandlung von Patientinnen mit metastasierendem oder wiederkehrendem Brustkrebs |
| NanoCarrier | Nanoplatin (NC-6004) | Nanopartikel aus Polymeren, enthalten den Wirkstoff Paclitaxel | Phase I / II | Kombinierte Gabe von Nanoplatin und Gemcitabin, um Patienten mit fortgeschrittenem oder metastasierendem Bauchspeicheldrüsenkrebs zu behandeln. Ziel: weniger Nierenschäden, verglichen mit einer reinen Gemcitabin-Therapie |
| Cerulean Pharma | CRLX101 | säureempfindliche Nanopartikel aus Polymeren, setzen den Wirkstoff Camptotecin im sauren Mikromilieu von Krebszellen frei | Phase II | In verschiedenen Studien wird geprüft, ob sich CRLX101 zur Behandlung des fortgeschrittenen, nichtkleinzelligen Bronchialkarzinoms beziehungsweise von Eierstockkrebs eignet. |

ckelten Medikamente müssten in der Lage sein, den Tumorzellen überallhin zu folgen.

DeSimone hat sich beim Herstellen seiner Nanopartikel von der Halbleiterindustrie inspirieren lassen, die Milliarden winziger Transistoren fertigt. Mit seiner eigenen patentierten Herstellungsmethode kann er gezielt jeweils eine einzige Eigenschaft der Nanopartikel verändern, etwa deren Steifigkeit, und anschließend untersuchen, wie sie durch den Körper wandern. So lässt sich etwa die Frage klären, ob weichere Nanopartikel besser ins Innere von Geschwulsten eindringen.

Erbanlagen ausschalten

Eine der meistversprechenden Anwendungen für nanoverkapselte Wirkstoffe ist das Abschalten (»Silencing«) von Genen. Dabei werden kleine RNA-Schnipsel verabreicht. Sie blockieren die Aktivitäten von Genen, die für das Tumorstadium wichtig sind, indem sie deren Boten-RNA abfangen; der Vorgang wird als RNA-Interferenz bezeichnet. Theoretisch können die Forscher RNA-Schnipsel herstellen, die jedes beliebige Gen ausschalten. Noch fehlen aber geeignete Transportvehikel zum Einbringen in den Organismus. Das hat die Entwicklung wirksamer RNA-Therapien bislang verzögert, erklärt William Hahn, Onkologe an der Harvard Medical School in Boston, Massachusetts. Nanopartikel könnten sich als geeignete Träger erweisen und so dem Gen-Silencing zum medizinischen Durchbruch verhelfen.

Nanometergroße Vehikel für therapeutische RNA-Stücke zu entwickeln, ist jedoch eine knifflige Angelegenheit. Diese müssen nämlich bis ins Innere der Krebszellen gelangen. Oft werden die Partikel bereits in der Leber aus dem Blutstrom gefiltert. Überwinden sie dieses Hindernis, wartet bereits das nächste auf sie: Sobald sie an die Oberfläche der Tumorzellen binden, stülpt sich die Zellmembran dort nach innen und bildet ein Endosom, ein Membranbläschen, dessen Inneres mittels Protonenpumpen stark angesäuert wird. In dem entstehenden Milieu zersetzen sich die meisten Verbindungen.

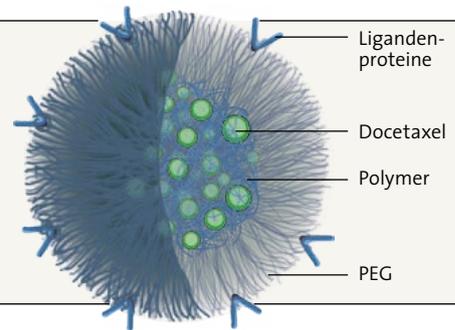
Die Forscher arbeiten an verschiedenen Tricks, um diese Todesfalle zu umgehen. Der Chemieingenieur Mark Davis vom California Institute of Technology (USA) hat Polymerpartikel entwickelt, die im Inneren der Endosomen positive Ladungen absorbieren. Dies erhöht den osmotischen Druck im Endosom und lässt es platzen, so dass die therapeutischen RNA-Schnipsel im Zellplasma ankommen, statt vorher abgebaut zu werden.

Herkömmliche Arzneistoffe entfalten ihre Wirkung oft, indem sie an Proteine binden und diese inaktivieren. Leider kodieren die meisten krebserlevanten Gene für Proteine, die mit den verfügbaren Methoden nicht angreifbar sind. Einige dieser Eiweißstoffe »verstecken« sich im Inneren der Tumorzellen, wo sie für therapeutische Antikörper unerreichbar bleiben. Andere bieten auf Grund ihrer äußeren Gestalt kaum pharmakologische Angriffspunkte. Die Nanotechnologie, sagt Davis, könnte helfen, diese Resistenzen zu durchbrechen. Mit geeigneten Trägerpartikeln für therapeutisch wirksame RNA-Fragmente wäre es nicht mehr erforderlich, die Proteine anzugreifen, da diese gar nicht mehr hergestellt würden. Zudem ließen sich Partikel mit unterschiedlicher RNA-Fracht applizieren, was mehrere krebserrelevante Gene gleichzeitig inaktivierte. »Damit würden wir den Tumor an mehreren Stellen simultan treffen und es ihm somit erschweren, eine Resistenz zu entwickeln«, erläutert Davis. Falls einige Krebszellen während der Therapie mutierten, könnten die Ärzte auf Partikel mit entsprechend angepasster RNA-Fracht umschwenken, so dass auch die neu veränderten Gene stillgelegt würden.

Manche Wissenschaftler wollen noch fantasievollere Therapieverfahren entwickeln, indem sie auf Methoden aus der Robotik und Computertechnik setzen. Ein Team um George Church von der Harvard University in Cambridge, Massachusetts, hat den Prototyp einer molekularen »Schließkassette« entwickelt, die mit Wirkstoff gefüllt ist. Sie besteht aus DNA und gibt ihren Inhalt frei, nachdem sie eine logische Operation ausgeführt hat, ähnlich jenen in der Digitaltech-

Ein Winzling als Arzneitransporter

Bei dem Nanomedikament **BIND-014** handelt es sich um Polymerpartikel, die den zellteilungshemmenden Wirkstoff Docetaxel transportieren und am Zielort freisetzen. Der Überzug aus Polyethylenglykol (PEG) schützt die Partikel vor Angriffen des Immunsystems. Ligandenproteine auf ihrer Oberfläche koppeln an Oberflächenstrukturen von Tumorzellen.



BOURZAC, K., GARRING DRUGS
IN NATURE, 491, S. 58-60, 2012, FIG. 3

nik. Church und seine Kollegen wählten das Erbmolekül als Baustoff, da es vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten bietet. Mit Hilfe einer Faltungstechnik, die als DNA-Origami bezeichnet wird, nimmt die DNA selbstständig eine fassähnliche Struktur an. Das entstehende Nanogefäß verfügt über molekulare »Schlösser« und »Angeln« und öffnet sich, sobald es mit den richtigen Schlüsseln in Kontakt kommt, etwa bestimmten Oberflächenmolekülen auf Krebszellen.

Church nennt sein Wirkstoffvehikel aus DNA einen Nanobot (verkürzt von Nanoroboter). Bekommt es zwei Eingangssignale präsentiert, nämlich zwei krebsspezifische Zelloberflächenmoleküle, generiert es das Ausgangssignal »Öffnen« und setzt den Wirkstoff frei. Kürzlich testete das Team entsprechende DNA-Zylinder, die einen Arzneistoff gegen Krebszellen enthielten. Diese Nanobots verfügten jeweils über zwei »Schlösser«; jedes davon wurde von einer bestimmten Proteinsorte auf der Oberfläche aggressiver Leukämiezellen aktiviert. Die Forscher zeigten, dass die Vehikel bei Kontakt mit Blutkrebszellen aufklappen und ihre Fracht entlassen, nicht jedoch bei Kontakt mit gesunden Zellen.

Zwei Schlösser bringen mehr Sicherheit als eins

Mit dem Einsatz logisch operierender Nanobots lösen die Wissenschaftler womöglich ein grundlegendes Problem der Krebstherapie: Die meisten zielgerichteten Therapien nehmen lediglich eine einzige Sorte von Zelloberflächenmolekülen ins Visier. Das birgt die Gefahr, auch gesunde Zellen zu schädigen, die das entsprechende Oberflächenmerkmal ebenfalls besitzen. Nanopartikel wie die von Church und seinem Team wirken selektiver, da sie von mehreren Zielstrukturen gleichzeitig aktiviert werden müssen, und könnten sich somit als deutlich schonender erweisen. Von der klinischen Anwendung sind sie jedoch noch weit entfernt; schon das Herstellen ausreichender Partikelmengen gestaltet sich schwierig.

Logische Operationen sind nicht das Einzige aus der Informationstechnologie, von dem sich Krebsmediziner inspirieren lassen. Die Biomediziningenieurin Sangeeta Bhatia vom Massachusetts Institute of Technology möchte Prinzipien aus der Natur und der Robotik nutzen, um »intelligente« Nanopartikel zu entwickeln, die im Schwarm nach Tumoren suchen. »90 Prozent der krebsbedingten Todesfälle gehen auf Metastasen zurück«, erläutert sie. Diese Tochtergeschwulste zu finden sei schwierig, besonders wenn sie noch klein sind. Bhatia und ihr Team arbeiten daher an therapeutischen Partikeln, die in der Lage sind, Metastasen aufzuspüren, und die

se Information an andere Partikel weitergeben, so dass jene sich am entsprechenden Ort ansammeln. Erste Experimente mit verschiedenen Partikelarten, die indirekt kommunizieren, ergaben eine überdurchschnittliche Wirkstoffanreicherung im Tumor (siehe Kasten auf S. 27).

Bhatia möchte diese Strategie ausweiten, in dem sie Gestaltungsprinzipien aus der Robotik nutzt. Wie Ameisen, die einzeln nur zu simplen Tätigkeiten in der Lage sind, in der Masse jedoch einen komplexen Ameisenhügel errichten, lassen sich auch Roboter so programmieren, dass sie gemeinsam eine kollektive Leistung erbringen. Mit Hilfe einfacher Regeln, etwa »halte den größtmöglichen Abstand zu all deinen Nachbarn«, ist es Robotikern gelungen, Minidrohnen wie Bienen im Schwarm fliegen zu lassen. Gelänge es, therapeutisch wirksame Nanopartikel auf ähnliche Weise zu dirigieren, ließe sich die Wirkstoffanreicherung im Tumor vielleicht noch weiter steigern.

Die Fähigkeiten der Forscher, Nanopartikel zu produzieren und an neue Anwendungen anzupassen, erweitern sich stetig, und damit die Möglichkeiten der Krebstherapie. Sie könnten eines Tages dazu beitragen, die Behandlung von Krebserkrankungen einerseits weniger belastend und andererseits wirksamer zu gestalten. ~

DIE AUTORIN

Katherine Bourzac ist Journalistin in San Francisco, Kalifornien.

QUELLEN

- Douglas, S. M. et al.:** A Logic-Gated Nanorobot for Targeted Transport of Molecular Payloads. In: *Science* 335, S. 831–834, 2012
Hrkach, J. et al.: Preclinical Development and Clinical Translation of a PSMA-Targeted Docetaxel Nanoparticle with a Differentiated Pharmacological Profile. In: *Science Translational Medicine* 4, 128ra39, 2012
Jain, R. K., Stylianopoulos, T.: Delivering Nanomedicine to Solid Tumors. In: *Nature Reviews Clinical Oncology* 7, S. 653–664, 2010
von Maltzahn, G. et al.: Nanoparticles that Communicate in vivo to Amplify Tumour Targeting. In: *Nature Materials* 10, S. 545–552, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1202112

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 491, S. 58–60, 22. Dezember 2012

Für Salma Hayek und für mehr als
6 Mio. Menschen in Deutschland ein Thema.

Und auch für mich.



**JETZT
AM KIOSK**

**SPEZIAL:
BESSER
SCHLAFEN**
Cleverer Helfer.
Neue Therapien.
Und wie die Zucker-
werte profitieren

**NEU: AUCH ALS
E-PAPER**



In FOCUS-DIABETES bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.
Jetzt aber raus! Fitness-Ideen von A bis Z. Mit dem E-Bike durchs Altmühltal.
Medizin und Forschung: Neue Medikamente – wem sie helfen, warum der Streit um die Kosten tobt.
Im Spezial: Wie Sie ruhig schlafen. **Ernährung und Genuss:** Heiß grillen, eiskalt genießen – so geht's!

FOCUS-DIABETES gibt es auch unter Tel. 0180 6 480 1006*, Fax 0180 6 480 1001*, www.focus-diabetes.de
*0,20 €/Anruf aus dem dt. Festnetz. Mobil max. 0,60 €/Anruf

Leben, wie ich will. Mit **DIABETES**
FOCUS

Und nun zur aktuellen Krebsvorhersage ...

Komplexe mathematische Modelle helfen Forschern zunehmend zu verstehen, wie sich Krebszellen und Tumoren evolutionär entwickeln. Damit liefern sie ihnen unter anderem neue Ansätze, Resistenzen gegen Chemotherapeutika zu überwinden.

Von Katharine Gammon

Nicht nur bei Lebewesen, auch bei Tumoren kann man von Evolution und ökologischen Bedingungen reden: Die Kräfte der Variation und Selektion, die auf Organismen in ihrer Umwelt einwirken, bestimmen ebenso die Entwicklung von Krebszellen in ihrem Inneren. »Viele Aspekte von Krebserkrankungen lassen sich mit der Evolutionstheorie erklären«, meint etwa Carlos Maley, Bioinformatiker und Evolutionsbiologe an der University of California in San Francisco. »Wenn wir in diesen Evolutionsprozess gezielt eingreifen, können wir ihn womöglich aufhalten oder in eine Richtung lenken, wo er leichter beherrschbar ist.« Zu diesem Zweck wildern nun zunehmend Mathematiker auf ureigensten Gebieten der Biologen und entwickeln immer aufwändigere, detailgetreue Modelle der Ökologie und Evolution von Tumoren.

Der wichtigste Grund für Rückschläge bei der Krebstherapie ist die Heterogenität der Zellen einer Geschwulst. Bei einer großen Population von sehr unterschiedlichen Krebszellen wird es immer einige geben, die eine Chemo-

therapie oder Bestrahlung überleben und die Erkrankung wiederaufflammen lassen. Daher erstellen Mathematiker Modelle, die berechnen sollen, in welche Richtung sich eine mutierende Tumorzelle entwickeln wird – in der Hoffnung, diese Evolution rechtzeitig aufzuhalten.

Mit Hilfe solcher Modelle können Forscher inzwischen das Verhalten einiger der gefährlichsten Tumoren vorhersagen. Bislang prognostizieren Ärzte etwa den Krankheitsverlauf beim malignen Gliom, einem aggressiven Hirntumor, auf Grundlage bildgebender Verfahren sowie der Untersuchung von Gewebeprobe. Doch die Einstufung nach diesem System stimmte vielfach nicht mit der tatsächlichen Bösartigkeit überein, die der Krebs dann zeigte. Daher entwickelten Wissenschaftler der University of Washington in Seattle und vom Moffitt Cancer Center in Tampa, Florida, ein mathematisches Modell, in das Zellteilungsrate, Invasionsneigung und Veränderungen der äußeren Erscheinung der Geschwülste einfließen. Das Modell verknüpfte dazu Daten aus Studien mit bildgebenden Verfahren mit anderen Simulationen, die das Wachstum von Blutgefäßen und die direkte Umgebung des Tumors berücksichtigen. Damit war es nicht nur in der Lage, das Wachstumsmuster der Wucherung bei jedem Patienten individuell nachzuvollziehen, sondern auch ihre weitere Entwicklung zuverlässig vorherzusagen, womit sich das bisherige Einstufungssystem verbessern ließ.

Solche Simulationen beginnen sich auf die klinische Praxis auszuwirken. Alexander Anderson, ein Spezialist für mathematische und Computermodelle am Moffitt Center, der an der Studie zum malignen Gliom mitarbeitete, nutzt das Modell dazu herauszufinden, wie sich Tumoren bewegen und ausbreiten. Seine Arbeitsgruppe entwickelte Computermodelle, die sich auf die Veränderungen einzelner Krebszellen konzentrieren. Dazu griffen die Forscher auf klinische Daten von 650 Prostatakrebspatienten zurück: Sie unter-

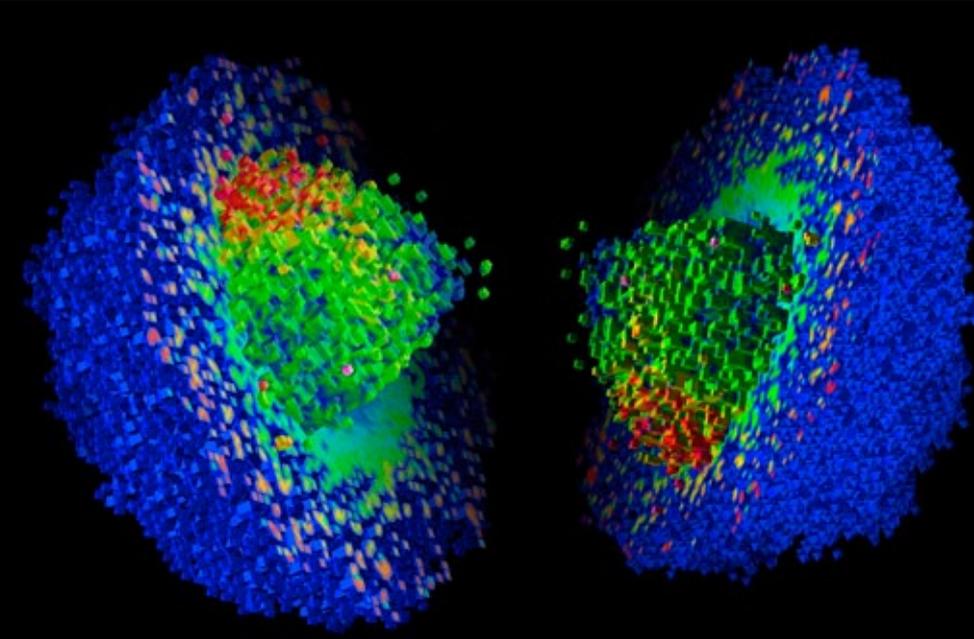
AUF EINEN BLICK

KREBS IM COMPUTER

1 **Mathematiker** revolutionieren das Verständnis von Tumorerkrankungen: Ihre **Modelle** stellen grundlegende Vorstellungen zu den Krankheitsprozessen bei Krebs sowie zu den optimalen Therapien in Frage.

2 Die Simulationen helfen unter anderem, klinische Studien drastisch zu beschleunigen, und ermöglichen ein besseres Verständnis der **biologischen Evolution** von Tumorzellen und ihrer Anpassung an die Bedingungen ihrer jeweiligen Umgebung.

3 Damit lässt sich unter anderem die Entwicklung eines Krebses vorhersehen und sogar in gewünschte, **leichter therapierbare Richtungen** beeinflussen.



Das Innere eines Tumors lässt sich schon heute per Computer visualisieren.

suchten Dünnschnittschnitte jedes Tumors auf die Anwesenheit von 250 charakteristischen Molekülen hin – so genannten Markern. Aus den gewonnenen Daten baute Anderson dann ein Modell und erstellte damit digitale Versionen jeder einzelnen Biopsie. Wenn sein Team das Modellszenario zeitlich und räumlich weiterlaufen lässt, erhält es einen Erwartungswert zur Aggressivität des Tumors.

Besonders gezielt wirkende Tumorthérapien erhöhen die Gefahr von Resistenzen

Die Gefährlichkeit der individuellen Geschwulst zuverlässig einschätzen zu können, ist gerade beim Prostatakarzinom wertvoll, denn viele dieser Tumoren werden unnötigerweise chirurgisch entfernt oder mit zu drastischen Mitteln therapiert. Um die Vorhersagefähigkeit des Modells zu ermitteln, testet Andersons Team es nun zusammen mit einem Biologen an Mäusen. Falls es sich hier bewährt, wäre es das erste Computermodell, das die Aggressivität eines Tumors vor Beginn der Therapie prognostizieren kann. Damit würde es Krebsmedizinern eine willkommene Hilfestellung bei der Auswahl der geeignetsten Therapie geben.

Daneben beeinflussen mathematische Modelle auch, wie manche Wissenschaftler über alternative Ansätze der Krebstherapie nachdenken. Denn aus den neuen Erkenntnissen zur Tumorevolution zogen manche Forscher einen auf den ersten Blick überraschenden Schluss: Bei den meisten Krebserkrankungen können die aktuellen »gezielten« Therapien gar nicht funktionieren. Wenn Wirkstoffe zum Einsatz kommen, die an ganz spezifischen mutierten Proteinen ansetzen, erläutert Anderson, »müssen dem Modell zufolge unvermeidlich Resistenzen auftreten, weil es auch andere Wege gibt, die zu denselben Merkmalen führen«. Zellen, welche die erste Therapie überleben, können sich so weiterentwickeln, dass sie am Ende genauso bösartig sind wie zuvor, jetzt aber

unempfindlich gegen den eingesetzten Wirkstoff. Die Erkenntnisse zur evolutionären Dynamik von Tumoren legen nahe: Der Versuch, einen Krebs vollständig abzutöten, fördert zwangsläufig Therapieresistenzen, was wiederum die Überlebenschancen des Patienten reduziert. Die Computermodelle zeigen, dass es bessere Behandlungsstrategien geben könnte.

Einige Forscher möchten etwa die Programmierung der Krebszellen verändern und gegen diese selbst wenden. Robert Gatenby, Onkologe am Moffitt Cancer Center, sucht nach grundlegenden Prinzipien, die sich in dem Sinn therapeutisch nutzen lassen. Eine Möglichkeit, Angriffe auf Tumorzellen zu erleichtern, besteht darin, diese einander ähnlicher zu machen. Je mehr sich die Zellen in ihren Merkmalen gleichen, umso höher ist die Chance, dass die Behandlung anschlägt, und umso geringer das Risiko, dass sie therapieresistent werden. Kurz gesagt sucht Gatenby nach Tricks, die eine Entwicklung von Resistenzen verhindern. Mathematische Modelle ermöglichen es ihm und anderen Forschern, die richtigen Kombinationen von Wirkstoffen zu finden sowie die beste zeitliche Abfolge der Verabreichung, um das Risiko einer Resistenzbildung zu minimieren.

In einer an Mäusen durchgeführten Studie zum so genannten tripelnegativen Brustkrebs legten die Forscher anhand von Computermodellen fest, wann sie welche Medikamente in welcher Reihenfolge einsetzen. Bei dieser schwer therapierbaren Tumorart fehlen den Zellen drei Rezeptortypen, und zwar solche für Östrogen, Progesteron sowie den Epidermiswachstumsfaktor. Die Ergebnisse der Studie legen nahe: Verabreicht man den Tieren Östrogen, beginnt sich der Krebs an eine Umgebung mit hoher Östrogenkonzentration anzupassen und entsprechende Rezeptoren auszubilden. Durch diese zielgerichtete Beeinflussung der Tumorevolution wird der Krebs von Östrogen abhängig und so beispiels-

weise mit dem bewährten Medikament Tamoxifen, einem Antiöstrogen, behandelbar.

Die Therapie einer Krebserkrankung wäre wesentlich einfacher, wenn die Onkologen genau vorhersagen könnten, wie diese auf bestimmte Medikamente anspricht. Nach wie vor müssen die Ärzte einen andauernden Kampf gegen einen sich fortlaufend weiterentwickelnden Feind führen, so Gatenby. Doch er sieht einen Ausweg: »Wir müssen die gesamte Vorgehensweise wie bei einem Schachspiel strategisch vorausplanen und mit der ersten Behandlung eine evolutionäre Reaktion der Krebszellen provozieren, wogegen die zweite Therapie wirkt.«

Evolutionäre Schachzüge

Gatenbys Team nutzt ein spieltheoretisches Modell, in dem jede Therapie ein Spielzug ist, der die wahrscheinlichste Reaktion des Tumors vorwegnimmt. Es zeigt, dass sich die Geschwülste zwar an die jeweilige Situation adaptieren, aber nicht zu vorausschauenden Anpassungen in der Lage sind. Das gibt den Onkologen einen entscheidenden Trumpf in die Hand: Sie können die Umwelt des Tumors so manipulieren, dass er sich leichter bekämpfen lässt. Das Computermodell ermöglicht den Forschern, Therapien zu vermeiden, die zu mehr Resistenzen führen würden, und grenzt damit die Auswahl der Medikamente, Dosierungen und Behandlungsintervalle auf die erfolgversprechendsten ein.

Das spieltheoretische Modell trug auch dazu bei, die Ergebnisse einer kürzlich durchgeführten klinischen Studie an Patienten mit aggressivem Lungenkrebs zu erklären, die wegen eines Rückfalls mit einer herkömmlichen Chemotherapie und zusätzlich mit einem Impfstoff gegen das Tumorsuppressorprotein p53 behandelt wurden. Diese überlebten etwa vier Monate länger als solche, die nur die Chemotherapie ohne Impfung erhielten. Der Anteil der Patienten, die mehr als ein Jahr überlebten, verdoppelte sich sogar. »Der Tumor reagierte zwar evolutionär erfolgreich auf die eine Therapie, doch diese Anpassung machte ihn empfindlicher gegen die andere Behandlung«, erläutert Gatenby. Diese Strategie bezeichnet man als evolutionäre Zwickmühle. »Wir behaupten nicht, dass sich das Spiel ewig weitertreiben lässt, doch wenn wir mit solchen Schachzügen die Überlebenszeit der Patienten um fünf oder zehn Jahre verlängern könnten, so wäre dies schon ein enormer Fortschritt.«

Die mathematische Modellierung hilft zudem, die klinische Erprobung von Medikamenten zu beschleunigen. Sämtliche verfügbaren Wirkstoffe in allen denkbaren Kombinationen, Dosierungsvarianten und Reihenfolgen zu prüfen, würde Millionen verschiedener Studien erfordern. So viele Probanden und Geldmittel stehen gar nicht zur Verfügung. Stattdessen verwenden die Forscher Simulationen, mit denen sie die gleichen Informationen aus lediglich einer Hand voll Experimenten gewinnen. Solche Modelle berechnen die Mutationsrate und das Risiko einer Resistenzbildung und schätzen sogar die Wahrscheinlichkeit des Ansprechens individueller Tumoren auf eine Therapie ab.

Franziska Michor, Biostatistikerin an der Harvard School of Public Health in Boston, Massachusetts, hat ein Modell erstellt, das optimale Dosierungen für die Therapie von Lungenkarzinomen berechnet. Sie berücksichtigte dafür die Vermehrungs- und Absterberaten verschiedener Zelltypen, ihre Mutationsneigung sowie die Geschwindigkeit, mit der das Medikament abgebaut wird. Ihr Computermodell bestimmt daraus die Wahrscheinlichkeit der Resistenzbildung für verschiedene Dosierungsstrategien. »Letztlich werden wir die Daten durch Experimente mit Mäusen und Untersuchungen mit Patienten überprüfen müssen, doch die Pilotstudien können wir am Computer durchführen«, erläutert Michor. Das Modell kann alle denkbaren Kombinationen in wenigen Sekunden prüfen. »Das ist der große Vorteil der Mathematik«, sagt sie. »Eine Reihe klinischer Studien dauert eine Ewigkeit, auf dem Computer geht alles sehr schnell.«

Noch in diesem Jahr führt das Memorial Sloan-Kettering Cancer Center in New York die erste klinische Studie durch, die auf Michors Modellrechnungen fußt. Die Forscher prüfen dabei Dosierungskombinationen, die laut Simulation am besten geeignet sind, eine Resistenzbildung beim »nicht-kleinzelligen Bronchialkarzinom« zu vermeiden oder zumindest hinauszuzögern. Diese Form des Lungenkrebses kann man in manchen Fällen zunächst mit so genannten EGFR-Tyrosinkinasehemmern gut behandeln; jedoch nimmt die Wirksamkeit meist etwa ein Jahr nach Beginn der Therapie dramatisch ab. Laut Michors Modell lässt sich die Resistenzbildung mit Hilfe eines optimierten Dosierungsschemas immerhin um ein weiteres Jahr verschieben. ~

DIE AUTORIN



Katharine Gammon ist freie Wissenschaftsjournalistin in Santa Monica, Kalifornien.

QUELLEN

Basanta, D. et al.: Exploiting Evolution to Treat Drug Resistance: Combination Therapy and the Double Bind. In: *Molecular Pharmacology* 9, S. 914–921, 2012

Chmielecki, J. et al.: Optimization of Dosing for EGFR-Mutant Non-Small Cell Lung Cancer with Evolutionary Cancer Modeling. In: *Science Translational Medicine* 3, 90ra59, 2011

Swanson, K.R. et al.: Quantifying the Role of Angiogenesis in Malignant Progression of Gliomas: In Silico Modeling Integrates Imaging and Histology. In: *Cancer Research* 71, S. 7366–7375, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201689

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 491, S. 66–67, 22. November 2012



Anita Goel, Nanobiosym

Mark Pagel, University of Reading

Jules A. Hoffmann, University of Strasbourg

Wolfgang Marquardt, German Council of Science and Humanities, Chairman of the Lab July 2013

Eva Illouz, Hebrew University Jerusalem

Sophia Vinogradov, University of California, San Francisco

Michael M. Resch, High Performance Computing Center Stuttgart

Luc Steels, Pompeu Fabra University

Robert P. Kirshner, Harvard University

Stephen Friend, Sage Bionetworks

Helga Nowotny, European Research Council

Elvira Fortunato, University of Lisbon

Jagdish N. Bhagwati, Columbia University

WHICH ARE THE NEXT WALLS TO FALL?

Johanna Wanka, German Ministry of Education and Research

Rolf-Dieter Heuer, Cern

Jürgen Mlynek, Helmholtz Association

Jill Farrant, University of Cape Town

>>I loved the Lab and the Conference.

The Lab is a unique opportunity, the conference truly inspiring!«

Participant 2012, University of Oxford

FALLING WALLS YOUNG INNOVATOR OF THE YEAR

APPLY NOW!

BERLIN 8/9 NOV 2013

SHARE YOUR IDEAS WITH FELLOW YOUNG SCIENTISTS AND PROFESSIONALS AND ATTEND THE "MOST EXCEPTIONAL SCIENCE CONFERENCE IN THE WORLD"!

THE FALLING WALLS LAB, 8 NOVEMBER

- Present your work to fellow scholars, scientists and professionals – in 3 minutes.
- Convince a top-class jury of your ideas.
- Exchange insights on an interdisciplinary level.
- Get involved in exciting discussions and network with brilliant scientists and professionals from academia, research institutions and business.

Who can apply

We are looking for outstanding young talents and innovators: Master students, PhD candidates, post-docs, scientists, young professionals or entrepreneurs up to 35 years.

Your Breakthrough

- Share your research work or business idea. Showcase your ideas that are relevant to society, the environment and the world.
- You have 3 minutes for your presentation.
- All disciplines are welcome.

Programme

The Lab Berlin gathers 100 outstanding minds on **8 November 2013**. It starts at 10am and ends with the Award Ceremony and the Welcome Reception of the Falling Walls Conference.

Application & Deadline

Apply here: www.falling-walls.com/lab
Application deadline: **22 September 2013**

THE FALLING WALLS CONFERENCE, 9 NOVEMBER

- Each year on 9 November, 20 internationally renowned researchers from all disciplines showcase the breakthroughs they are working on in 15-minute talks. They answer the question: Which walls will fall next and how will this affect our lives? Among the speakers are Nobel laureates, artists, heads of states and governments.
- The conference is a place of high-level exchange between science, business and other sectors of society with visitors from over 80 nations.

Scholarship & Winners

- The 3 most intriguing presenters win cash prizes and speak at the Fallings Walls Conference on the next day – side by side with some of the most prominent researchers worldwide.
- An A.T. Kearney Scholarship will be granted to all participants, covering accommodation from 8 to 9 November and the ticket for the Falling Walls Conference on 9 November. Please note that travel expenses cannot be reimbursed.

FALLING WALLS LAB2013

IN COOPERATION WITH
ATKearney
Founding Partner

KWS
Global Partner

APPLY NOW: www.falling-walls.com/lab
QUESTIONS? Send us an e-mail to lab@falling-walls.com
TWEET ABOUT THE LAB: #FWLab

FALLING WALLS

Wie Pflanzen Wasser spalten

In einem frühen Schritt der pflanzlichen Fotosynthese wird Wasser in seine elementaren Bestandteile zerlegt. Wie das genau geschieht, zeigen nun spektroskopische Experimente sowie eine neue Strukturanalyse des dafür zuständigen Proteins. Die Erkenntnisse könnten helfen, Solarsysteme zu entwickeln, die den natürlichen Vorgang nachahmen.

Von Wolfgang Lubitz und Nicholas Cox

Das enorme Wirtschaftswachstum in den letzten 100 Jahren und unser heutiger Wohlstand beruhen hauptsächlich auf der Erschließung und Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Doch diese wertvollen Ressourcen gehen langsam zur Neige. Zudem setzt ihre ungehemmte Nutzung gewaltige Mengen an Treibhausgasen frei. Die Folge ist eine globale Erwärmung, die große Probleme für das Klima, die Umwelt und das Leben auf der Erde mit sich bringt.

Erneuerbare Energiequellen zu erschließen, gehört daher zu den wichtigsten Anliegen moderner Forschung und Technologie. An vorderster Stelle steht dabei die Nutzung des Sonnenlichts. Liefesse es sich dazu verwenden, Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten, wären all unsere Energieprobleme auf einen Schlag gelöst. Bisher existiert allerdings kein chemisches Verfahren, das die Anforderungen an Wirkungsgrad, Umsatzraten, Stabilität, Skalierbarkeit, Verfügbarkeit der chemischen Grundstoffe und letztlich Kosten erfüllt.

AUF EINEN BLICK

FOTOSYSTEM II ENTSCHLÜSSELT

- Ein einzigartiger Metallkomplex, aufgebaut aus Mangan, Kalzium und Sauerstoff, ist der Kernbestandteil jenes pflanzlichen Enzyms, das einen zentralen Schritt der Fotosynthese ausführt: die **lichtgetriebene Oxidation** von Wasser zu Sauerstoff.
- Die genaue **dreidimensionale Struktur** dieses Metallkomplexes konnte kürzlich ermittelt werden. Zusammen mit den Resultaten neuer spektroskopischer und theoretischer Untersuchungen gibt sie detailliert Aufschluss über den Mechanismus des Vorgangs.
- Insbesondere wird deutlich, wie zwei Wassermoleküle zu unterschiedlichen Zeiten an verschiedenen Stellen des Komplexes gebunden und ihre beiden Sauerstoffatome schließlich zu **molekularem Sauerstoff** verknüpft werden.
- Daraus ergeben sich wertvolle Erkenntnisse für technische Systeme, welche die Fotosynthese künstlich nachahmen – mit dem Ziel, aus Sonnenlicht und Wasser **regenerative Energieträger** zu gewinnen.

Die Natur dagegen praktiziert die Wasserspaltung mittels Licht schon seit Jahrmilliarden. Diese stellt einen der elementaren Schritte der Sauerstoff bildenden (oxygenen) Fotosynthese dar, mit der Pflanzen organisches Material aufbauen. Zwar ist ihr grundlegender Ablauf schon seit Langem bekannt, doch wurden wichtige Details erst jüngst geklärt. Diese neuen Erkenntnisse haben auch Bedeutung für die technische Realisierung einer künstlichen Fotosynthese.

Bedeutung der Fotosynthese

Die natürliche Fotosynthese hat sich schon vor etwa 2,5 Milliarden Jahren entwickelt. Ihr verdankt das irdische Leben in der heutigen Form letztlich seine Existenz und seine erstaunliche Vielfalt. Fast alle Lebensgemeinschaften basieren direkt oder indirekt auf diesem Vorgang, der aus den einfachen Grundstoffen Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) organische Materie aufbaut. Chemisch gesehen, handelt es sich um einen so genannten Redoxprozess. Die Umwandlung von Kohlendioxid in Zucker entspricht einer Reduktion. Die dafür benötigten Elektronen entzieht das Fotosystem der Pflanzen, Algen und einiger Bakteriengruppen (Zyanobakterien) dem auf der Erde reichlich vorhandenen Wasser, das dabei oxidiert wird. Als Abfallprodukt entsteht molekularer Sauerstoff (O_2), der in die Atmosphäre entweicht und sich dort angereichert hat.

Die durch Sonnenlicht angetriebene katalytische Spaltung von Wasser zählt zu den faszinierendsten Vorgängen in der belebten Natur. Allerdings entsteht dabei nicht direkt Wasserstoff, sondern sein Äquivalent in Form von Protonen und gebundenen Elektronen. Sie dienen in einer komplizierten Reaktionskette, dem so genannten Calvin-Zyklus, letztlich zur Umwandlung von Kohlendioxid in Kohlenhydrate (Zuckerverbindungen). Im Endeffekt wird Sonnenenergie also in chemischen Verbindungen gespeichert. Diese können die enthaltene Energie bei der Umsetzung mit Sauerstoff – durch Verbrennung – wieder freisetzen. Die Fotosynthese ist aber nicht nur die bei Weitem wichtigste Nahrungsquelle auf der Erde und die Lebensgrundlage aller atmenden höheren Lebe-

wesen, sondern hat über Hunderte von Jahrmillionen auch all jene fossilen Energieträger wie Erdöl, Kohle und Erdgas erzeugt, die wir in großem Umfang als Brennstoff und Rohmaterial für die chemische Synthese in der Industrie nutzen.

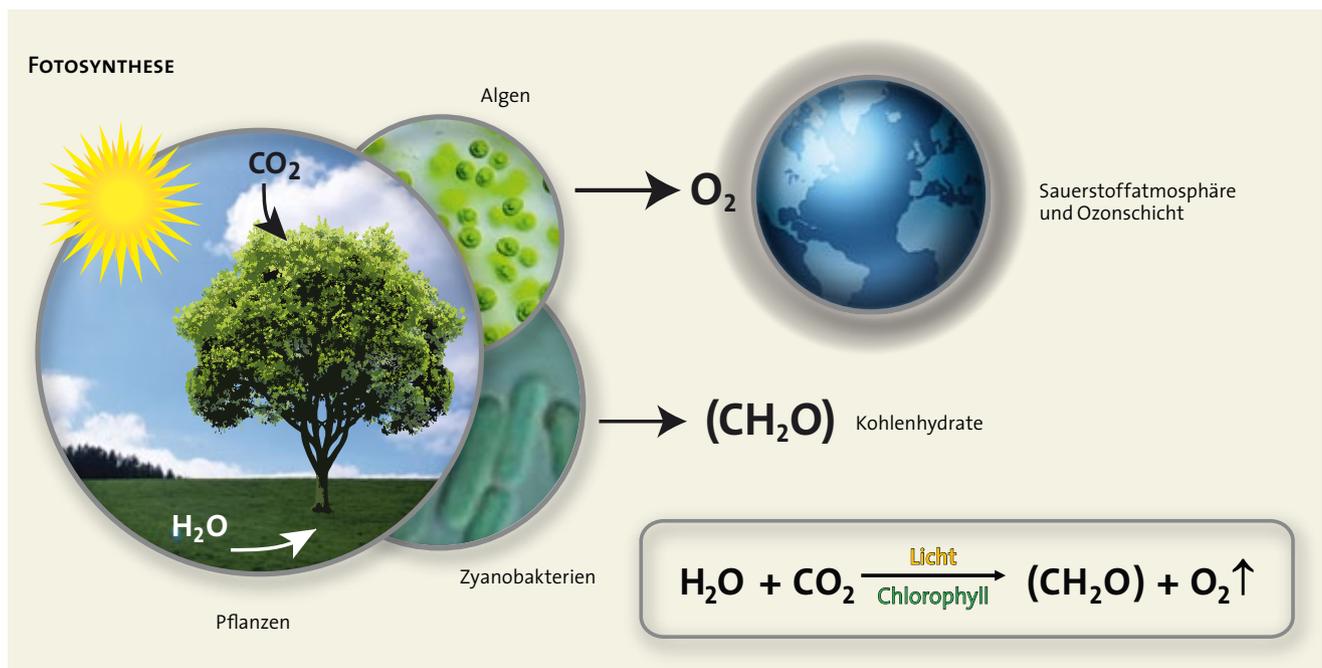
Entwickelt haben den Vorgang die Zyanobakterien vor rund 2,5 Milliarden Jahren. Dadurch kam es damals zu einer Umweltkatastrophe globalen Ausmaßes; denn der freigesetzte, aggressive Sauerstoff ließ die meisten bis dahin existierenden niederen Organismen absterben. Diese hatten sich in der reduzierenden Uratmosphäre auf unserem Planeten entwickelt und trieben ihren Stoffwechsel zum Beispiel mit Wasserstoff (H₂) an. Doch die Katastrophe wirkte sich langfristig positiv aus; denn der Sauerstoff in der Atmosphäre schuf die Grundlage für die Evolution höherer Lebensfor-

men bis hin zum Menschen, denen er zur kontrollierten Verbrennung der Nahrung im Zuge der Atmung dient und so eine hocheffiziente Energieversorgung ermöglicht.

Seine Freisetzung in die Atmosphäre hatte eine weitere segensreiche Wirkung. Sie führte zur Bildung der Ozonschicht in der Stratosphäre, die als Schutzschild rings um die Erde die zerstörerische ultraviolette Strahlung aus dem Weltall abschwächt. Nur so konnte das Leben auf unserem Planeten ungestört gedeihen.

Zweifellos ist die Fotosynthese daher eine der bedeutendsten Errungenschaften für das Ökosystem Erde. Ihr grundlegendes Verständnis kann uns darüber hinaus Wege weisen, auf effiziente Art Sonnenenergie in Form chemischer Verbindungen zu speichern.

Die Fotosynthese ist für das Leben auf der Erde und speziell den Menschen von enormer Bedeutung. Durch den Aufbau von Kohlenhydraten aus Wasser und Kohlendioxid mit Hilfe des Sonnenlichts bildet sie letztendlich die Quelle aller Nahrung und liefert wertvolle Rohstoffe. Außerdem hat sie die fossilen Energieträger geschaffen und die Erdatmosphäre mit dem lebenswichtigen Sauerstoff angereichert. Dadurch ist auch die Ozonschicht entstanden, die uns vor schädlicher ultravioletter Strahlung schützt.

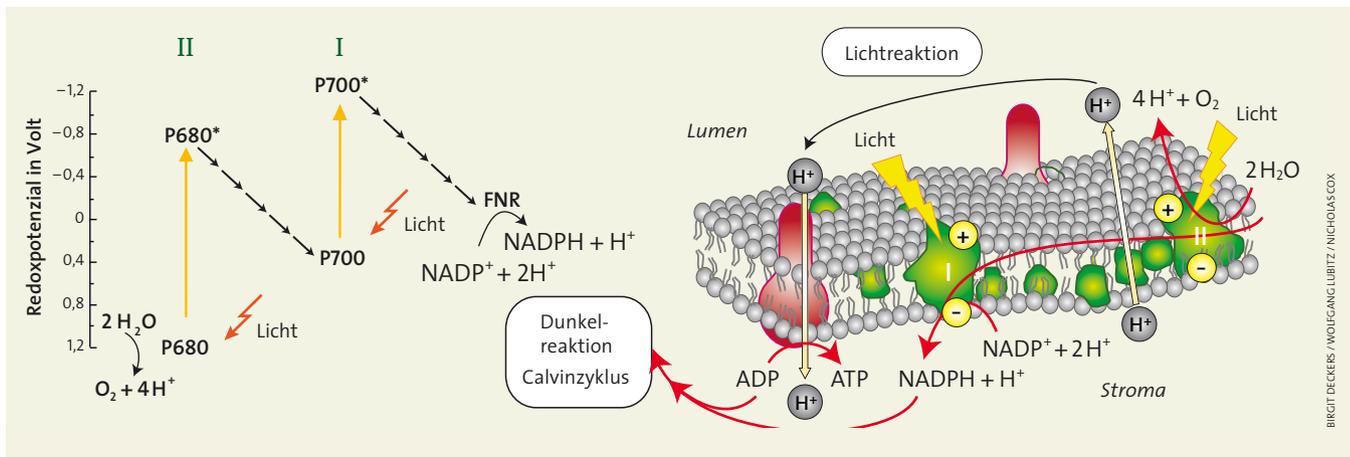


FOSSILE ENERGIETRÄGER



NAHUNGSMITTEL UND NACHWACHSENDE ROHSTOFFE





Zyanobakterien, Algen und höhere Pflanzen, die oxygene Fotosynthese betreiben, nutzen dazu ein spezielles Membransystem: die so genannte Thylakoidmembran (Bild oben). In höheren Organismen (Eukaryoten) befindet sich diese im Innern spezieller Zellstrukturen (Organellen) – der Chloroplasten – und enthält zwei in Serie geschaltete Ladungsgeneratoren. Diese werden durch elektromagnetische Strahlung leicht unterschiedlicher Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich angetrieben und als Fotosystem I und II bezeichnet. Zwei solche Systeme sind notwendig, um genügend Energie für die angekoppelten chemischen Reaktionen bereitzustellen.

Die dreidimensionalen Strukturen dieser beiden großen, in der Membran verankerten Pigment-Protein-Komplexe sind heute weit gehend bekannt. Die Berliner Forschergruppen um den 2007 verstorbenen Horst Tobias Witt (Technische Universität) und Wolfram Saenger (Freie Universität) konnten sie in bahnbrechenden Untersuchungen schon vor mehr als zehn Jahren in den Grundzügen aufklären. Den beiden Teams war es damals in enger Zusammenarbeit gelungen, die ausgedehnten Proteinkomplexe der beiden Fotosysteme in natürlichem Zustand zu kristallisieren und dann einer Röntgenstrukturanalyse zu unterziehen.

Wie sich zeigte, sind die Strukturen in allen Organismen sehr ähnlich. Das stützt die Vermutung, dass sich ein Vorläufer der heutigen Zyanobakterien vor Milliarden von Jahren in eukaryotische Zellen einnistete. Aus ihm gingen schließlich die Chloroplasten hervor, in denen heute die oxygene Fotosynthese stattfindet.

Das Fotosystem II entzieht dem Wasser nach Lichtenregung Elektronen, die über mehrere Zwischenstationen zum Fotosystem I gelangen. Dieses nutzt sie nach einer weiteren Lichtenregung schließlich dazu, das Redox-Koenzym Nicotinamiddinukleotidphosphat in die reduzierte Form NADPH zu überführen. Gleichzeitig sammeln sich positiv geladene Wasserstoffionen (H^+) von der Wasserspaltung auf der Innenseite der Thylakoidmembran im so genannten Lumen an.

Dadurch entsteht ein Protonengradient über die Membran hinweg. Dieses Konzentrationsgefälle nutzt das Enzym ATPase. Indem es Wasserstoffionen zur Außenseite (ins Stroma) schleust, verwendet es die im Gradienten gespeicherte

Energie zur Synthese von Adenosintriphosphat (ATP), dem zentralen biologischen Energieträger. ATP ist ebenso wie NADPH notwendig für die Umwandlung von Kohlendioxid in Kohlenhydrate, die in der anschließenden »Dunkelreaktion« der Fotosynthese stattfindet.

Aufbau des Fotosystems II

Vor zwei Jahren hat ein Forscherteam um Jian-Ren Shen und Nobuo Kamiya von den Universitäten Okayama und Osaka City in Japan eine neue Röntgenstrukturanalyse des Fotosystems II aus dem Zyanobakterium *Thermosynechococcus vulcanus* publiziert. Dank ihrer ausgezeichneten Qualität und hohen Auflösung erlaubt sie tiefere Einblicke in den genauen Ablauf der Wasserspaltung, die auch für technische Systeme interessant sind.

Das Fotosystem II der Zyanobakterien ist ein äußerst komplexes Protein. Es besteht aus etwa 20 Untereinheiten und enthält eine große Zahl so genannter Kofaktoren, die für seine Funktion unerlässlich sind (Bild unten rechts). Dazu gehören insbesondere 35 Moleküle des grünen Pflanzen-

Das links gezeigte Modell des Fotosystems II von Zyanobakterien beruht auf dem Ergebnis einer Röntgenstrukturanalyse. Die Proteinuntereinheiten D1 und D2 tragen das redoxaktive Tyrosin Y_2 , den Mangan-Kalzium-Cluster ($\text{Mn}_4\text{O}_5\text{Ca}$), den aus vier Chlorophyllmolekülen bestehenden Pigmentkomplex P680, zwei Phäophytine (Pheo), zwei Plastochinone (Q_A , Q_B), ein Fe^{2+} -Ion und zwei β -Carotine (Car). Rechts ist schematisch die Wasserspaltung dargestellt. Sie findet am Mangan-Kalzium-Cluster statt, von dem Kanäle für Wasser, molekularen Sauerstoff und Protonen nach außen führen. Die Elektronen gelangen vom P680 über eines der beiden Phäophytine und das Plastochinon Q_A zum Q_B (Pfeile) und reduzieren es zum Plastohydrochinon, das sie anschließend in Richtung Fotosystem I transportiert.

Die fotosynthetisierende Thylakoidmembran enthält die Photosysteme I und II, in denen Sonnenlicht die Pigmentsysteme P 700 beziehungsweise P 680 anregt. Diese geben daraufhin Elektronen ab, mit denen das Enzym FNR (Ferredoxin-NADP-Reduktase) NADP zu NADPH reduziert. Die zurückbleibenden positiven Ladungen dienen im Photosystem II zur Spaltung von Wasser in Protonen (H⁺) und molekularen Sauerstoff (O₂), der entweicht. Den resultierenden Protonengradienten über die Membran hinweg nutzt das Enzym ATPase (rot) zur Synthese des zellulären Energieträgers ATP aus ADP. Mit Hilfe von NADPH und ATP wird in der Dunkelreaktion Kohlendioxid (CO₂) in Kohlenhydrate umgewandelt.

farbstoffs Chlorophyll. Diese dienen je nach Umgebung und Bindungsart im Protein als »Antennen«, die Lichtquanten absorbieren, oder als Relaisstationen, die Anregungsenergie transportieren. Einige sind aber auch an der Trennung und dem Transport von Ladungen beteiligt.

Zu den Kofaktoren gehören außerdem elf β-Carotin-Moleküle. Sie helfen als Zusatzpigmente beim Lichteinfang mit, schützen aber auch das Chlorophyll vor Zerstörung durch bestimmte aggressive Sauerstoffspezies. Hinzu kommen zwei Phäophytin- und zwei über ein Eisenion verbrückte Plastochinonmoleküle (Q_A und Q_B); das erste davon ist fest gebunden, das zweite kann sich nach der Reduktion zum Plastohydrochinon vom Protein lösen. Ferner trägt das Photosystem II den Wasser oxidierenden Komplex, der vier Manganatome und ein Kalziumatom (Mn₄Ca) enthält.

Alle Kofaktoren, die an der Ladungstrennung und Wasserspaltung mitwirken, befinden sich in den zwei zentralen Proteinuntereinheiten D1 und D2. Diese bilden das so genannte Reaktionszentrum des Photosystems II. Doch auch die übrigen Untereinheiten sind notwendig, damit die fotosyntheti-

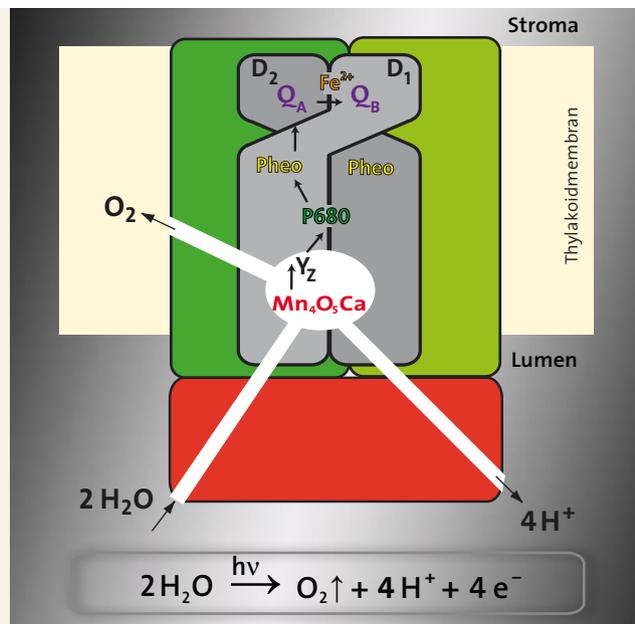
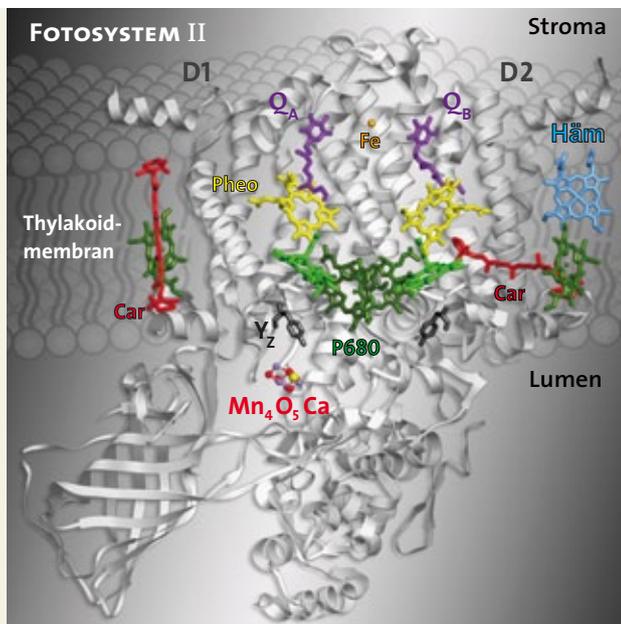
sche Wasseroxidation stattfinden kann. Unter anderem tragen sie dazu bei, die hochgradig optimierte Bindungstasche für den Mn₄Ca-Komplex sowie spezifische Kanäle für den effizienten Transport von Wasser und Sauerstoff zu bilden. Außerdem sind sie an der Übertragung der Elektronen auf das Photosystem I und am Transfer von Protonen beteiligt.

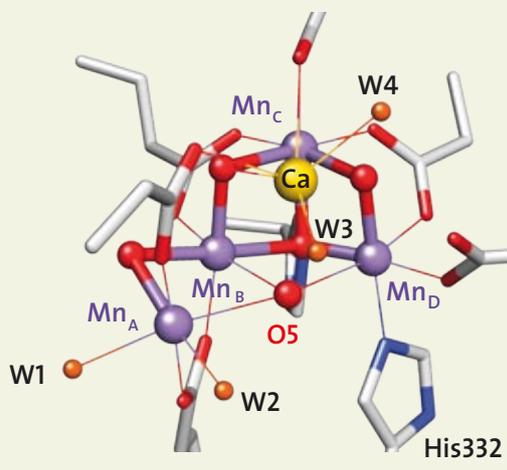
Die Reaktionsabläufe im Photosystem II lassen sich in vier Schritte unterteilen:

- 1 Antennen- beziehungsweise Lichtsammelpigmente fangen Licht ein und werden dabei angeregt. Die Anregungsenergie leiten sie zum Reaktionszentrum weiter.
- 2 Dort werden negative und positive Ladungen getrennt und zur Stabilisierung rasch räumlich separiert. Dies ist ein *Einelektronenprozess*.
- 3 *Zwei Elektronen* – aus zwei aufeinander folgenden Lichtanregungen – reduzieren das Plastochinon Q_B, welches außerdem zwei Protonen aus dem wässrigen Medium aufnimmt und zum Plastohydrochinon PQH₂ wird.
- 4 Dem Mn₄Ca-Komplex werden sukzessive *vier Elektronen* entzogen. Dieser oxidiert daraufhin zwei angelagerte Wassermoleküle. Dabei werden vier Protonen und ein Sauerstoffmolekül (O₂) freigesetzt.

Das Photosystem II überträgt also Elektronen vom Wasser auf das Plastochinon Q_B und verwandelt es dabei in das Hydrochinon PQH₂, das als Wasserstoffträger fungiert. Die Energie für diesen Prozess stammt ausschließlich aus dem Sonnenlicht, und die Quantenausbeute ist mit rund 90 Prozent sehr hoch.

Während die Lichtsammelkomplexe in den verschiedenen Organismen je nach Lebensraum relativ variabel sind, unterscheiden sich die Reaktionszentren der jeweiligen Photosysteme kaum. Dort fängt der Pigmentkomplex P680, der aus vier Chlorophyllmolekülen besteht, das Sonnenlicht ein – sein Absorptionsmaximum liegt bei einer Wellenlänge von 680 Nanometern – und geht dabei in den angeregten





Zustand $P680^*$ über. Dieser gibt ein Elektron an eine Elektronentransportkette ab, die eines der Phäophytine sowie die beiden Plastochinone Q_A und Q_B enthält. Bedingt durch seine Struktur und die spezielle Proteinumgebung besitzt $P680$ das höchste in der Natur bekannte Oxidationspotenzial von gut +1,2 Volt. Dieser hohe Wert ist notwendig, weil die folgende Wasseroxidation ein Potenzial von mehr als +0,8 Volt erfordert. Nach der Abgabe eines Elektrons liegt $P680$ in Form eines so genannten Radikalkations $P680^{+}$ vor.

Die getrennten Ladungen müssen sehr rasch räumlich separiert werden, damit sie sich nicht wieder vereinigen, was den Verlust der eingefangenen Sonnenenergie mit sich brächte. Die ersten Elektronentransferschritte bis zum Q_A laufen daher extrem schnell ab – in weniger als einer Nanosekunde (milliardstel Sekunde). Bei der anschließenden sukzessiven Übertragung von zwei Elektronen von Q_A auf Q_B und der Aufnahme von zwei Protonen ist dagegen eine Energiebarriere zu überwinden. Das dabei gebildete PQH_2 löst sich vom Protein, um die Elektronen in Richtung Photosystem I weiterzuleiten. Es wird durch ein frisches Chinon aus der Thylakoidmembran ersetzt. Die Reaktionszeiten für diesen Vorgang liegen im Millisekundenbereich.

Ein ungewöhnlicher Metallkomplex

Für die Oxidation von Wasser zu molekularem Sauerstoff müssen zwei Wassermolekülen insgesamt vier Elektronen entrissen werden. Dies lässt sich aus energetischen Gründen nicht durch einen einzelnen Redoxschritt verwirklichen. Die Natur hat daher eine raffinierte Schnittstelle zwischen dem Einelektronentransfer bei der Ladungstrennung und dem Vierelektronenprozess der Wasserspaltung geschaffen: den Mn_4Ca -Cluster. Er wirkt nicht nur als Katalysator, sondern gleichzeitig als Ladungsakkumulator, indem er schrittweise oxidiert wird.

Die beiden zu spaltenden Wassermoleküle werden zeitlich und räumlich getrennt an den Cluster gebunden und zur Erhaltung der Ladungsneutralität sukzessive deprotoniert. Schließlich entsteht in einer konzertierten Aktion nach dem letzten Oxidationsschritt die O-O-Bindung. Die Freisetzung

Der Mangan-Kalzium-Cluster, an dem die Wasseroxidation stattfindet, besteht aus vier Manganatomen (A bis D, violett) und einem Kalziumatom (Ca, gelb), die durch fünf Sauerstoffatome (rot) verbrückt und über koordinative Bindungen mit mehreren Aminosäuren verknüpft sind. Mn_A und Ca binden jeweils zwei Wassermoleküle (W1/W2 und W3/W4, orange) als Liganden. Das mit O5 bezeichnete Sauerstoffatom ist nur relativ locker gebunden und kann zwei Positionen einnehmen.

des dabei gebildeten molekularen Sauerstoffs lässt sich mit einer so genannten Clark-Elektrode messen. Der gesamte Zyklus dauert etwa zwei Millisekunden; pro Sekunde kann er also 500-mal durchlaufen werden, was der Spaltung von 1000 Wassermolekülen entspricht.

Die hier beschriebenen Grundprinzipien der fotosynthetischen Wasseroxidation hat Pierre Joliot vom Collège de France in Paris schon vor mehr als vier Jahrzehnten entdeckt. Bessel Kok (1918–1979) vom Research Institute for Advanced Studies in Baltimore (Maryland) fasste sie 1970 in einem Reaktionsschema zusammen, das seither als Kok-Zyklus bekannt ist. Die verschiedenen Oxidationszustände des Mn_4Ca -Komplexes werden als S_i -Zustände bezeichnet, wobei der Index $i = 0, 1, 2, 3, 4$ die Zahl der im Cluster gespeicherten Oxidationsäquivalente angibt.

Für den effizienten, schnellen Elektronentransfer vom Mangan-Cluster zum oxidierten $P680^{+}$ sorgt eine optimal platzierte Aminosäure (Tyrosin-Z, Y_2) im D1-Protein. Weil er so rasch abläuft, hat das stark oxidierende $P680^{+}$ nur eine äußerst kurze Lebensdauer. Dadurch bleibt ihm kaum Zeit, das Photosystem II durch unerwünschte Oxidationsprozesse zu schädigen. Allerdings lässt sich eine solche Schädigung nicht völlig vermeiden. Sie rührt auch daher, dass Chlorophyllmoleküle nach Anregung mit hohen Lichtintensitäten langlebige »Triplettzustände« bilden können. Diese enthalten zwei ungepaarte Elektronen, deren Spins (Eigendrehimpulse) parallel ausgerichtet sind. Sie können den im Photosystem II gebildeten Sauerstoff, der im Grundzustand ebenfalls zwei ungepaarte Elektronen enthält, in so genannten Singulett-Sauerstoff überführen: eine aggressive Variante, welche die Pigmente und das Protein angreift.

In vielen Pigment-Protein-Komplexen finden sich daher Carotinmoleküle, die Triplettzustände über kurze Distanzen deaktivieren und auch Singulett-Sauerstoff abfangen können, indem sie mit ihm reagieren. Trotz dieses Schutzmechanismus hat das D1-Protein, das die Elektronentransportkette und auch den Wasserspaltungskomplex beherbergt, im Sonnenlicht nur eine mittlere Lebensdauer von etwa 30 Minuten. Danach wird es inklusive aller Kofaktoren über einen ausgeklügelten Reparaturmechanismus ersetzt.

In diesem Zusammenhang ist interessant, dass sich der aktive Mn_4Ca -Cluster im Sonnenlicht von selbst bildet, wenn man einem Photosystem II, dem er fehlt, Mangan und Kalzium anbietet. In der Natur gibt es Minerale wie Marokit und Birnessit, die Mangan und Kalzium in einer ganz ähnlichen

Anordnung enthalten. Das legt die Vermutung nahe, dass Vorläufer der Zyanobakterien Strukturelemente solcher Minerale in das Fotosystem II eingebaut haben, aus denen sich dann der Wasser spaltende Mn_4Ca -Cluster entwickelt hat. In der Tat weisen auch diese Minerale bei Lichteinfall bereits eine geringe Wasserspaltungsaktivität auf. Deshalb wird auf der Suche nach Katalysatoren für die künstliche Photosynthese inzwischen intensiv über sie geforscht.

Um die Abläufe bei der lichtinduzierten Wasserspaltung im Fotosystem II im Einzelnen zu verstehen, ist es wichtig, die Struktur und Dynamik des Mn_4Ca -Clusters in allen Zuständen des Kok-Zyklus zu kennen. Bis vor Kurzem war das jedoch für keinen einzigen der Fall. Zwar lieferten die kristallografischen Arbeiten von Witt und Saenger und später von James Barber und seinen Mitarbeitern am Imperial College in London dreidimensionale Strukturbilder des Protein-komplexes. Deren Auflösung war allerdings nicht allzu hoch. Außerdem konnten selbst die kurzen Belichtungszeiten bei Verwendung intensiver Röntgenstrahlung von modernen Elektronenbeschleunigern (Synchrotrons) und tiefe Temperaturen eine Schädigung der Kristalle nicht völlig verhindern. So kommt es, wie Forscher um Junko Yano und Vittal Yachandra vom Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien schon 2005 mittels Röntgenabsorptionsspektroskopie nachwiesen, zur Fotoreduktion der Manganionen. Dadurch ändert sich auch die Geometrie des Clusters und des Proteins während der Bestrahlung.

Solche Schäden dürften sich künftig durch den Einsatz von Röntgenlasern vermeiden lassen, da ein einzelner Strahlungspuls hier nur Femtosekunden (billiardstel Sekunden) dauert. Damit sollten auch zeitaufgelöste Messungen an einzelnen S-Zuständen gelingen – darunter der wichtige S_4 -Zustand, von dem bisher keine Strukturanalyse möglich war, weil er sich nicht »einfrieren« ließ. Erste Experimente mit einem Röntgenlaser an Mikrokristallen des Fotosystems II haben Jan Kern und Kollegen vom Lawrence Berkeley National Laboratory am Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) durchgeführt und 2012 veröffentlicht.

Die kürzlich von den japanischen Gruppen um Shen und Kamiya publizierte Strukturanalyse besticht durch eine sehr hohe Auflösung und zeigt weniger strahleninduzierte Modifikationen, weil die Bestrahlungszeiten während der einzelnen Aufnahmen sehr kurz waren. Aus der Analyse geht hervor, dass der Mangan-Cluster die Form eines verzerrten Würfels hat (Bild links oben). An schräg gegenüberliegenden Ecken befinden sich drei Manganatome (Mn_B , Mn_C , Mn_D) und das Kalziumatom. Sie sind über vier Sauerstoffbrücken mit-

Während der Wasserspaltung durchläuft der Mn_4O_5Ca -Cluster (Mitte) zyklisch fünf Zustände (S_0 bis S_4), in denen sich die Oxidationsstufen der Manganatome schrittweise erhöhen, bis schließlich molekularer Sauerstoff gebildet und freigesetzt wird. Die von den Autoren für wahrscheinlich gehaltenen Oxidationszustände der Manganionen sind angegeben (römische Zahlen).

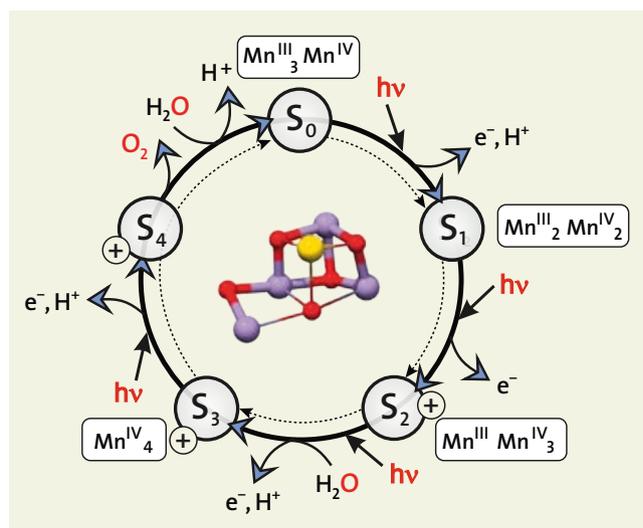
einander verbunden. Das vierte Manganatom (Mn_A) sitzt außen an dem Kubus und ist über eine weitere Sauerstoffbrücke mit dem Mn_B verknüpft. Die Struktur dieses Gebildes ist ungewöhnlich, ähnelt allerdings derjenigen für das katalytische Zentrum eines anderen bekannten Enzyms, der Kohlenmonoxid-Dehydrogenase, die einen Fe_4S_3Ni -Cluster enthält.

Eines der Sauerstoffatome (O_5) zeichnet sich durch ungewöhnlich lange Bindungen zu den vier benachbarten Metallatomen (Mn_A , Mn_B , Mn_D und Kalzium) aus, was auf eine erhöhte Reaktivität hindeutet. Der Cluster trägt vier angelagerte Wassermoleküle; zwei sind mit dem Kalzium- und zwei mit dem außerhalb des Würfels gelegenen Manganatom (Mn_A) verbunden. Es ist bekannt, dass die Wasserspaltungsaktivität auch vom Vorhandensein von Chloridionen abhängt; das jüngste Strukturbild zeigt zwei solche Ionen in einiger Entfernung vom Mn_4Ca -Cluster.

Entscheidend: Die elektronische Struktur

Die Kenntnis der Geometrie des Mn_4Ca -Clusters allein reicht für das Verständnis seiner Funktion aber nicht aus. Nötig sind auch Informationen über seine elektronische Struktur, also die Verteilung der Elektronen und die Orientierung ihres Spins. Die Oxidationsstufe der Manganatome gibt an, wie viele Elektronen sie jeweils (formal) abgegeben haben, während der Spinzustand etwas über die Verteilung der verbliebenen Elektronen auf die verfügbaren Orbitale (quantenmechanischen Aufenthaltsräume) aussagt. Ferner ist die Wechselwirkung zwischen den Metallionen wichtig, die ganz wesentlich von Art, Anordnung und den elektronischen Eigenschaften der an sie gebundenen »Liganden« bestimmt wird – insbesondere der Brückenatome. Die chemischen Reaktionen des Komplexes und auch seine katalytischen Eigenschaften hängen maßgeblich von der Verteilung der Valenzelektronen im Cluster ab. Ohne diese Informationen für alle S-Zustände ist ein grundlegendes, detailliertes Verständnis des Kok-Zyklus nicht möglich.

Einblicke in die elektronische Struktur lassen sich mit spektroskopischen Methoden gewinnen (siehe Kasten auf



Elektronenspinresonanz (ESR)

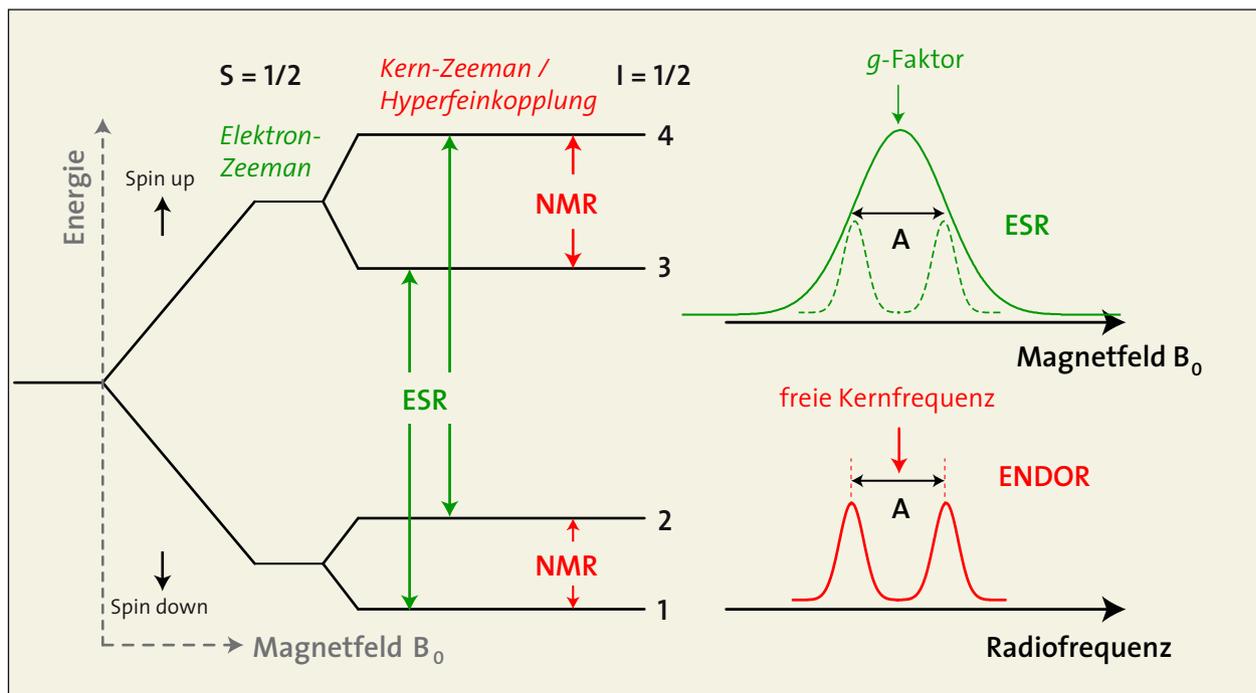
Ein Elektron besitzt neben seiner Masse und negativen Elementarladung auch einen Eigendrehimpuls (»Spin«). Dadurch verfügt es über ein magnetisches Moment und verhält sich wie ein kleiner Stabmagnet. Dieser kann in einem äußeren Magnetfeld ausgerichtet werden. Die beiden möglichen Einstellungen – parallel oder antiparallel zum Feldvektor – haben unterschiedliche Energien, wobei die Energiedifferenz von der Stärke des Magnetfelds abhängt (Zeeman-Effekt). Durch elektromagnetische Strahlung der passenden Frequenz lassen sich Übergänge zwischen den beiden Energieniveaus hervorrufen: Man spricht von Elektronenspinresonanz (ESR). Die genaue Position der Resonanzlinie wird durch den so genannten g -Faktor bestimmt, der von der Umgebung des Spins abhängt und damit eine charakteristische Größe für jedes System darstellt.

Auch manche Atomkerne haben einen Spin. Dessen Wechselwirkung mit dem Elektronenspin führt dann zu einer zusätzlichen Aufspaltung der Linien. Je höher die »Elektronenspindichte« an dem betreffenden Kern, desto größer ist diese »Hyperfeinaufspaltung« im ESR-Spektrum. Aus ihr lässt sich daher die Verteilung der Elektronenspindichte in einem Molekül ableiten, die sehr genau die Verteilung der wichtigen Bindungselektronen widerspiegelt. ESR-Messungen sind allerdings nur an Systemen möglich, die ungepaarte Elektronen enthalten

und dadurch paramagnetisch sind. Dazu zählen freie Radikale oder Komplexe vieler Übergangsmetalle wie etwa Mangan. In Systemen mit mehreren ungepaarten Elektronen lässt sich auch die Wechselwirkung der Elektronenspins untereinander messen. Sie liefert Aussagen zur Geometrie von Molekülen und Molekülfragmenten.

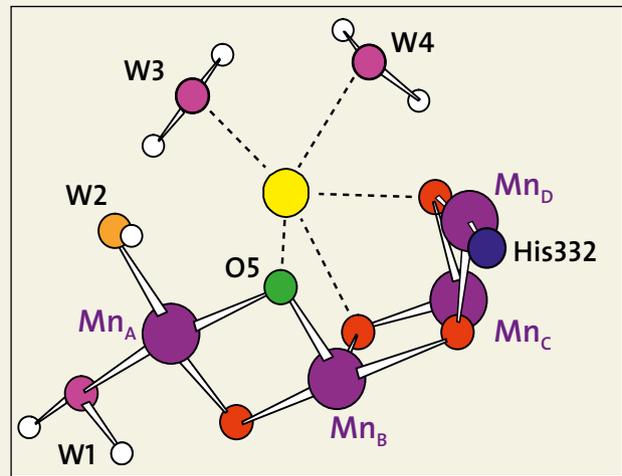
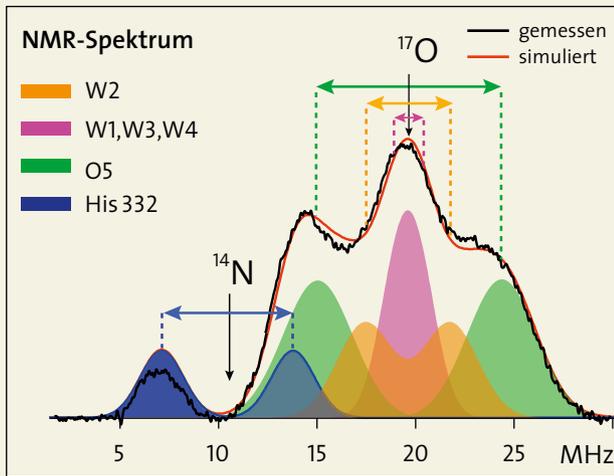
Wechselwirkungen zwischen Elektronen- und Kernspins können ebenso mittels Kernspinresonanz (NMR) bestimmt werden. Diese Methode hat eine viel höhere Auflösung als die ESR und macht deshalb auch noch sehr schwache Interaktionen sichtbar. Aus Empfindlichkeitsgründen werden NMR-Experimente an paramagnetischen Verbindungen allerdings mittels Doppelresonanzverfahren wie ENDOR (Elektron-Kern-Doppelresonanz) und ELDOR (Elektron-Elektron-Doppelresonanz) durchgeführt.

Moderne quantenchemische Verfahren helfen, aus den gemessenen Spektren die Stärke der jeweiligen Wechselwirkung abzuleiten. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die betreffenden Strukturen und elektronischen Zustände. Dadurch lassen sich auch Informationen über kurzlebige Zwischenprodukte von komplexen Reaktionsfolgen gewinnen, wie sie bei der lichtinduzierten Wasserspaltung auftreten.



Das Energieaufspaltungsschema (links) für ein ungepaartes Elektron (Spin $S = 1/2$) im äußeren Magnetfeld B_0 , das an einen Kern (Spin $I = 1/2$) ankoppelt, zeigt die spektroskopisch anregbaren »erlaubten« ESR- (grün) und NMR-Übergänge (rot). Im ESR-Spektrum sind die beiden Banden, die aus der Hyperfein-

kopplung (Aufspaltung A) mit dem Kernspin resultieren, oft nicht aufgelöst (rechts oben). Deshalb misst man besser die NMR-Übergänge durch Elektron-Kern-Doppelresonanz (ENDOR, rechts unten) oder durch Kombination eines erlaubten und eines verbotenen ESR-Übergangs (ELDOR).



Das mittels ELDOR gemessene NMR-Spektrum (links) des $\text{Mn}_4\text{O}_5\text{Ca}$ -Clusters im S_2 -Zustand zeigt für drei Arten von Sauerstoffatomen, die aus ^{17}O -markierten Wassermolekülen stammen, sowie für einen ^{14}N -Kern des Histidin-Rests His332 Hyperfeinkopplungen mit dem Elektronenspin (farbige Pfeile). Vor der Aufnahme war im Fotosystem II, das sich im S_1 -Zustand befand, das enthaltene normale Wasser durch solches ausgetauscht geworden, welches das magnetische Isotop ^{17}O statt des üblichen ^{16}O enthielt. Die Hyperfeinkopplungen ließen sich einzelnen Sauerstoffatomen im Strukturbild (rechts) des $\text{Mn}_4\text{O}_5\text{Ca}$ -Clusters zuordnen (siehe Farbkodierung). Die stärkste Kopplung weist der Brückensauerstoff O5 auf, der aus dem Substratwassermolekül hervorgegangen ist, das schon im S_0 -Zustand gebunden wurde. Es folgt das Sauerstoffatom des deprotonierten Wasserliganden W2 an Mn_A . Die drei übrigen Wassermoleküle zeigen eine einheitliche sehr schwache Kopplung. Vier der fünf Brückensauerstoffatome (rot) sind offenbar fest eingebaut und wurden deshalb nicht gegen ^{17}O ausgetauscht.

S. 40). Man macht sich dabei zu Nutze, dass der Mn_4Ca -Cluster in allen S-Zuständen ungepaarte Elektronen aufweist. Dies ist typisch für Komplexe von Übergangsmetallen wie Mangan, bei denen eine innere Elektronenschale – in diesem Fall die so genannte 3d-Schale – nur teilweise besetzt ist. Normalerweise treten Elektronen in chemischen Bindungen als Paare auf, deren Spins entgegengesetzt orientiert sind und sich so aufheben. Die entsprechenden Substanzen sind dann diamagnetisch, lassen sich also nicht durch ein äußeres Magnetfeld beeinflussen. Ungepaarte Elektronen haben dagegen freie Spins und folglich ein magnetisches Moment. Es handelt sich deshalb um paramagnetische Systeme, die mit einem äußeren Magnetfeld in Wechselwirkung treten. Aus diesem Grund kann man sie mit der Elektronenspinresonanz (ESR) untersuchen. Der Spin markiert dabei gewissermaßen das interessierende Atom oder den Atomcluster und sorgt dafür, dass man es auch in einer komplexen Umgebung – wie einem Protein – problemlos einzeln erfassen und charakterisieren kann.

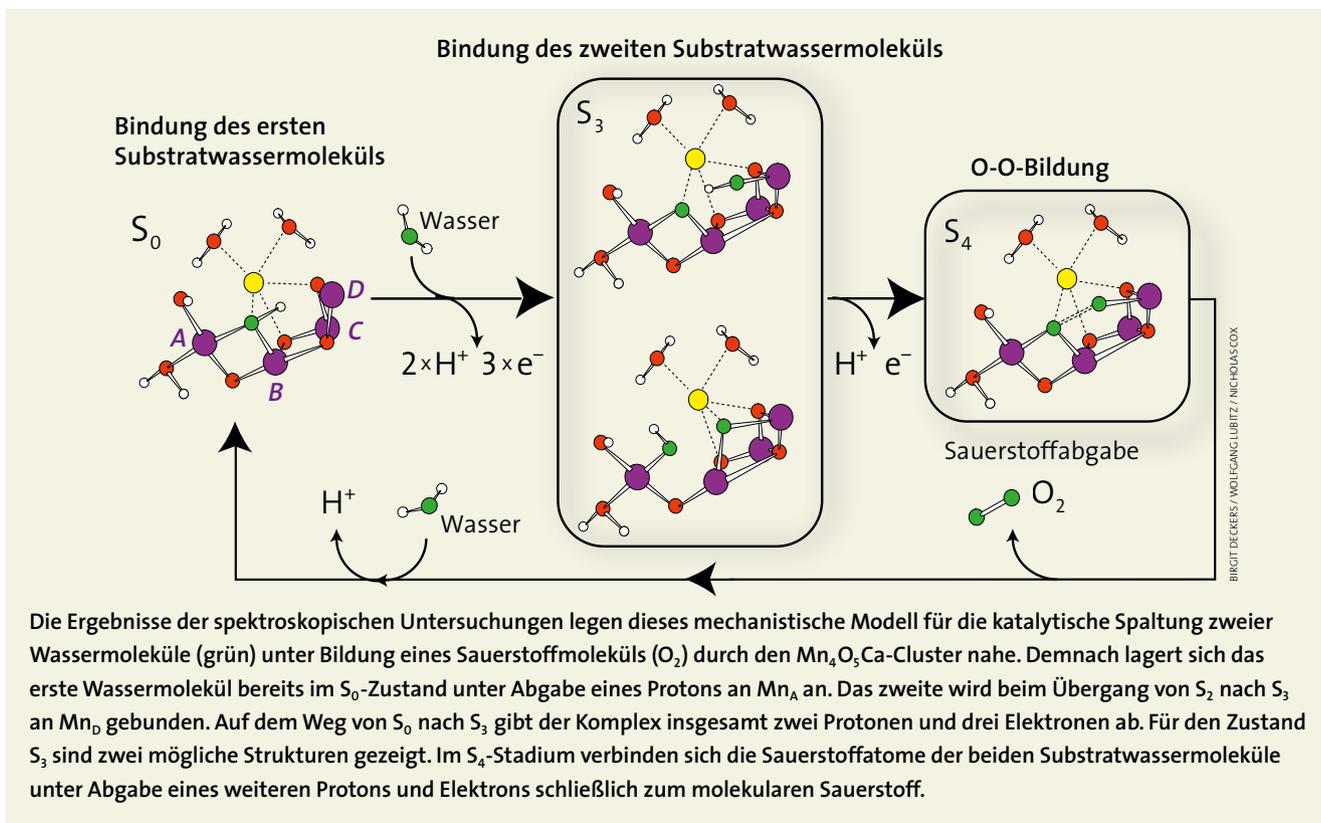
Der S_0 - und der S_2 - sowie wahrscheinlich auch der S_4 -Zustand weisen einen effektiven Spin $\frac{1}{2}$ auf. Dieser Elektronenspin interagiert mit den Spins magnetischer Kerne wie dem des Mangans (^{55}Mn) oder des häufigsten Wasserstoffisotops (^1H). Die daraus resultierende »Hyperfeinkopplung« führt zu sehr komplizierten ESR-Spektren mit vielen Linien, die Charles Dismukes vom Department of Chemistry & Biological Chemistry der Rutgers University in Piscataway (New Jersey) schon vor 30 Jahren erstmals für den S_2 -Zustand be-

schrieben hat. Zu ihrer Interpretation bedarf es zusätzlicher Informationen, die sich beispielsweise durch Doppelresonanzexperimente gewinnen lassen, bei denen auch der Spin des betreffenden Kerns angeregt wird. Das Verfahren heißt ENDOR (nach englisch: electron nuclear double resonance, Elektron-Kern-Doppelresonanz). David Britt von der University of California in Davis hat es als Erster auf die ^{55}Mn -Kerne der Mn_4Ca -Einheit in S_2 angewandt.

Identifizierung der zu spaltenden Wassermoleküle

Mittels ^{55}Mn -ENDOR konnten wir an verschiedenen Zuständen des Kok-Zyklus zeigen, dass die Elektronenspindichte relativ gleichmäßig über den Cluster verteilt ist und damit alle vier Manganatome elektronisch miteinander gekoppelt sein müssen. Auch deren formale Oxidationsstufen im Kok-Zyklus vermochten wir zu bestimmen und zuzuordnen – eine Schlüsselinformation für das Verständnis der Wasserspaltung (Bild auf S. 39). Demnach weist beispielsweise im S_2 -Zustand nur genau ein Manganatom die Oxidationsstufe III auf; in den drei anderen beträgt sie IV. Dies hat Konsequenzen für den gesamten Kok-Zyklus. Das Mn(III) besitzt nämlich eine freie »Koordinationsstelle«, an die ein Wassermolekül gebunden werden kann – vermutlich eines der beiden, die dann oxidiert werden.

Ein großes Problem bei der Untersuchung der Wasseroxidation im Rahmen der Photosynthese besteht darin, dass Wasser sowohl Substrat als auch Lösungsmittel ist. Shen und



Kamiya haben bei ihrer hoch aufgelösten Röntgenstrukturanalyse im Photosystem II insgesamt rund 1300 Wassermoleküle identifiziert, viele davon sogar im hydrophoben (Wasser abweisenden) Innern des Proteinkomplexes. In der Umgebung des Mn₄Ca-Clusters befinden sich ebenfalls Wassermoleküle. Einige gehören einem Netzwerk aus Wasserstoffbrücken zu benachbarten Aminosäuren an, und nur vier sind, wie erwähnt, direkt an den Cluster gebunden: zwei an das außerhalb des Würfels gelegene Mn_A und zwei an das Kalziumion. Aus dieser statischen Struktur ist jedoch nicht ersichtlich, welche davon an der Oxidation zum Sauerstoff teilnehmen.

Wie Johannes Messinger von der Universität Umeå (Schweden) und Warwick Hillier sowie Thomas Wydrzynski von der Australian National University in Canberra mit zeit-aufgelösten massenspektrometrischen Messungen herausfanden, bindet der Mn₄Ca-Cluster die beiden Substratwassermoleküle an verschiedenen Stellen und in unterschiedlichen Stadien des Kok-Zyklus – das erste schon im S₀-, das zweite dagegen erst nach dem S₂-Zustand. Diese Positionen zu identifizieren, ist wichtig für das genaue Verständnis des Mechanismus, nach dem die Wasserspaltung abläuft. Im Prinzip kann das durch Markierung der Wassermoleküle mit dem magnetischen Sauerstoffisotop ¹⁷O und anschließende Messung der Hyperfein-Wechselwirkung mit den paramagnetischen S-Zuständen des Mangankomplexes geschehen. Solche Experimente sind jedoch aufwändig und teuer. Außerdem scheiterten sie bisher daran, dass keine Methoden

existierten, die Hyperfeinkopplung des ¹⁷O-Kerns mit genügend hoher Auflösung und Empfindlichkeit zu bestimmen.

Durch jüngste methodische und instrumentelle Weiterentwicklungen in unserem Labor am Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion in Mülheim vermochten wir diese Hürden jetzt zu überwinden. Unsere spektroskopischen Untersuchungen zeigen im S₂-Zustand drei unterschiedlich gebundene Arten von Wassermolekülen (Bild auf S. 41). Die zugehörigen ¹⁷O-Kerne, charakterisiert durch ihre Hyperfeinkopplung mit dem Elektronenspin des Clusters, konnten wir durch eine Reihe zusätzlicher Experimente den Sauerstoffatomen in der röntgenografisch bestimmten Struktur zuordnen. Auf diese Weise gelang es uns, jenes Substratwassermolekül zu identifizieren, das früh in den Kok-Zyklus eintritt und an der Bildung der O-O-Bindung beteiligt ist.

Da die Wassermoleküle im Verlauf der Reaktion ihre Protonen verlieren, kann ihr Sauerstoffatom auch zu einem der austauschbaren Brückenatome zwischen den Metallatomen im Cluster werden. Genau dies ist laut unseren Analysen der Fall. Das erste in den Zyklus eintretende H₂O endet im S₂-Zustand als Sauerstoffbrücke und lässt sich als das relativ locker gebundene O5 identifizieren, das laut der jüngsten Röntgenstrukturanalyse ziemlich große Abstände zu den vier benachbarten Metallatomen hat und deshalb besonders reaktiv ist. Theoretische Berechnungen von Per Siegbahn an der Universität Stockholm sprechen ebenfalls dafür, dass dieses Sauerstoffatom in das schließlich gebildete O₂-Molekül eingeht. Frank Neese, Dimitrios Pantazis und Mitarbeiter an unserem

Institut konnten kürzlich die verschiedenen spektroskopischen ESR-Signale im S_2 -Zustand Strukturvarianten zuordnen, in denen O5 unterschiedliche Positionen einnimmt.

Das zweite Substratwassermolekül ließ sich bisher nicht mit Sicherheit identifizieren. Vermutlich handelt es sich jedoch um eines von den vieren, die an den Cluster gebunden sind. Ein wahrscheinlicher Kandidat ist W3 am Kalziumatom. Das legen auch neueste Strukturdaten von Shen und Kamiya nahe. Des Weiteren ist bekannt, dass der Mangan-Cluster nur die ersten Schritte des Kok-Zyklus bis S_2 ausführt, wenn man das Kalzium entfernt. Zudem stört dessen Fehlen unseren ESR/ENDOR-Daten zufolge die elektronische Struktur des Systems in S_2 kaum. Offenbar ist das Kalzium also erst in den höheren S-Zuständen von Bedeutung, wenn auch das zweite Wassermolekül ins Spiel kommt.

Mechanismus der Wasserspaltung

Was besagen diese neuen Erkenntnisse nun über den genauen Mechanismus der Wasseroxidation im Fotosystem II? In dem von uns favorisierten Modell, das Siegbahn schon 2009 in ähnlicher Form vorgeschlagen hat, spielt das austauschbare Brückenatom O5 eine zentrale Rolle (Bild links). Es wird als Wasser im S_0 -Zustand aufgenommen und verliert im Zuge des Kok-Zyklus sukzessive seine Protonen, so dass es im S_2 -Zustand eine Sauerstoffbrücke bildet. Beim Übergang nach S_3 greift das zweite Wassermolekül, das wahrscheinlich an das Kalziumatom gebunden ist, ins Geschehen ein. Es wird unter Deprotonierung an die freie Koordinationstelle des Mn_D oder Mn_A gebunden – je nach Position der flexiblen O5-Brücke. Letzteres erscheint plausibler, da Mn_A für Wasser leichter zugänglich ist. Die nächste Oxidation und Deprotonierung führt zu dem katalytisch aktiven S_4 -Zustand, in dem sich die Sauerstoffbrücke O5 und das zweite Wassermolekül, das inzwischen ebenfalls beide Protonen abgegeben hat, zum Sauerstoffmolekül vereinigen. Nach dessen Freisetzung nimmt der Mn_4Ca -Cluster sofort ein neues Substratwassermolekül auf.

Was lässt sich aus unserem derzeitigen Wissensstand über die oxygene Fotosynthese nun für die Eigenschaften eines molekularen Katalysators lernen, der den Vorgang künstlich nachahmen soll? Die erste Schlussfolgerung ist ermutigend: Man braucht keine seltenen, teuren Materialien. Mit Mangan und Kalzium verwendet die Natur zwei häufig in der Erdkruste vorkommende Metalle. Allerdings hat sie diese durch eine ausgefallene Struktur und passende Liganden – vorwiegend Sauerstoffatome – für die Aufgabe optimiert.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass das Wasser nicht in Einelektronenschritten stufenweise oxidiert wird. Dadurch treten keine hochreaktiven Zwischenprodukte wie etwa Hydroxylradikale auf. Stattdessen speichert das Photosystem zunächst nur die Oxidationsäquivalente aus den Einelektronenübergängen und führt, sobald vier davon zusammengekommen sind, die Wasserspaltung in einem Schritt durch. Vorher werden die beteiligten Wassermoleküle sukzessive darauf vorbereitet. Insbesondere verlieren sie im

Kok-Zyklus der Reihe nach ihre Wasserstoffatome. Da diese als Protonen (H^+) in Lösung gehen, häufen sich im Katalysator keine positiven Ladungen an, was destabilisierend auf ihn wirken würde. Das bedeutet zugleich, dass die Produkte der Wasserspaltung – O_2 und H^+ – in getrennten Schritten freigesetzt werden. Daher muss das Fotosystem auch eine maßgeschneiderte Matrix besitzen, die etwa passende Kanäle für den Transport von Wasser und Sauerstoff bereitstellt und aktiv den Protonentransfer unterstützt.

Wichtig ist ferner, dass die Lichtreaktion ein Molekül in einem Zustand mit genügend hohem Oxidationspotenzial für die nachfolgende katalytische Wasseroxidation liefert, das für die Dauer der Reaktion stabil ist. Bei der natürlichen Fotosynthese handelt es sich um das Radikalkation $P680^{+\cdot}$. Zugleich muss die Lichtreaktion möglichst effizient mit der katalytischen Wasserspaltung gekoppelt sein. Im Photosystem II wird diese Kopplung durch eine bezüglich ihrer Eigenschaften optimal gewählte und genau platzierte redoxaktive Aminosäure (Tyrosin Y_2) gewährleistet.

Schließlich gilt es, den Katalysator so weit wie möglich vor Schädigung – zum Beispiel durch zwischenzeitlich auftretende reaktive Sauerstoffspezies – zu schützen und für eine effiziente Reparatur der Schäden zu sorgen.

All das macht deutlich, welche enormen Schwierigkeiten auf dem Weg zu einer künstlichen Fotosynthese im großen Maßstab zu überwinden sind. Immerhin haben verschiedene Forscher in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt (siehe den folgenden Beitrag). Tatsächlich scheint es, dass die technischen Systeme keineswegs so kompliziert sein müssen wie das natürliche Vorbild. Demnach könnten wir durchaus schon in absehbarer Zeit ein »künstliches Blatt«, wie es Daniel Nocera von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) nennt, in Händen halten. \curvearrowright

DIE AUTOREN



Wolfgang Lubitz (links) ist Direktor und **Nicholas Cox** Gruppenleiter am neu gegründeten Max-Planck-Institut für chemische Energiekonversion in Mülheim an der Ruhr.

QUELLEN

Cox, N. et al.: Biological Water Oxidation. In: Accounts of Chemical Research 46, S. 1588–1596, 2013
Siegbahn, P.: Structures and Energetics for O_2 Formation in Photosystem II. In: Accounts of Chemical Research 42, S. 1871–1880, 2009
Umena, Y. et al.: Crystal Structure of the Oxygen-Evolving Photosystem II at a Resolution of 1.9 Å. In: Nature 473, S. 55–60, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1199285

ENERGIETECHNIK

Künstliche Fotosynthese

Die Natur macht es uns vor: die Umwandlung von Solarenergie in energiereiche Moleküle. Künstliche Blätter aus Metall, die mit Sonnenlicht Wasserstoff erzeugen, haben bereits heute einen höheren Wirkungsgrad als Pflanzen. Das optimale Material für die Gewinnung von Brennstoffen aus Wasser und Sonnenlicht könnte jedoch eine Substanz sein, die chemisch eng mit dem Chlorophyll verwandt ist.

Von Stephanie Wohlgemuth und Markus Antonietti



Künstliche Bäume könnten dereinst den Treibstoff für das eigene Auto liefern. Dazu müssten bei heutigem Verbrauch und durchschnittlicher Kilometerleistung weniger als 100 Quadratmeter auf dem Grundstück mit ihnen bedeckt sein.

ACKERGRÜN: FOTOLIA / HI SCHNEIDER [M]; MENSCH: FOTOLIA / COLINDA MCKIE [M]; HIMMEL: CHRISTINA HOF; COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTINA HOF; IDEE: MARKUS ANTONIETTI

Fossile Brennstoffe sind nur begrenzt verfügbar, und ihre Vorräte dürften teils in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein. Zudem bringt ihre Nutzung einen bedrohlichen Klimawandel mit sich. Die Zeit, in der sich der Wohlstand besonders der westlichen Industrienationen auf Öl und Kohle gegründet hat, neigt sich deshalb dem Ende zu. Zugleich erwarten Experten allein bis 2030 eine 50-prozentige Steigerung des heutigen Energiebedarfs. Wind- und Wasserkraft sowie Energie aus Biomasse und Erdwärme dürften ihn auf Dauer nicht allein decken können. Zudem ist der Wind launisch und weht nicht immer und überall. Die Sonne hingegen liefert mehr als genug Energie: 120 000 Terawatt an Strahlungsleistung erreichen die Erdoberfläche. Bei einem weltweiten Energieverbrauch von etwa 13 Terawatt im Jahr 2000 könnte eine einzige Stunde Sonnenstrahlung also den Jahresbedarf der ganzen Welt decken! Fotovoltaikanlagen und Solarthermiekraftwerke zapfen diese Quelle bereits an und gewinnen daraus Strom.

Ähnlich dem unzuverlässigen Wind scheint allerdings auch die Sonne nicht den ganzen Tag und nicht überall. Elektrizität für die sonnenfreie Zeit ist aber nur schwer zu speichern und mit erheblichen Verlusten zu transportieren. Die gewonnene elektrische Energie lässt sich in großen Mengen nach heutigem Stand der Technik lediglich über den Umweg der Elektrolyse in Form von Wasserstoff nutzen, und dieser Weg ist noch sehr ineffektiv. Deshalb widmen sich immer mehr Forscher weltweit einer wesentlich eleganteren Lösung, die uns die Natur seit jeher vormacht: der Fotosynthese.

Pflanzen, Algen und einige Bakteriengruppen haben die einzigartige Fähigkeit, die im Sonnenlicht enthaltene Energie zu nutzen und daraus energiereiche Moleküle zu erzeugen. Dabei wandeln sie in der Regel Kohlendioxid und Wasser in Kohlenhydrate um. Das geschieht in zwei Schritten, von denen nur der erste Sonnenlicht benötigt. Spezielle Lichtsammelkomplexe fangen es ein und verwenden es dazu, Wasser

in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. Letzterer ist ein Abfallprodukt, das die Pflanzen in die Erdatmosphäre abgeben.

Im zweiten Schritt dient der Wasserstoff zur Umwandlung von Kohlendioxid in organische Moleküle. Damit wird die Solarenergie chemisch gespeichert. Das ermöglicht eine maximale räumliche und zeitliche Flexibilität, teilweise über viele Jahreszeiten hinweg! Denselben Vorteil hat die Fotosynthese gegenüber der Fotovoltaik, welche die Solarenergie direkt in Elektrizität umwandelt. Die chemischen Verbindungen lassen sich mit vergleichsweise geringen Kosten überall dorthin transportieren, wo sie gebraucht werden, und dann verstromen, wenn Bedarf besteht.

Dabei ist die natürliche Fotosynthese erstaunlich ineffizient. Pflanzen verwerten nur etwa 0,3 Prozent des einfallenden Sonnenlichts. Jim Barber vom Imperial College London, der das dortige »artificial leaf project« leitet, gibt sich deshalb optimistisch. »Was ein Blatt kann, können wir sogar noch besser«, lautet sein Kredo. Falls sich mit künstlichen Fotosynthesystemen 10 Prozent der Solarenergie nutzen ließen, müssten sie nur 0,16 Prozent der Erdoberfläche bedecken, um den für 2030 vorausgesagten globalen Energiebedarf von 20 Terawattstunden zu decken. Als Standorte kämen dabei in erster Linie Wüsten in Frage, wo keine Konkurrenz zu Agrarnutzflächen besteht. Ein Zehntel der Sahara, die 1,76 Prozent der Erdoberfläche einnimmt, würde bereits genügen.

Sehr attraktiv ist auch die Integration in bebaute Flächen, deren Bewohner die Energie dann gleich selbst nutzen könnten. Wie die heutigen Solarzellen ließen sich künstliche Fotosynthesysteme etwa auf Dächern installieren. Bei einer Lichtausbeute von 10 Prozent könnten sie beispielsweise 300 Tonnen Methanol pro Hektar und Jahr liefern. Wären nur 100 Quadratmeter des eigenen Grundstücks damit bedeckt, bräuchte selbst ein leidenschaftlicher Autofahrer bei heutigem Treibstoffverbrauch nie mehr zur Tankstelle.

Industriegebiete ohne rauchende Schloten

Die Idee, die Fotosynthese künstlich nachzuahmen, ist nicht neu: Schon vor 100 Jahren äußerte sie der italienische Fotochemiker Giacomo Luigi Ciamician (1857–1922) im Wissenschaftsjournal »Science«.

»Das Sonnenlicht ließe sich für industrielle Zwecke nutzen. Das könnte in Wüsten, die keinerlei Kultivierung zulassen, mit Hilfe der Fotochemie geschehen. In Trockenzonen werden Industriegebiete ohne Rauch und Schornsteine aus dem Boden schießen; Wälder von Glasrohren werden sich über die Ebenen erstrecken und Glasgebäude überall in die Höhe wachsen: Darin werden die fotochemischen Prozesse ablaufen, die bislang das Geheimnis der Pflanzen waren. Doch Ingenieure werden sich ihrer bemeistert haben und die künstlichen Pflanzen dazu bringen, mehr Früchte zu tragen als in der Natur, denn die Natur kennt keine Eile, doch die Menschheit sehr wohl. Und wenn in ferner Zukunft alle Kohle aufgebraucht ist, wird das die Zivilisation nicht bedrohen, denn das Leben und die Zivilisation werden fortbestehen, solange die Sonne scheint!«

AUF EINEN BLICK

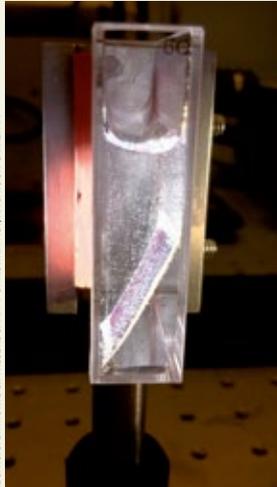
VON DEN PFLANZEN LERNEN

1 **Energiereiche Moleküle** statt Strom aus Sonnenlicht zu gewinnen, hat einen großen Vorteil: Die produzierte Energie muss nicht sofort verbraucht werden, sondern ist ohne nennenswerte Verluste zu einem beliebigen Zeitpunkt überall einsetzbar.

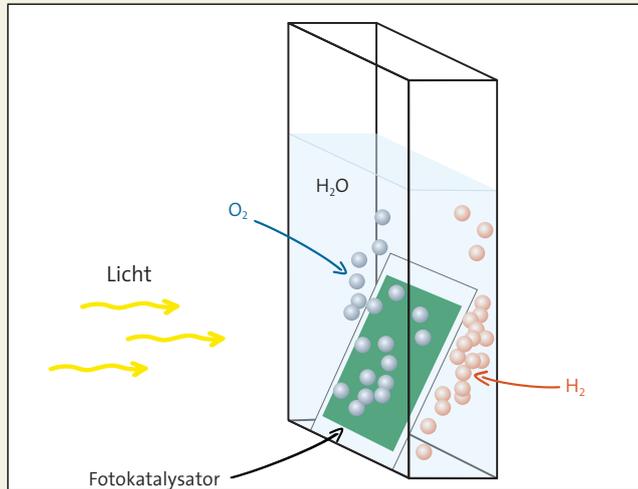
2 Pflanzen beschreiten mit der **Fotosynthese** diesen Weg. Allerdings verwerten sie dabei nur 0,3 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung.

3 Forscher, welche die Fotosynthese nachahmen und mit Sonnenlicht **Wasserstoff** erzeugen, erreichen mit künstlichen Blättern aus Halbleitern und Metallen bereits **Wirkungsgrade** bis 4,7 Prozent. Allerdings sind solche Systeme sehr teuer und haben nur eine kurze Lebensdauer.

4 Eine viel versprechende Alternative bietet **Kohlenstoffnitrid**, ein preiswertes und ungiftiges Polymer, das chemisch dem **Chlorophyll** ähnelt. Auch mit ihm ließ sich die Lichtausbeute der Pflanzen bereits übertreffen.



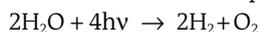
LINKS: MIT FÖHLEN VON SUN CATALYTIX. RECHTS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTINA HOF, NACH SUN CATALYTIX



Das »künstliche Blatt« eines Teams um Daniel Nocera vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge spaltet bei Belichtung Wassermoleküle (H₂O). Auf der lichtzugewandten Seite entwickelt sich Sauerstoff (O₂) und auf der gegenüberliegenden Wasserstoff (H₂). Die beiden Gase entstehen also an unterschiedlichen Stellen und lassen sich so leicht trennen.

Diese Vision ist aktueller denn je. Wenn es gelänge, eine konkurrenzfähige Form der künstlichen Fotosynthese zu entwickeln, hätte dies enorme Auswirkungen auf die gesamte Energiewirtschaft und damit unsere Lebensweise. So wäre Wasserstoff, der durch Wasserspaltung entsteht, nicht nur ein geeigneter Brenn- und Treibstoff für Heizzwecke und emissionsfreie Fahrzeuge, sondern auch ein wertvolles Ausgangsmaterial für viele chemische Großprozesse wie das Haber-Bosch-Verfahren zur Herstellung von Ammoniak oder für die Fischer-Tropsch-Synthese zur Produktion von Benzin und Diesel. Diese Kohlenwasserstoffe könnten ihrerseits als Ausgangsmaterial für Plastik oder Medikamente dienen.

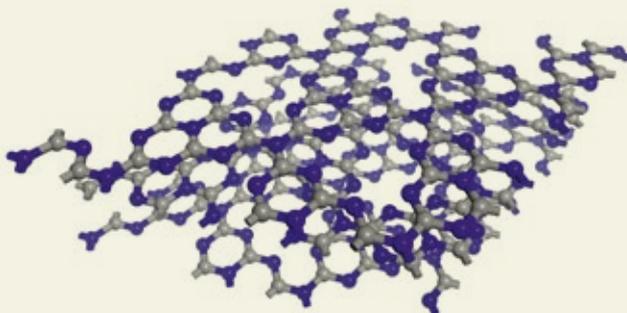
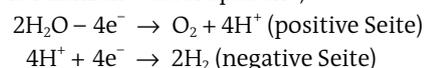
Die Gesamtreaktion für die Wasserspaltung lässt sich vereinfacht wie folgt beschreiben, wobei $h\nu$ der Energie eines einzelnen Lichtquants oder Photons entspricht:



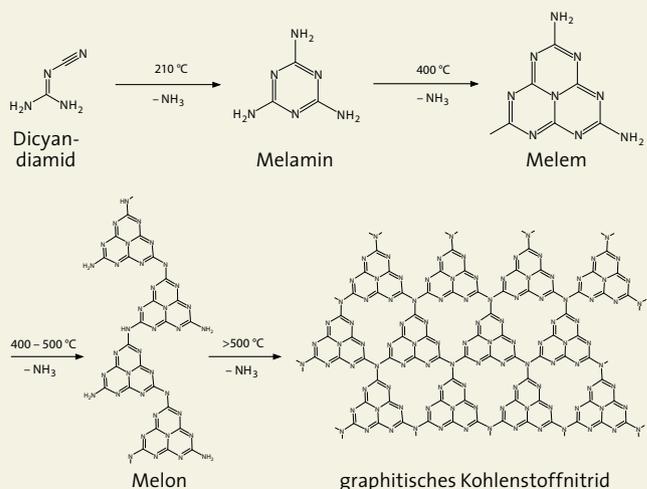
In der Natur läuft die Fotosynthese in speziellen Organellen ab: den Chloroplasten. Zum Auffangen der Lichtstrahlen dient der grüne Pflanzenfarbstoff Chlorophyll. Dabei handelt

es sich um ein großes stickstoffhaltiges Molekül (Porphyrin), das wie eine Bratpfanne geformt ist und sichtbare elektromagnetische Strahlung im Bereich von 400 bis 480 Nanometern (blau) und 550 bis 700 Nanometern (gelb bis rot) absorbieren kann. Die Energie der verschluckten Photonen wird dann an ein fotosynthetisches Reaktionszentrum weitergeleitet. Dort dient sie dazu, über die so genannte Thylakoidmembran hinweg positive und negative Ladungen zu trennen. Auf diese Weise speichern die Chloroplasten die Sonnenenergie mit Hilfe diverser Enzyme vorübergehend als elektrostatisches Potenzial wie in einem winzigen Kondensator.

Die nachfolgende Wasserspaltung läuft dann gemäß den folgenden Gleichungen, in denen e^- für ein Elektron steht, in zwei getrennten Teilreaktionen auf unterschiedlichen Seiten der Thylakoidmembran ab (siehe auch den voranstehenden Artikel »Wie Pflanzen Wasser spalten«):



Graphitisches Kohlenstoffnitrid hat eine Schichtstruktur, in der sich in einem wabenförmigen Gitter Kohlenstoff- und Stickstoffatome abwechseln. Es lässt sich über mehrere Stufen, in denen bei zunehmenden Temperaturen jeweils Ammoniak (NH₃) abgespalten wird, aus Dicyandiamid herstellen.



LINKS: MICHAEL BODDYK, UNIVERSITY OF ILLINOIS. RECHTS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, ANSCHUANG ET AL. METAL-FREE PHOTOCATALYTIC CARBON NITRIDE ON STRYBE CLAY CARBONATE AS A COMPOSITE PHOTOCATHODE FOR LIGHT-INDUCED HYDROGEN EVOLUTION IN CHEMISCHEN S. 5, 1327-1332, 2013

Auf der positiven Seite der Membran werden also den Sauerstoffatomen in Wassermolekülen Elektronen entzogen. Zurück bleiben Protonen und elementarer Sauerstoff. Auf der negativen Seite werden Protonen durch Elektronen zu Wasserstoffmolekülen reduziert; allerdings liegen diese nicht frei vor, sondern sind an ein Enzym gebunden, das sie im zweiten Schritt – im Verlauf der so genannten Dunkelreaktion – dann auf Kohlendioxid überträgt. Während die Protonen zum Ladungs- und Konzentrationsausgleich von der positiven zur negativen Seite der Thylakoidmembran wandern, treiben sie die Synthese von Adenosintriphosphat (ATP) an, das wiederum die Energie für die Dunkelreaktion liefert.

Die wichtigen Stadien der natürlichen Photosynthese sind also das Einfangen der Sonnenenergie, deren Übertragung auf einen Katalysator, auf dem eine Ladungstrennung und schließlich die Spaltung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff stattfindet. Wesentliche Voraussetzungen sind dabei ein stabiles Substrat, ein effizienter Katalysator und langlebige Zustände mit getrennten Ladungen.

Auf die richtige Bandlücke kommt es an

All das sollte sich mit Halbleitermaterialien nachahmen lassen. Deren Bandlücke (siehe Kasten rechts) muss dabei so klein sein, dass die Energie der Lichtstrahlung ausreicht, um Elektronen aus dem Valenzband in das höher gelegene Leitungsband zu befördern. Zurück bleiben positiv geladene Elektronenfehlstellen: so genannte Löcher. Ist dieser Zustand mit getrennten Ladungen langlebig genug, können die Elektronen Protonen zu Wasserstoff reduzieren, während die Löcher Wasser zu Sauerstoff oxidieren.

Allerdings darf die Bandlücke auch nicht zu klein sein. Ihre Mindestgröße hängt vom Energiebedarf der beiden Teilreaktionen der Wasserspaltung, also der Oxidation von Wasser zu Sauerstoff und der Reduktion von Protonen zu Wasserstoff, ab, und beträgt, über die vier Elektronen gemittelt, 1,23 Elektronenvolt. Hinzu kommt ein so genanntes Überpotenzial. Das ist der zusätzliche Energiebetrag, der über den theoretischen Wert hinaus aufgebracht werden muss, um die Reaktion auch voranzutreiben. Ein guter Katalysator sollte das Überpotenzial so klein wie möglich halten und so die eingefangene Solarenergie auch effizient nutzen.

Tatsächlich gibt es Halbleitermaterialien, die all diese Voraussetzungen erfüllen. Die künstliche Photosynthese ist also nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch möglich – zumindest im Labor. Schon vor etwa zehn Jahren hat John Turner vom U. S. National Renewable Energy Laboratory in Boulder (Colorado) das erste funktionierende »künstliche Blatt« entwickelt. Es enthielt allerdings teure Materialien wie Platin. Außerdem nahm der Katalysator bei der Wasserspaltung Schaden. Das System hatte deshalb nur eine Lebensdauer von etwa 20 Stunden.

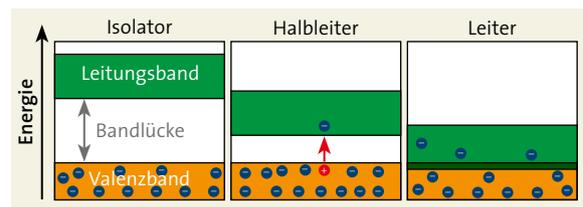
Vor zwei Jahren stellte das Team von Daniel Nocera am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge dann eine modernere Version vor. Sie besteht aus einer Solarzelle,

Bändermodell von Festkörpern

Die Elektronen, die den Kern eines Atoms umgeben, halten sich bevorzugt in charakteristisch geformten Raumbereichen auf, die Chemiker als Orbitale bezeichnen. Jedes solche Orbital hat eine bestimmte Energie und kann gemäß einem von Wolfgang Pauli (1900–1958) entdeckten Prinzip von höchstens zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin (Eigendrehimpuls) besetzt sein. Wenn sich zwei Atome verbinden, entstehen aus den Orbitalen der beiden an der Bindung beteiligten Elektronen zwei »Molekülorbitale«, die beiden Atomen gemeinsam sind. Eines davon hat eine geringere und das andere eine höhere Energie als die Ausgangsorbitale. Die beiden Bindungselektronen besetzen das energetisch tiefer gelegene »bindende« Molekülorbital, während das andere, »antibindende«, leer bleibt.

Wenn sich nun zahlreiche Atome über chemische Bindungen zu einem ausgedehnten Festkörper vereinigen, entstehen entsprechend viele Molekülorbitale mit jeweils unterschiedlichen Energien, die sich über den gesamten Festkörper erstrecken. Benachbarte Energieniveaus liegen dabei allerdings so dicht beieinander, dass sie praktisch miteinander verschmelzen. So entsteht ein durchgehendes Energieband. Das aus den bindenden Orbitalen gebildete, mit Elektronen gefüllte Band nennt man Valenzband. Ihm steht das aus den antibindenden Orbitalen hervorgegangene, leere Leitungsband gegenüber.

Voraussetzung für einen elektrischen Stromfluss ist, dass sich Elektronen frei über den gesamten Festkörper bewegen können. Dazu müssen sie aus dem Valenz- in das höher gelegene Leitungsband übergehen. Die Energiedifferenz zwischen beiden bezeichnet man als Bandlücke. Diese ist null, wenn sich die zwei Bänder überschneiden. Dann erfordert der Übergang eines Elektrons ins Leitungsband nur einen minimalen Energiebetrag, der als Wärmeenergie jederzeit zur Verfügung steht – das betreffende Material ist ein elektrischer Leiter. Bei kleinen bis mittleren Bandlücken muss mehr Energie zugeführt werden, damit Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband »springen« können. Man spricht deshalb von Halbleitern. Isolatoren schließlich haben eine so große Bandlücke, dass sie schmelzen oder sich zersetzen, bevor ihre Wärmeenergie ausreicht, Elektronen ins Leitungsband anzuheben.



Nichtleiter, Halbleiter und Leiter unterscheiden sich in der Größe der Bandlücke und damit in der Energie, die nötig ist, ein Elektron vom Valenz- ins Leitungsband zu heben.

in der auftreffendes Sonnenlicht auf die übliche Weise freie Elektronen und Löcher erzeugt. Die dem Licht zugewandte Seite ist mit einem kobalthaltigen Katalysator beschichtet, der mit Hilfe der Löcher aus Wasser Sauerstoff freisetzt. Die zurückbleibenden Protonen wandern zur anderen Seite und werden dort von einer Legierung aus Nickel, Molybdän und Zink mit Hilfe der Elektronen zu Wasserstoff reduziert.

An Stelle von teurem Platin enthält Noceras System also preiswertere und in größeren Mengen vorhandene Metalle; außerdem ist der Kobaltkatalysator selbstheilend und hat deshalb eine längere Lebensdauer. In der geschilderten Konfiguration beträgt der Wirkungsgrad 2,5 Prozent; wird die Nickellegierung nicht direkt auf die Solarzelle aufgetragen, sondern per Draht mit ihr verbunden, erreicht er sogar 4,7 Prozent.

Die relativ geringe Lichtausbeute hängt unter anderem mit dem Überpotenzial bei der Wasseroxidation zusammen, das selbst mit einem teuren Rutheniumkatalysator noch sehr hoch ist: Es beträgt mindestens 0,3 Volt. Dabei handelt es sich um Energie, die in Wärme verwandelt wird und dem Prozess verloren geht. Bei 1,23 Volt idealer Spannung zur Wasserspaltung beträgt dieser Verlust also mindestens 25 Prozent – deutlich zu viel.

Ein metallfreier Fotokatalysator

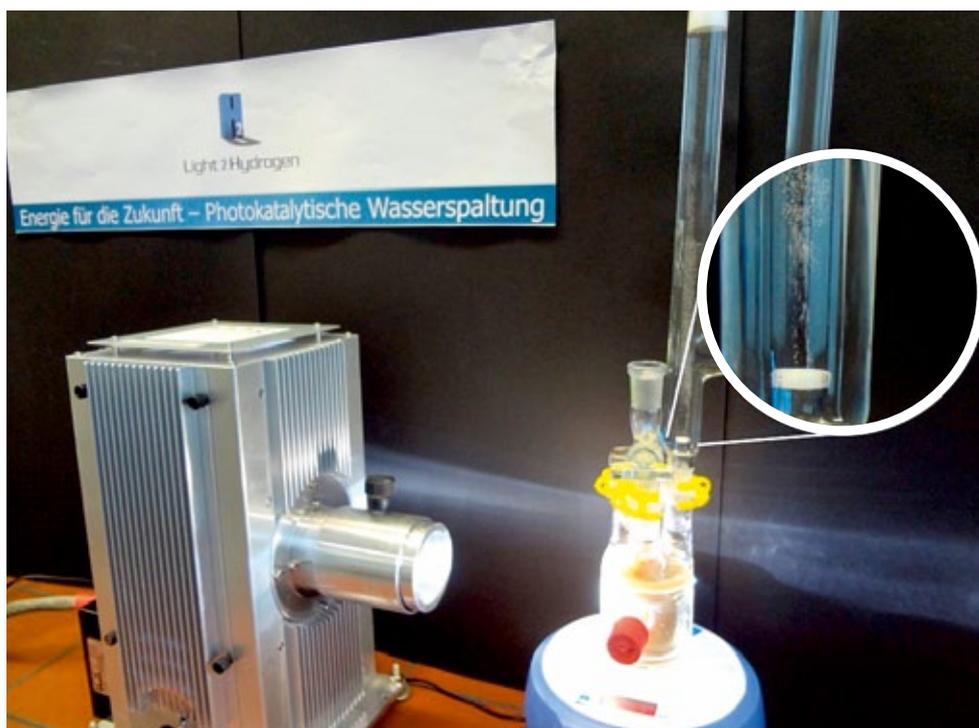
In unserer Arbeitsgruppe verfolgen wir eine völlig andere Strategie. Wir entwerfen kostengünstige Fotokatalysatoren, die auf polymeren Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen beruhen und deshalb im Idealfall ganz ohne seltene oder giftige Metalle auskommen. Hierbei machen wir von einem der ältesten Kunststoffe überhaupt Gebrauch: dem polymeren Kohlenstoffnitrid.

Die Substanz wurde erstmals 1834 von Jöns Jakob Berzelius (1779–1848) beschrieben und von Justus von Liebig (1803–1873) »Melon« genannt. Als Jahrmarktsattraktion ist sie aber wohl noch viel älter. Sie bildet sich beim Anzünden einer Quecksilberverbindung (Quecksilberrhodanid, $\text{Hg}(\text{SCN})_2$) als stark aufquellende schlangenartige Asche, was ihr die Bezeichnung »Schlange des Pharaos« eintrug.

Liebig stellte Melon aus Kaliumrhodanid (KSCN) und Ammoniumchlorid (NH_4Cl) her. Die genaue Struktur von Kohlenstoffnitrid ist bis heute umstritten. Allerdings bildet das graphitische C_3N_4 , kurz g- C_3N_4 , wohl die stabilste Form. Dabei handelt es sich um ein zweidimensionales Material mit starker Ähnlichkeit zum Graphen, dem großen Hoffnungsträger der künftigen Nanoelektronik (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 86). Nur ist jedes zweite Kohlenstoffatom darin durch ein Stickstoffatom ersetzt, und es gibt regelmäßige Ausparungen im zweidimensionalen atomaren Gitternetz.

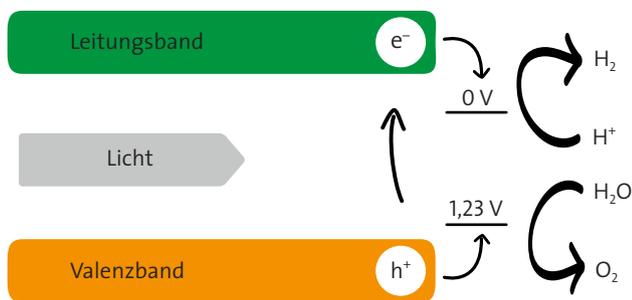
Das verleiht dem Kohlenstoffnitrid andere elektronische Eigenschaften. So handelt es sich bei Graphen um ein Halbmetall ohne Bandlücke, das sich deshalb nicht ohne Weiteres als Transistormaterial eignet. Dagegen ist g- C_3N_4 ein Halbleiter mit einer mittleren Bandlücke von etwa 2,3 Elektronvolt. Außerdem hat diese Lücke, absolut betrachtet, die richtige Position, damit die Wasserspaltung thermodynamisch ablaufen kann: Das Potenzial des Leitungsbandes ist positiver als das der Protonenreduktion und das Potenzial des Valenzbandes negativer als das der Wasseroxidation.

Das war einer der Gründe, warum wir uns für dieses Molekül entschieden haben. Außerdem ähnelt es in seiner Struktur dem pflanzlichen Fotosyntheszentrum. Beide sind durch abwechselnde (»konjugierte«) C-N-Doppelbindungen gekennzeichnet. Tatsächlich haben wohl nur solche Mole-



Eine Tablette aus graphitischem Kohlenstoffnitrid zerlegt bei Belichtung Wasser in Wasserstoff- und Sauerstoffgas, das in Blasen aufsteigt.

TU BERLIN / WWW.LICHTHYDROGEN.DE



Im Kohlenstoffnitrid sind wie bei Halbleitern Valenz- und Leitungsband durch eine Lücke getrennt. Diese hat nicht nur die nötige Breite, sondern auch die richtige Lage, damit durch Licht in das Leitungsband beförderte Elektronen (e^-) Protonen zu Wasserstoff reduzieren und die zugehörigen Löcher (h^+) im Valenzband gleichzeitig Wasser zu elementarem Sauerstoff und Protonen oxidieren können.

küle unter allen organischen Substanzen die nötige Stabilität und die richtige Bandlücke, um Wasser fotochemisch zu spalten. Kohlenstoffnitrid wäre dabei ein typisches Massenprodukt: Es lässt sich heutzutage aus CO_2 und Ammoniak (oder Harnstoff) zum Preis von wenigen Euro pro Kilogramm herstellen. Damit kann es getrost als nachhaltig gelten. Außerdem ist es chemisch und thermisch außerordentlich beständig. So zersetzt es sich selbst dann nicht, wenn es an der Luft auf bis zu 600 Grad Celsius erhitzt wird.

Steigerung der Quantenausbeute

Allerdings zeigt C_3N_4 als solches nur eine recht geringe katalytische Aktivität. Das liegt unter anderem daran, dass es durch sein niedriges Verhältnis von Oberfläche zu Volumen wenig Grenzfläche bietet, an der die Reaktion ablaufen kann. Außerdem sind einige der im Verlauf der Katalyse vorübergehend gebildeten chemischen Bindungen zu fest und lassen sich deshalb schlecht wieder lösen.

Eines der Hauptziele unserer Forschung ist es folglich, die Porosität des Materials und damit seine innere Oberfläche zu vergrößern, um die Ladungstrennung zu beschleunigen. Das gelingt beispielsweise, indem wir die Substanz auf einer Schablone herstellen, die regelmäßige nanometergroße Strukturen enthält. Wird diese Schablone dann entfernt – etwa mit einem Lösungsmittel –, bleibt ein entsprechend löchriges Kohlenstoffnitrid zurück. Allein dadurch konnten wir die katalytische Aktivität des Materials bereits verzehnfachen.

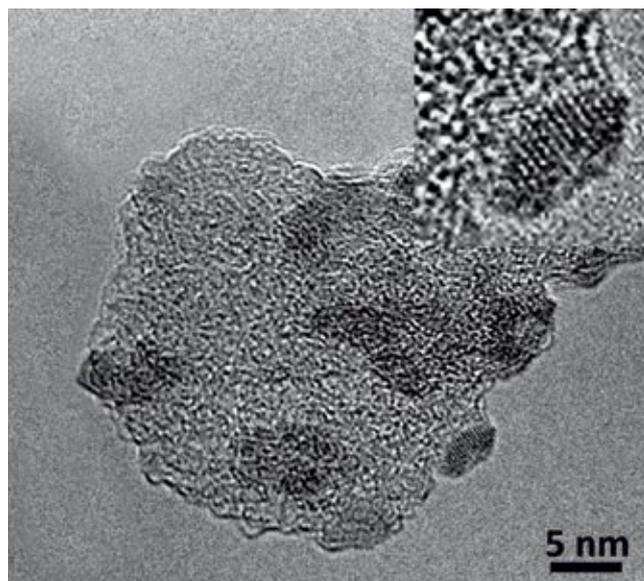
Eine weitere Verbesserung erreichten wir durch die Dotierung. Dazu brachten wir geeignete andere Moleküle in das Polymer ein – beispielsweise Barbitursäure, einen Abkömmling des Harnstoffs. Das gelingt auf einfache Art, indem man dem Ausgangsmaterial für die Kohlenstoffnitridsynthese kleine Mengen der Fremdsubstanz zufügt. Durch die Dotierung mit Barbitursäure erhöht sich die Lichtaufnahme im sichtbaren Teil des Spektrums, was die Quantenausbeute mit Sonnenlicht steigert.

Auf ähnliche Weise lässt sich Kohlenstoffnitrid mit Schwefel dotieren, indem man bei der Synthese einen kleinen Teil des Harnstoffs durch Thioharnstoff ersetzt. Das steigert die Aktivität des Katalysators für die Wasseroxidation. Dadurch erreichten wir bei dieser Teilreaktion bereits eine Quantenausbeute von beachtlichen 5,8 Prozent für violette Strahlung von 440 Nanometern Wellenlänge.

Auch Kompositmaterialien, bei denen wir C_3N_4 mit anorganischen Substanzen kombinieren, erscheinen viel versprechend. So konnten wir ein System aus Kohlenstoffnitrid und feinsten Kobaltoxidteilchen herstellen, wobei Letztere die Freisetzung von Sauerstoff vereinfachen. Die Quantenausbeute dieses Materials beträgt 1,1 Prozent für die gesamte Wasserspaltung. Das ist zwar noch nicht berauschend, aber immerhin schon deutlich höher als die 0,3 Prozent der natürlichen Photosynthese. Vor Kurzem berichtete außerdem ein Team um Jinhua Ye vom japanischen Nationalinstitut für Materialforschung in Tsukuba, dass Kohlenstoffnitrid in Kombination mit stickstoffdotierter Tantsäure eine hohe photokatalytische Aktivität und eine beachtliche Stabilität bei der Wasserstoffherzeugung zeigt. Mit Methanol als Wasserstoffquelle betrug die Quantenausbeute bei Bestrahlung mit violettem Licht bis zu 4,8 Prozent.

Insgesamt sehen die bisherigen Ergebnisse also ermutigend aus. Auch andere Forschergruppen arbeiten schon seit einiger Zeit am Kohlenstoffnitrid. Mit dem zunehmenden Interesse an dem Material hat sich in den letzten Jahren das Tempo beschleunigt, in dem Fortschritte erzielt wurden. Dabei stehen wir erst am Anfang, und die großen Durchbrüche dürften noch vor uns liegen.

Trotzdem ist der Weg bis zur kommerziellen Einsatzreife wohl noch lang. Realistischerweise sind mindestens 20 Jahre



Die dunklen Flecken auf dieser elektronenmikroskopischen Aufnahme sind Nanoteilchen aus Kobaltoxid. Eingebettet in Kohlenstoffnitrid, erhöhen sie dessen Lichtausbeute bei der Wasserspaltung.



zu veranschlagen, bis die künstliche Fotosynthese auch wirtschaftlich sein wird. Ihre technische Machbarkeit steht jedoch außer Frage. Die Aufgabe lässt sich in viele kleine Teilprobleme aufteilen, von denen jedes einzelne im Prinzip mit heutigen Techniken bereits lösbar ist. Letztlich geht es also nur um Optimierungen.

Der wichtigste Kampf des 21. Jahrhunderts

Die Teilaspekte des Problems interdisziplinär in einer koordinierten Anstrengung zu verfolgen, ist auch der Ansatz des Projekts »Light 2 Hydrogen – Energie für die Zukunft – Photokatalytische Wasserspaltung«, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit einem Betrag von zehn Millionen Euro über fünf Jahre gefördert wird. In seinem Rahmen arbeiten sieben Forschungszentren in den neuen Bundesländern, darunter auch unseres, unter anderem über Theorie und Modellierung der Wasserspaltung, Entwicklung und Optimierung geeigneter Katalysatoren, chemische Wasserstoffspeicherung sowie Entwurf und Vermarktung von Prototypen.

Außerhalb Deutschlands gibt es ähnliche Initiativen. Zu den größten weltweit gehört sicherlich das Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP) in den USA. Unterstützt vom Energieministerium mit 122 Millionen Dollar über einen Zeitraum von fünf Jahren, koordiniert es die Arbeit von weit über 100 Wissenschaftlern aus fünf Institutionen. Unsere Nachbarn in Holland haben ebenfalls ein der künstlichen Fotosynthese gewidmetes fünfjähriges Forschungsprogramm namens BioSolar Cells mit einem Budget von 42 Millionen Euro gestartet. Auch im asiatischen Raum gibt es entsprechende Vorhaben. So wurde 2009 in Südkorea das Korean Centre for Artificial Photosynthesis (KCAP) gegründet. In China beschäftigt sich das Institute for Clean Energy der chinesischen Akademie der Wissenschaften mit der künstlichen Fotosynthese, und Japan erforscht im Rahmen der World Premier International Research Center Initiative die Solarenergie. Viele weitere Projekte ließen sich anführen.

»Der härteste und wichtigste Kampf des 21. Jahrhunderts wird ohne Waffen geführt. Die Werkzeuge dieses Kampfes heißen: Energieeffizienz, Energie sparen und erneuerbare

Energien«, sagte 2007 der Journalist und Buchautor Franz Alt. Es ist aber nicht nur ein Ringen um die besten Konzepte, sondern auch um gesellschaftliche Weichenstellungen, die wirtschaftliche Interessen berühren. Künstliche Bäume – ebenso wie Windräder und Fotovoltaikanlagen mit nachgeschalteter Wasserelektrolyse – könnten den einzelnen Bürger oder ganze Gemeinden energieautark machen und damit den Energiekonzernen die Geschäftsgrundlage entziehen. Das würde für die Energiewirtschaft sicher eine ähnliche Revolution bedeuten wie die Einführung der Smartphones für die Kommunikationsbranche. Hausbesitzer könnten sich aus ihren eigenen Anlagen mit Energie eindecken, wenn die Sonne scheint oder der Wind bläst. Voraussetzung wäre, dass solche Anlagen durch den technischen Fortschritt preiswert genug geworden sind, dass sich ihre Anschaffung für Privatpersonen lohnt. Werden die Konzerne, die derzeit die Energie- und Treibstoffmärkte beherrschen, eine solche Entwicklung unterstützen oder ihr massiven politischen Widerstand entgegensetzen?

Als Forscher können wir nur auf Möglichkeiten hinweisen. Ihre Realisierung ist Sache der Gesellschaft – und letztlich des mündigen Bürgers. ~

DIE AUTOREN



Stephanie Wohlgenuth hat an der University of Cambridge (England) Chemie studiert und am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Golm promoviert.

Markus Antonietti ist einer der Direktoren des Instituts, an

dem er die Abteilung »Kolloidchemie« leitet. Daneben hat er seit 2005 eine Professur für Kolloidchemie an der Universität Potsdam inne. Nach dem Studium der Physik und Chemie sowie Promotion und Habilitation an der Universität Mainz war er aber 1991 zunächst Professor an der Universität Marburg, ehe er 1993 nach Golm berufen wurde.

QUELLEN

Li, Q. et al.: Carbon Nitride Polymers Sensitized with N-Doped Tantalum Acid for Visible Light-Induced Photocatalytic Hydrogen Evolution. In: Journal of Physical Chemistry C 114, S. 4100–4105, 2010

Liu, G. et al.: Unique Electronic Structure Induced High Photoreactivity of Sulfur-Doped Graphitic C_3N_4 . In: Journal of the American Chemical Society 132, S. 11642–11648, 2010

Wang, Y. et al.: Polymeres graphitisches Kohlenstoffnitrid als heterogener Organokatalysator: von der Photochemie über die Vielzweckkatalyse hin zur nachhaltigen Chemie. In: Angewandte Chemie 124, S. 70–92, Januar 2012

Wang, X. et al.: Polymer Semiconductors for Artificial Photosynthesis: Hydrogen Evolution by Mesoporous Graphitic Carbon Nitride with Visible Light. In: Journal of the American Chemical Society 131, S. 1680–1681, 2009

Zhang, J. et al.: Photocatalytic Oxidation of Water by Polymeric Carbon Nitride Nanohybrids Made of Sustainable Elements. In: Chemical Science 3, S. 443–446, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201692

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Was können die Materialien der Zukunft?
Woraus bauen wir die Welt von morgen?
Wie entstehen neue Materialien?

Do **24.10.2013 / 19.00 / HANNOVER**
„STILL LIVING IN A MATERIAL WORLD“ –
Woraus bauen wir die Zukunft?

MIT **Prof. Dr. Paul Blom** Max-Planck-Institut für Polymerforschung, **Prof. Dr. Gianaurelio Cuniberti** Technische Universität Dresden, **Wolfgang Müller-Pietralla** Trendforscher, Volkswagen AG, **Dr. Robert Spatschek** Max-Planck-Institut für Eisenforschung

MODERIERT VON **Dr. Daniel Lingenhöhl** Spektrum der Wissenschaft

VERANSTALTUNGSORT Tagungszentrum Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG mensch@volkswagenstiftung.de

MEHR INFOS www.volkswagenstiftung.de/veranstaltungen und www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Die Bergung der Costa Concordia

Die letzten Vorbereitungen laufen: Noch im Spätsommer soll das 2012 havarierte Kreuzfahrtschiff »Costa Concordia« gehoben werden. Wenn es gelingt, ist es eine technische Meisterleistung.

Von Barbie Latza Nadeau

Am 13. Januar 2012 lief das Kreuzfahrtschiff Costa Concordia vor der Insel Giglio, rund 20 Kilometer vor Italiens Westküste, auf Grund. Innerhalb weniger Minuten kippte der 290 Meter lange Riese auf die Seite. 32 Menschen starben, 64 wurden schwer verletzt. Seitdem liegt das Wrack gut sichtbar in etwa 20 Meter tiefem Wasser, wo es die Umwelt gefährdet und der Tourismusindustrie der Insel schadet.

Zwar hatten Ingenieure schon bald versucht, den stark in Mitleidenschaft gezogenen Luxusliner wieder aufzurichten, um ihn zu bergen. Doch mit jeder Welle, die den Rumpf traf,

ächzte und schwankte das Schiff, das an der Kante eines unterseeischen Abhangs liegt, der mehr als 60 Meter steil abfällt. Zerbricht die Costa Concordia oder rutscht sie in die Tiefe, droht das Pelagos-Schutzgebiet für Meeressäuger zu verschmutzen. Es ist das größte seiner Art in europäischen Gewässern und ein Zufluchtsort für Delfine, Schweins- und Zwergwale. Grandiose Korallenriffe wachsen direkt unterhalb des Ozeanriesen.

Die Gefahr ist groß, denn obwohl der Treibstoff aus den Tanks abgepumpt wurde, enthält das Wrack immer noch Mengen an Diesel und Schmierstoffen in den sechs Motoren



und im Maschinenraum, zudem tausende Liter diverser Chemikalien, von Putzmitteln bis hin zu Farben. Das Schiff hatte überdies erst drei Stunden vor der Havarie genug Nahrung aufgenommen, um 4229 Menschen zehn Tage lang zu versorgen. All das verrottet nun in den Vorratsräumen. Und tonnenweise verrosteten die stählernen Bestandteile der Costa Concordia.

Normalerweise werden Wracks dieser Größe einfach gesprengt und so versenkt. Doch das italienische Umweltministerium unterstützte die Bewohner von Giglio und verlangte vom Eigentümer Costa Cruises, das Schiff zu bergen. Zudem möchte die Polizei das Wrack als Tatort in Augenschein nehmen, sobald es gesichert ist; es könnte Beweise gegen Kapitän Francesco Schettino liefern, der wegen fahrlässiger Tötung vor Gericht steht. Auch werden immer noch zwei Leichen vermisst.

Zwei Bergungsunternehmen wurden beauftragt: Tat-Salvage aus Florida und der italienische Spezialist für Unterwasserkonstruktionen Micoperi. Die Leitung obliegt dem 51-jährigen Südafrikaner Nick Sloane, einem erfahrenen Problemlöser bei einigen der größten Schiffsunglücke der jüngeren Vergangenheit. Dabei konnte er allerdings mit Sprengstoff arbeiten. Die Komplettbergung erfordert eine ganz andere Strategie (siehe die folgende Doppelseite).

Der Plan sieht vor, das Wrack mit Flaschenzügen und Kabeln von den Felsen zu ziehen und aufzurichten. Sloane schätzt, dass das acht Stunden dauern wird. »Danach über-

nimmt die Schwerkraft«, erklärt er. »Wenn wir alles korrekt gemacht haben, richtet sich das Schiff von allein auf und ruht dann auf sechs Unterwasserplattformen.«

Die bestehen aus mehr Stahl als der Pariser Eiffelturm. Doch das ist noch keine Garantie, dass sie nicht brechen und der 114 000-Tonnen-Gigant dann in die Tiefe rutscht, alles zermalmend, was seinen Weg kreuzt. Er könnte aber auch schon beim Aufrichten unter seinem eigenen Gewicht zerbersten. Bereits jetzt leidet das maritime Ökosystem unter dem Lärm und der Verschmutzung, die mit den Bergungsarbeiten einhergehen. »Der Rumpf wurde nicht für derartige Eingriffe konstruiert«, erklärt Sloane. »Wenn wir ihn anheben, werden wir sehr wahrscheinlich hören, dass sich innere Strukturen verdrehen und zerreißen.« Seit ein paar Monaten sichert und verstärkt die Crew deshalb die Außenhaut des Schiffs.

Inzwischen ist klar, dass das Unternehmen weit komplexer ist, als bei der Planung angenommen. So dürften sich die Kosten statt auf 236 eher auf 500 Millionen Euro belaufen. Selbst wenn Sloane & Co. Erfolg haben, ist die Arbeit noch nicht vorüber. Der Bergungsvertrag verlangt, dass die Plattformen wieder entfernt werden. Auch müssen alle Bohrlöcher, in denen sie verankert wurden, verfüllt werden. Sloane wollte diese Strukturen vor Ort belassen – zur Schulung von Bergungsteams. Doch die Bewohner Giglios wollen kein Mahnmal für den Tag, an dem ihr idyllisches Eiland ruiniert wurde. >>



Ein Problem für den Tourismus, ein Risiko für die Umwelt, eine Herausforderung für die Bergungsfirmen – die gesunkene Costa Concordia vor der italienischen Insel Giglio.

AUFRICHTEN UND ABSCHLEPPEN

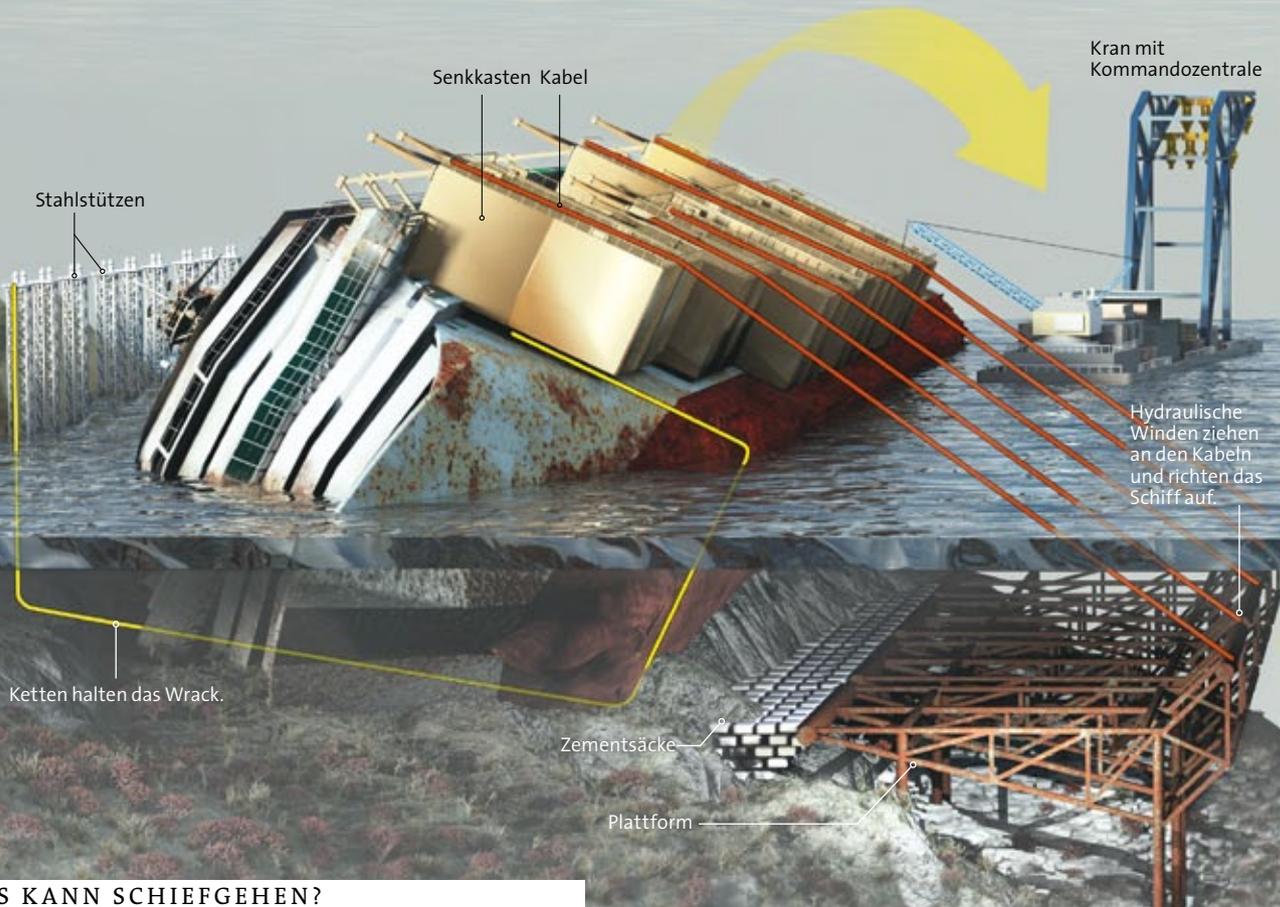
Die **Costa Concordia** liegt auf der Seite, aufgespießt auf zwei großen Felsspitzen; sie muss also befreit und aufgerichtet werden. Bergungsmannschaften haben deshalb zuerst zwölf Stahlstützen in den Untergrund gerammt und das Schiff mit Ketten umgürtet, damit es nicht weiter abrutscht (1). Dann verankerten Arbeiter sechs Stahlplattformen im Granit des Inselsockels, auf denen das Kreuzfahrtschiff landen soll. Außerdem versenkten sie tausende Zementsäcke, um den felsigen Untergrund einzuebnen. Zudem verstärkten sie die noch oberhalb der Wasserlinie lie-

gende Außenhülle, damit diese unter der Belastung nicht zerbricht. An der Schiffswand wurden des Weiteren Senkkästen – auch Caisson genannt – angebracht. Das sind rund 30 Meter hohe hohle Kästen, die dosiert mit Wasser und Luft gefüllt werden – je mehr Gas sie enthalten, desto höher ist der Auftrieb des Wracks.

Um das Schiff zu kippen – die Ingenieure nennen diese Rotation »parbuckling« –, ziehen hydraulische Winden an den Seilen, mit

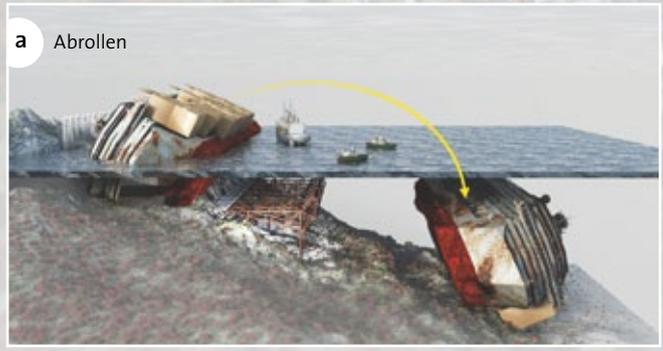
1 Stabilisierung

2 Aufrichten



WAS KANN SCHIEFGEHEN?

Das havarierte Schiff hängt instabil auf einem steil abfallenden Fels- hang fest, der noch weit gehend intakte Korallenriffe, Seegraswiesen und Laichgründe umfasst. Jeder Fehler bei der Bergung könnte eine Umweltkatastrophe auslösen. Bei zu starkem Zug etwa könnte das Schiff über die Plattformen und den Ab- hang hinunter rollen (a). Sollten die Plattfor- men unter dem Gewicht des Luxusliners zu- sammenbrechen, rutscht er ab (b). Auch könnte die schwer beschädigte Außen- haut beim Anheben unter dem eigenen Gewicht zusammenbrechen (c).



ILLUSTRATIONEN: DON FOLEY

denen Senkkästen und Plattformen verbunden sind. Ein Kran, in dem sich auch die Kommandozentrale des Bergungsteams befindet, unterstützt beim Aufrichten und Stabilisieren (2). Mikrofone und Kameras im Wrack sollen etwaige Risse und Brüche beim Aufrichten zeigen. Schweißer verstärken dann die demolierte Seite, um auch dort Senkkästen anzubringen (3). Anschließend wird das Wasser langsam aus diesen gepumpt, bis die Costa Concordia vom Grund abhebt und an die Schleppleinen genommen werden kann (4).

DIE AUTORIN



Die Journalistin **Barbie Latza Nadeau** leitet das Büro von »Newsweek« in Rom.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201693

3 Verstärken der Außenhülle

Anbringen weiterer Senkkästen auf der beschädigten Seite



4 Abtransport

Ausblasen der Senkkästen gibt Auftrieb.

Abschleppen des Wracks



b Weggleiten



c Auseinanderbrechen



Die Augen des Stiers

Das menschliche Auge kann polarisiertes Licht nicht ohne Weiteres von unpolarisiertem unterscheiden. Ein »Berry-Sandwich« hilft.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Am Anfang stand eine recht simple Beobachtung. Ein Kollege berichtete mir, wie er durch die Fensterscheiben eines Gebäudes eine städtische Szenerie betrachtete, die sich gleichzeitig auf den glatten Fliesen der Wand spiegelte, neben dem er stand (Foto unten links). Das allein war nichts Besonderes, und auch nicht die leichten Verzerrungen der gespiegelten Objekte. Sie zeigten nur, dass die Oberfläche der Fliesen zwar glatt war, aber wohl nicht ganz eben. Merkwürdig erschien ihm jedoch, dass die Spiegelbilder der Gegenstände von lebhaften farbigen Strukturen ornamentiert erschienen und die üblichen Erklärungsansätze nicht so recht greifen wollten.

Beim Betrachten der Fotos, die er mir zur Aufklärung des Rätsels schickte, fiel mir zuerst die Ähnlichkeit mit dünnen Ölschichten auf nasser Straße auf, die durch Interferenz irisierende Farben hervorbringen. Weil aber die Farbmuster so auffällig waren – bei nähe-

rem Hinsehen zeigten sich zwei Systeme aus konzentrischen Kreisen (unten rechts) –, kam mir eine andere Idee in den Sinn: Zeigt sich in den Farben vielleicht die Polarisation des Sonnenlichts? Schließlich erscheinen auch transparente Plastikobjekte wie etwa CD-Hüllen farbig, wenn sie von polarisiertem Licht beschienen werden.

Mit einem Polarisations- oder kurz Polfilter überprüfte ich den Gedanken. Von einfallendem Licht, das in allen Ebenen senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung schwingt, lässt ein solcher Filter nur die Komponente hindurch, die genau in einer bestimmten schwingt. Ich ließ also polarisiertes Licht durch einen solchen Filter auf Fliesen fallen – und betrachtete ernüchert das Ergebnis: Von Farben keine Spur. Das Phänomen, das ich zu verstehen suchte, blieb vorerst rätselhaft.

Erst Jahre später bahnte sich eine Lösung an. Als ich in einem Nahverkehrszug saß, spiegelte sich auf einer gläser-

nen Trennscheibe in seinem Inneren die vorbeiziehende Landschaft. Betrachtete ich sie unter einem bestimmten Winkel, war sie mit einem ebenso charakteristischen Farbmuster verziert wie einst die Fliesen. Kam es etwa nur darauf an, dass das einfallende Licht erst einmal ein Fenster passiert? In diesem Fall müssten wir das Phänomen aber praktisch überall beobachten – was nicht der Fall ist.

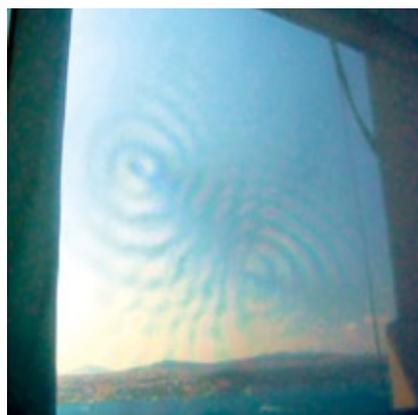
Wieder einige Zeit später entdeckte ich, dass die Farben nur in bestimmten Waggons neueren Baujahrs auftraten. Und schließlich stieß ich auf den entscheidenden Hinweis. Vandalen hatten eines der Waggonfenster zu zerkratzen versucht und dabei die transparente Plastikfolie beschädigt und sichtbar gemacht, mit denen das Fenster zum Schutz vor genau solchen Versuchen überzogen war.

Glücklicherweise kannte ich ein Laborexperiment, das auf die Situation zu passen schien. Kein Geringerer als Sir Michael Berry von der britischen University of Bristol, bekannt für wegweisende Arbeiten in der Quantenmechanik und der semiklassischen Physik, hatte Ende der 1990er Jahre zusammen mit Kollegen mit Overheadfolien herumexperimentiert. Unter anderem schlug er vor, man könne eine solche Folie zwischen zwei gekreuzte Polfilter legen und durch dieses »Sandwich« hindurch auf die Welt blicken.

Passiert Licht zwei hintereinander geschaltete Polfilter, hängt alles davon ab, wie deren Polarisations Ebenen zueinander orientiert sind. Bei paralleler Orientierung tritt das Licht auch durch den zweiten Filter, weil es ja bereits passend polarisiert ist. Verdreht man aber die zweite Folie um 90 Grad, so stoppt

Alles erhält – wie Edelsteine – erst durch die untergelegte Folie tiefere Bedeutung.

Michel de Montaigne (1533–1592)



Das Bild einer städtischen Szenerie fällt durch ein Fenster und wird an einer gefliesten Wand gespiegelt (Foto links). Als kostenlose Dreingabe gibt es farbige Ornamente. Doch warum? Wer das Phänomen genauer untersucht, sieht (meist) ein typisches Muster aus zwei Systemen konzentrischer Kreise (rechts).



Auch ein Computermonitor strahlt polarisiertes Licht aus. Für diese Aufnahme, die ausgeprägte »bulls eyes« zeigt, wurde ein Berry-Sandwich verwendet, dem einer der Polfilter fehlte. Die Kamera blickte durch den anderen Filter, hinter dem die Overheadfolie lag.

sie das Licht – insgesamt gesehen sind die Folien nun undurchsichtig. Doch man sehe und staune: Folgt man Berrys Vorschlag und legt zwischen solcherart gekreuzte Filterfolien eine Overheadfolie, werden sie wieder durchsichtig. Wo sonst erlebt man, dass Undurchsichtiges nicht durch Entfernen eines Hindernisses, sondern durch sein Hinzufügen durchsichtig wird?

Die Welt, gesäumt von Farbstreifen

Es kommt sogar noch besser: Blickt man durch das Sandwich hindurch auf die Welt, erscheinen alle Objekte von leuchtend farbigen Streifen umgeben. Unter einem bestimmten Winkel erblickt man nun auch genau jenes Paar dunkel umrandeter »Augen«, das uns schon auf den Fliesen begegnet war. Berry nennt es »bulls eyes«, die Augen des Stiers.

Die Overheadfolie hat es also in sich. Sie verhält sich wie manche doppelbrechenden Kristalle, die das Licht je nach dessen Orientierung zur optischen Achse unterschiedlich brechen. Die meisten Overheadfolien besitzen zwei Achsen, ein Nebeneffekt ihres Herstellungsprozesses. Sie durchstoßen die Folie senkrecht genau dort, wo die Zentren der bulls eyes liegen.

Wo Licht gebrochen wird, ändert sich auch die Lichtgeschwindigkeit im Material. Infolge der Doppelbrechung durchquert also diejenige Schwingungskomponente der Lichtwelle, die parallel zu einer optischen Achse liegt, das Medi-

um mit einer anderen Geschwindigkeit als die zur Achse senkrechte Komponente. Treten die beiden Komponenten wieder aus der Overheadfolie aus, hat sich je nach Foliendicke eine mehr oder weniger große Phasendifferenz zwischen ihnen ausgebildet.

Davon würde man an sich noch nichts merken. Doch nun polarisiert der zweite Filter das Licht erneut. Die beiden phasenverschobenen Komponenten der Lichtwelle liegen dadurch nicht mehr in räumlich getrennten, voneinander unabhängigen Ebenen, sondern werden auf eine einzige Ebene projiziert, wo sie einander überlagern. Dabei interferieren einzelne Frequenzen, werden also in größerem oder kleinerem Maße verstärkt oder auch ausgelöscht, so dass das ursprünglich weiße Licht nun farbig erscheint.

Weil die dabei entstehende Farbe vom Winkelabstand des einfallenden Lichts zur optischen Achse abhängt, beobachten wir um jede der Achsen ein System farbiger Ringe, die sich noch dazu teilweise gegenseitig überlagern. Genau diese Interferenzstrukturen hatten wir bereits auf den Fliesen gesehen.

Im Zug sind, anders als bei Berrys Experiment, aber keine Polarisationsfilter im Spiel. Das ist auch gar nicht nötig. Denn die Komponente des Himmelslichts, die von den Luftmolekülen senkrecht zu dessen Einstrahlungsrichtung gestreut wird, ist bereits polarisiert. Der zweite Filter erübrigt sich ebenfalls, denn auch Reflexion an glatten Flächen,

ob Fliesen oder Scheiben, polarisiert das Licht zu einem gewissen Grad. Nur für eine Fensterfolie mit passenden Eigenschaften muss gesorgt sein. Erstaunlich, dass sich eine so künstlich anmutende Konstruktion wie das Berry-Sandwich tatsächlich im Alltag wiederfindet!

Ohne technisches Gerät sind Menschen nicht in der Lage, polarisiertes Licht von unpolarisiertem zu unterscheiden, vom Haidinger-Büschel einmal abgesehen, einer unter bestimmten Umständen im Auge entstehenden optischen Wahrnehmung. Die wenigsten wissen darum, dass von Wasserflächen, manchen Pflanzen oder eben Fliesen polarisiertes Licht ausgeht. Mit einem Polfilter kann das aber jeder selbst überprüfen.

Noch besser gelingt das mit einem 2/3-Berry-Sandwich, dem einer der beiden Polarisationsfilter fehlt. Blickt man nun durch den verbleibenden Filter hindurch, hinter dem die Overheadfolie liegt, erscheinen die Augen des Stiers – zumindest wenn man ein wenig mit dem Blickwinkel experimentiert – bei allen Objekten, aus deren Richtung polarisiertes Licht eintrifft. Die so ins Spiel gebrachten Farben machen selbst geringe Schwankungen der Polarisation sichtbar, anders als ein Polfilter, der oft nur einen geringen Hell-Dunkel-Kontrast liefert. ~

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

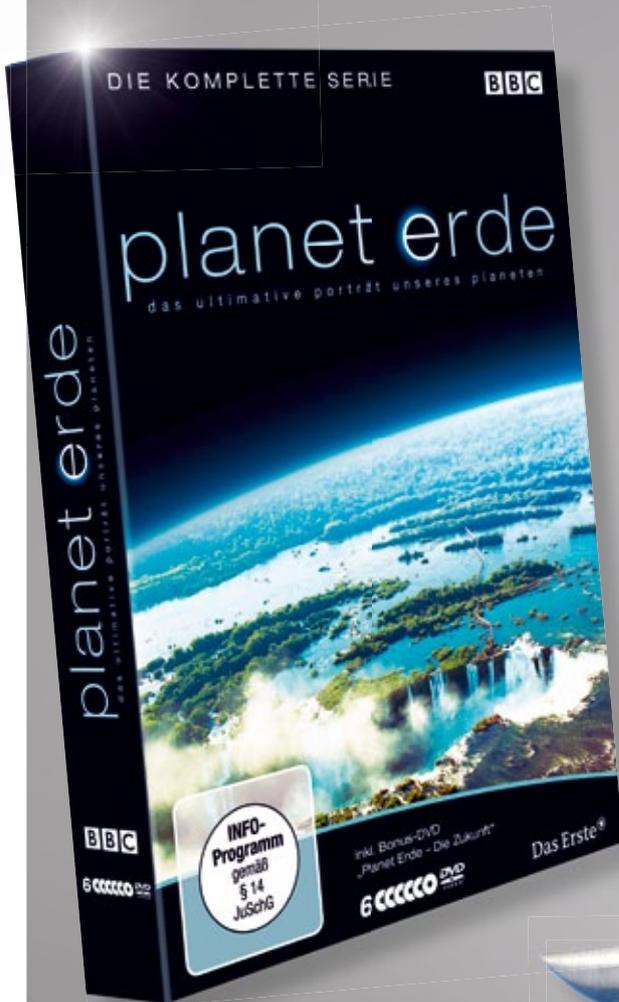
Berry, M. et al.: Black Plastic Sandwiches Demonstrating Biaxial Optical Anisotropy. In: European Journal of Physics 20, S. 1–14, 1999

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201695

WISSENSCHAFTLER UND NOBELPREIS-TRÄGER IN IHREM BRIEFKASTEN.

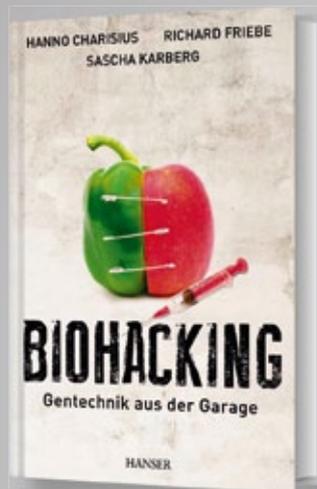
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT-Abo mit exklusiven Extras



1. DVD-Set »Planet Erde«

Diese Filme sprengen alle bisherigen Grenzen der Naturdokumentation. Sie zeigen unsere Welt, wie sie nie zuvor zu sehen war. 6 DVDs; Laufzeit: 495 Min.

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK.



2. Buch »Biohacking«

Die Garagen-Genforscher: Drei Wissenschaftsjournalisten versuchen sich als Amateurgenetiker und durchleuchten Chancen und Risiken der Do-it-Yourself-Biologie. Ein origineller und überraschender Lesespaß. 288 Seiten.



3. Opinel Messer

Robustes Outdoormesser mit rutschfestem Griff, Teilsägezahnung, integrierter Signalpfeife und Schäkelöffner. 8,5 cm lange Klinge aus modifizierten rostfreiem Sandvik Stahl.

So einfach erreichen Sie uns:

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

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Verpassen Sie keine Ausgabe des großen Wissensmagazins.

VORTEILSABO

ABOPLUS+ – EXKLUSIVE VORTEILE FÜR ABONNENTEN!

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft**
11 % günstiger und portofrei ins Haus.
Sie können jederzeit wieder kündigen.

+ WUNSCH-GESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten.

+ EXKLUSIVE ABOPLUS+-VORTEILE:

2 IN 1:

Sie erhalten nicht nur die Print-, sondern auch die digitale Ausgabe

KOSTENLOSER ARCHIV-ZUGANG

auf das komplette Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** ab 2004 mit über 9000 Artikeln

VERGÜNSTIGUNGEN:

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

EXTRAS:

ausgewählte Hefte zum kostenlosen Download.

MEHR UNTER:

WWW.SPEKTRUM.DE/ABOPLUS

SERIE ASTRONOMIE (VI)

Der Dunkle Kosmos

Gewöhnliche Materie scheint im Universum kaum eine Rolle zu spielen, vielmehr wird es laut aktuellen Theorien von unsichtbarer Dunkler Materie und Dunkler Energie dominiert. Mit raffinierten Beobachtungstechniken versuchen Forscher, diesen mysteriösen Phänomenen auf die Spur zu kommen.

Von Volker Springel

Am 14. Mai 2009 schießt fauchend eine Ariane-5-Rakete vom Europäischen Raumbahnhof Kourou in den Himmel. Im Gepäck hat sie den Satelliten »Planck«, der über mehrere Jahre hinweg die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung – das heiße Echo des Urknalls – auffangen und mit bahnbrechender Präzision vermessen soll. Etwa 60 Tage dauerte Plancks Reise zu seinem Bestimmungsort am so genannten Lagrange-Punkt 2, 1,5 Millionen Kilometer von unserem Planeten entfernt. Dort, auf der Nachtseite der Erde, heben sich die Fliehkraft und die Schwerkraft von Erde und Sonne gerade auf, so dass der Satellit kräftefrei schwebt. Dieser Ort ist ideal geeignet, um jenseits aller irdischen Störungen auf die schwachen Signale vom Ursprung unseres Universums zu lauschen.

Ein Jahr später, im Mai 2010, starten Wissenschaftler im Forschungszentrum Jülich unter meiner Beteiligung die Mil-

lennium-XXL-Simulation. 12388 Prozessoren von Juropa, einem der leistungsfähigsten Supercomputer der Welt, begannen, am bisher größten und detailreichsten Modell des Universums zu arbeiten. Die Rechnung geht von Plancks Beobachtungen der kosmischen Kinderstube aus und bestimmt, was sich daraus über einen Zeitraum von mehr als 13 Milliarden Jahren hinweg entwickelt. Der Computer arbeitet sich dabei durch Trilliarden von Rechenoperationen.

Beiden Projekten gemeinsam ist, dass sie nach einem tieferen Verständnis des so genannten kosmologischen Standardmodells suchen. In dieser Theorie wird das stoffliche Universum von einer geheimnisvollen Substanz dominiert, nämlich der Dunklen Materie. Ebenfalls im Spiel ist eine weitere, nicht minder seltsame Komponente, die der allgegenwärtigen Schwerkraft entgegenwirkt: die so genannte Dunkle Energie. Sie treibt das Universum auseinander und sorgt unter anderem dafür, dass in ferner Zukunft die Galaxien immer weiter voneinander fortgerissen werden.

Was wissen wir über diese Phänomene bereits? Und wie sollen wir die ersten Hinweise auf die mögliche Natur der Dunklen Materie interpretieren? Noch ist die Lage verworren und man fühlt sich an das Rätselduell in dem Roman »Der Kleine Hobbit« von J.R.R. Tolkien erinnert, in dem Smeagol Bilbo Beutlin fragt:

*Man kann es nicht sehen, kann's nicht aufstören,
kann es nicht fressen und kann's auch nicht hören,
liegt hinter den Sternen und unterm Gestein,
rieselt in alle Höhlen hinein,
kommt zuerst und folgt auch zuletzt,
löscht alles Leben, bis keiner mehr schwätzt.*

Während im Buch die richtige Antwort auf das Rätsel lautet: »Es ist die Dunkelheit«, fühlen sich heutige Astronomen dabei an Dunkle Materie und Dunkle Energie erinnert. Weil Physiker stets um Vereinfachung des Verständnisses der Natur bemüht sind, darf man aber davon ausgehen, dass sie

DIE SERIE IM ÜBERBLICK



DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER ASTRONOMIE

| | | |
|--------|--|----------------|
| Teil 1 | ▶ Heiße Stürme im Kosmos Gerhard Börner | April 2013 |
| Teil 2 | ▶ Giganten im All Gerhard Börner | Mai 2013 |
| | ▶ Zeugen des Urknalls Marek Abramowicz und Julia Tjus | |
| Teil 3 | ▶ Aus Staub geboren Thomas Henning | Juni 2013 |
| Teil 4 | ▶ Faszinierende Neue Welten Lisa Kaltenegger | Juli 2013 |
| Teil 5 | ▶ Das wechselhafte Leben der Sterne Ralf Launhardt | August 2013 |
| Teil 6 | ▶ Der Dunkle Kosmos Volker Springel | September 2013 |

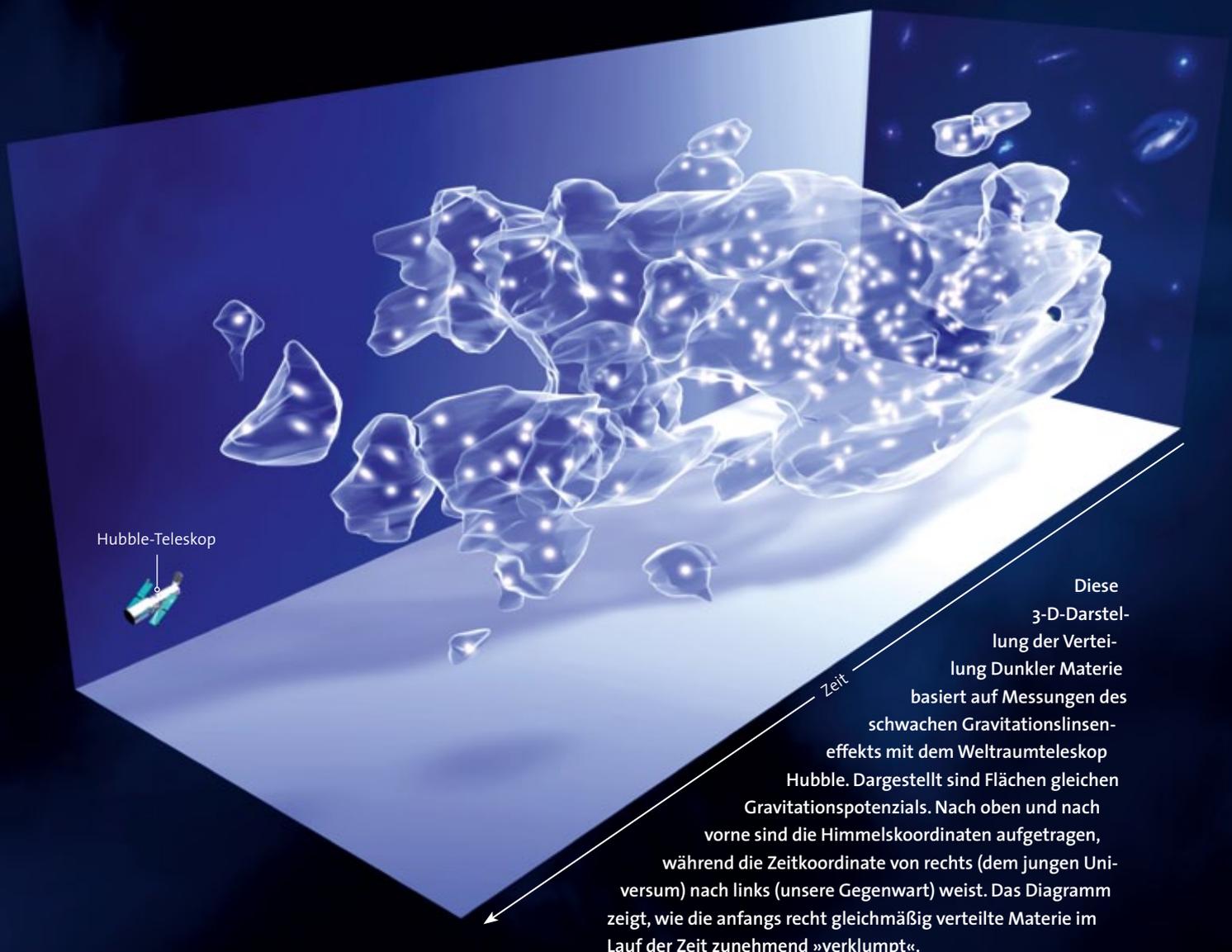
diese fantastisch anmutenden Begriffe nicht ohne Not eingeführt haben. Und tatsächlich: Für die außergewöhnliche Behauptung, dass zwei bislang unbekannte Substanzen das gesamte Universum dominieren, fanden sie mittlerweile auch außergewöhnlich starke Belege.

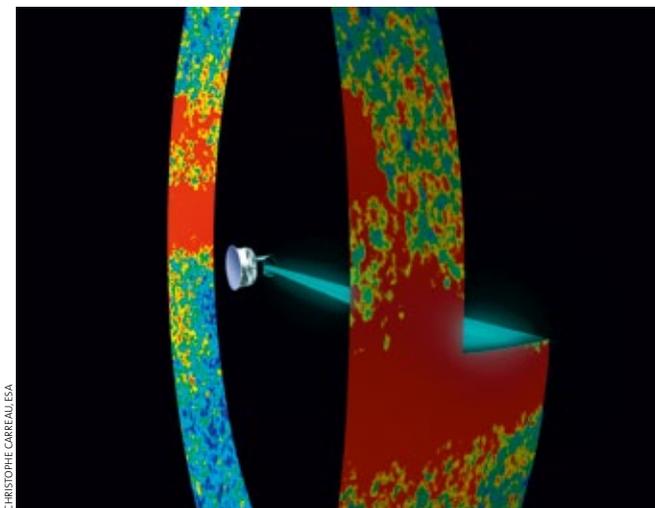
Vor gut 40 Jahren setzte sich bei Astronomen allmählich die Erkenntnis durch, dass Galaxien aus mehr bestehen müssen als aus dem, was man im Teleskop sieht, also Sterne, Staub und Gase. Bis dahin hatte man geglaubt, diese »normale« Materie, die Physiker als baryonische Materie bezeichnen, wäre die einzige relevante Materieform im Universum. Vor allem Messungen der so genannten Rotationskurven von Spiralgalaxien ließen aber den Eindruck entstehen, dass Masse fehlte. Die Sterne in den Außenbereichen solcher Scheibensysteme rotieren nämlich viel zu schnell, als dass

sie von der Schwerkraft der sichtbaren Materie auf ihrer Bahn gehalten werden könnten. Ähnliches hatte auch schon der Astronom Fritz Zwicky in den 1930er Jahren bemerkt: Die Sternsysteme im Coma-Galaxienhaufen bewegen sich viel schneller als erwartet. Ihre Schwerkraft reicht bei weitem nicht aus, um ein Auseinanderstieben des Galaxienhaufens zu verhindern. Ergo muss es in großen Galaxienhaufen, auch »dunkle Materie« geben, vermutete Zwicky – eine Substanz, die zwar unsichtbar ist, sich aber zumindest durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht.

Richtig ernst genommen wurde die Hypothese der Dunklen Materie aber wohl erst, als man im kosmischen Mikrowellenhintergrund winzige Temperaturschwankungen entdeckte. Dies gelang zunächst dem COBE-Satelliten, später Ballon-Experimenten wie Boomerang und Maxima, dann dem

LARS LINDBERGH CHRISTENSEN, ESO





Die Daten des Planck-Satelliten, der den Mikrowellenhintergrund kartierte (Temperaturunterschiede sind in der Grafik farbkodiert), bestätigen das Standardmodell der Kosmologie, demzufolge Dunkle Materie und Dunkle Energie das Universum dominieren.

berühmten WMAP-Satelliten und jetzt eben Planck (siehe auch »Plancks Himmelskarte« in SdW 7/2013, S. 19). Der Mikrowellenhintergrund ist die Restwärme des heißen Urknalls, in die wir wie in ein extrem gleichförmiges Wärmebad aus uralten Photonen eingebettet sind. Durch die Ausdehnung des Universums ist dieses Strahlungsfeld nun allerdings auf eine Temperatur von nur noch 2,73 Kelvin über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt.

Mikrowellenhintergrund verrät Materiedichte im jungen Universum

Darin finden sich kleinste Schwankungen, die um wenige Zehntausendstel von seiner mittleren Temperatur abweichen und ein charakteristisches Fleckenmuster ergeben. Diese Fluktuationen entstanden bereits im frühen Universum, nämlich durch Schwingungen der normalen baryonischen Materie relativ zu den Photonen, modifiziert durch eine Materieform, die anders als die Baryonen nicht in Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld trat. Berechnungen zufolge hängen die statistischen Eigenschaften des Fleckenmusters von den Dichten der normalen baryonischen Materie und der Dunklen Materie im Universum ab, aber auch von weiteren kosmologischen Parametern wie der Ausdehnungsrate des Universums.

Aus Plancks Messungen der Temperaturfluktuationen lassen sich diese Informationen nun sehr genau auslesen. Wir können so den Materieinhalt des Kosmos bestimmen, als das Universum etwa 380 000 Jahre alt war. Denn aus dieser Zeit stammt der Mikrowellenhintergrund. Als die Temperatur nach dem heißen Urknall auf etwa 4000 Kelvin abgesunken war, konnten die frei herumfliegenden Wasserstoff- und Heliumkerne Elektronen einfangen und wurden so zu transparenten Atomen, durch welche Strahlung dringen konnte.

In den letzten 15 Jahren stellte sich heraus, dass ein einfaches Friedmann-Lemaître-Modell, also eine isotrope und homogene Lösung der Einstein'schen Allgemeinen Relativitätstheorie, das gemessene Fluktuationmuster sehr genau beschreibt. Dieses Modell firmiert unter dem Namen » Λ CDM« (Lambda Cold Dark Matter) und ist zum Standardmodell der Kosmologie avanciert. Es wird durch nur sechs Zahlen beschrieben, die sich durch Hunderttausende von statistisch unabhängigen Messgrößen im Mikrowellenhintergrund mit einer Genauigkeit von 1,4 bis 2,6 Prozent – mit einer Ausnahme, wo der Wert bei etwa 13 Prozent liegt – bestimmen lassen. Die große Überraschung: Es scheint wesentlich weniger baryonische als nicht-baryonische Dunkle Materie zu geben. Letztere besteht vermutlich aus noch unbekanntem Elementarteilchen, die schon sehr früh aus dem Vakuum erzeugt wurden, als der Kosmos noch extrem heiß war. Bald aber reichte dessen Temperatur nicht mehr aus, um weitere solcher Teilchen zu erzeugen. Sie entkoppelten sich also vom thermischen Gleichgewicht des Universums und unterliegen seither fast nur noch der gravitativen Wechselwirkung. Mit gewöhnlicher Materie treten sie daher kaum in Kontakt und durchdringen unseren Planeten ebenso ungestört wie Menschen und ihre Messinstrumente.

Anfangs müssen die Dunkle-Materie-Teilchen sehr schnell gewesen sein. Wegen ihrer frühen Entkopplung vom thermischen Gleichgewicht und ihrer vergleichsweise großen Masse machte sich aber der Einfluss der raschen Raumausdehnung auf ihre Geschwindigkeit stark bemerkbar. Mit dem schnellen Wachstum des Kosmos wurden ihre Geschwindigkeiten unerheblich, weshalb man sie auch als »kalte Dunkle Materie« bezeichnet (englisch: cold dark matter, CDM). Erst später, als winzige Störungen der Dichte im homogenen Universum die kosmische Strukturbildung in Gang setzten, kam die Dunkle Materie erneut in Bewegung.

Doch selbst sie löst das Problem der »fehlenden Masse« noch nicht ganz. Astronomische Beobachtungen haben gezeigt, dass der Raum auf großen Skalen flach ist. Er krümmt sich nur dort, wo große Massen wirken – etwa um die Sonne herum und erst recht in der Umgebung eines Schwarzen Lochs. Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt nun voraus, dass in einem flachen Raum die Materiedichte im Universum

AUF EINEN BLICK

LICHT AM ENDE DES DUNKLEN TUNNELS?

1 Die These, dass »gewöhnliche« Materie, aus der Galaxien, Sterne und auch Menschen bestehen, im Universum nur eine Nebenrolle spielt, ist gewagt. Doch gibt es gute Gründe für sie.

2 Ein großer Teil der Materie im Kosmos könnte demzufolge aus **Dunkler Materie** bestehen. Teilchendetektoren und astronomische Beobachtungen könnten ihr Geheimnis demnächst lüften.

3 Eine viel größere Herausforderung bleibt die **Dunkle Energie**. Neuartige Weltraumexperimente wie Euclid, das um 2020 starten soll, könnten aber auch hier neue Erkenntnisse liefern.

Sky-Watcher®

Be amazed.

Versäumen Sie nicht die Beobachtung des voraussichtlichen Jahrhundertkometen ISON

Natürlich können wir Ihnen noch nicht sagen, wie hell und groß Komet ISON diesen Herbst und Winter sein wird, aber mit der limitierten Kometensucher-Edition von Sky-Watcher haben wir das richtige "Handwerkszeug" für Ihre erfolgreiche Beobachtung zusammen gestellt.

Lassen Sie sich von einem unserer Händler - die die limitierte Kometensucher-Edition ab Lager führen - beraten:

D - Deutschland

- Fernrohrland
70736 Fellbach
www.fernrohrland.de
- Teleskope Weigel
85395 Attenkirchen
www.zudensternen.de
- Teleskop Service Ransburg
85640 Putzbrunn/Solalinden
www.teleskop-express.de
- Explore Scientific GmbH
85748 Garching
www.teleskope.com
- nimax GmbH
86899 Landsberg am Lech
www.astroshop.de

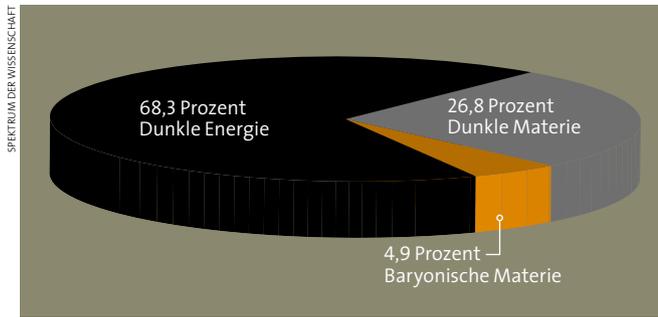
CH - Schweiz

- Foto Video Zumstein AG
CH - 3011 Bern
www.foto-zumstein.ch



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



Die Planck-Messungen präzisierten bisherige Aussagen über die Zusammensetzung der Energiedichte im Universum und bestätigten das kosmologische Standardmodell damit erneut.

einen bestimmten kritischen Wert besitzen muss. Diesen bringen aber selbst baryonische und Dunkle Materie gemeinsam nicht auf die kosmische Waagschale. Offenbar existiert irgend etwas, das den fehlenden Beitrag liefert. Diese Dunkle Energie ist noch völlig rätselhaft; man kann darunter eine Art Nullpunktenergie des Vakuums verstehen oder auch schlicht eine »kosmologische Konstante Λ «.

Einen solchen konstanten Beitrag zur kosmischen Energiedichte zog bereits Einstein als eine Erweiterung der Relativitätstheorie in Betracht, wenn auch aus anderen Gründen. Auf dieser einfachsten Art von Dunkler Energie – sie führt rein rechnerisch zu den beobachteten Daten, besitzt aber wenig Erklärungskraft – beruht das Λ CDM-Standardmodell. Aus ihm folgt, dass die Dunkle Energie für 68,3 Prozent der heutigen kosmischen Energiedichte verantwortlich ist und die Dunkle Materie für 26,8 Prozent. Baryonische Materie steuert nur die restlichen 4,9 Prozent bei. Das Frappierende ist nun, dass diese aus dem Mikrowellenhintergrund gewonnenen Erkenntnisse mit einer Vielzahl von anderen Beobachtungen übereinstimmen, die auf völlig unabhängigen Wegen gemacht wurden. Erst das macht die Hypothese von Dunkler Energie und Dunkler Materie so überzeugend.

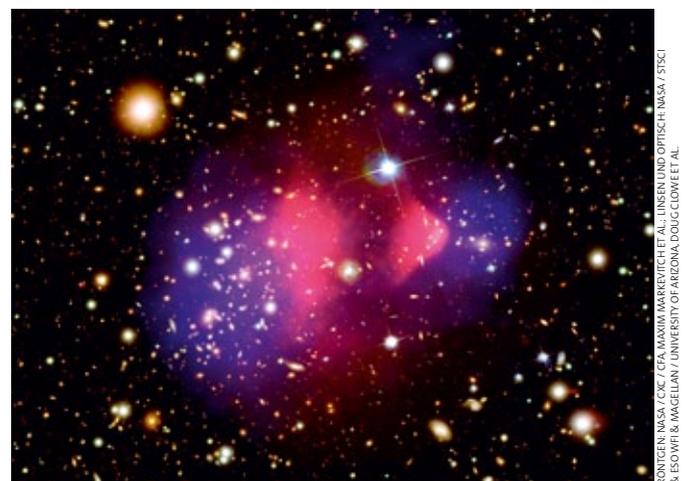
Möchte man zum Beispiel die Entstehung der Elemente im frühen Universum per Computersimulation modellieren, benötigt man dafür die noch heute messbare Information, in welchem Verhältnis damals die Isotope Deuterium und Wasserstoff vorkamen. Berechnet man nun auf Basis von Λ CDM die sich ergebende Baryondichte, stimmt das Ergebnis sehr gut mit dem von Planck gewonnenen überein – obwohl die Elementsynthese von völlig anderen physikalischen Vorgängen abhängt, nämlich von Kernreaktionen in den ersten Minuten nach dem Urknall, als noch Temperaturen von 10^{10} Kelvin herrschten.

Ein anderes Beispiel liefern große Galaxienhaufen. Man geht davon aus, dass sie einen repräsentativen Mix an Materie enthalten. Mit dem starken Gravitationslinseneffekt oder Analysen der Röntgenemissionen des heißen Plasmas zwischen den Galaxien lässt sich ihre Masseverteilung genau untersuchen. Die erhaltenen Werte stimmen mit jenen überein, die man aus anderen Verfahren gewinnt, etwa aus Be-

rechnungen der Galaxienbewegungen oder auch aus Massenrekonstruktionen auf Grund des Sunyaev-Zeldovich-Effekts, der sich als eine Art Schattenwurf der Galaxienhaufen auf dem Mikrowellenhintergrund bemerkbar macht. Addiert man schließlich die Masse des Gases und die Massen der Sterne in allen Galaxien eines Haufens und berechnet, wieviel Dunkle Materie dort existieren muss, erhält man das gleiche Verhältnis zwischen baryonischer und dunkler Masse, das sich auch aus dem Mikrowellenhintergrund ergibt.

Das Wachstum kosmischer Strukturen kann man ebenfalls als aussagekräftigen Test auffassen, ob es die Dunkle Materie wirklich gibt. Ausgehend von den beobachteten Anfangsbedingungen kurz nach dem Urknall lässt es sich präzise berechnen. Auf großen Skalen gelingt dies sogar analytisch – man kann die Gleichungen also direkt lösen und muss nicht zu numerischen Simulationen greifen –, da hier die Schwankungen der Materiedichte klein bleiben. Auf kleinen Skalen muss man wie bei der Millennium-XXL-Simulation dann allerdings Supercomputer zu Hilfe nehmen, um das Zusammenballen der Materie zu einzelnen Galaxien und Galaxienhaufen zu berechnen.

Man kann nun durch Beobachtungen die Größe der mittleren Dichteschwankungen in verschiedenen Epochen bestimmen und erfährt so, wie ausgeprägt die kosmischen Strukturen sind. Das gelingt mit ganz unterschiedlichen Methoden. So liefern Absorptionslinien in den Spektren ferner Quasare eindimensionale topografische Karten der Verteilung des neutralen Wasserstoffs – zu einer Zeit, als das Universum nur 1,5 bis 3,5 Milliarden Jahre alt war. Man kann auch Gravitationslinsen im späteren Universum nutzen oder schlicht zählen, wie häufig Galaxienhaufen heute sind. Entscheidend ist bei all dem, dass die Geschwindigkeit des Wachstums der Dichteschwankungen stark von der Menge der Dunklen Materie abhängt. Daher entwickeln nur Simulationen, denen das richtige



Der Bullet Cluster ist das Ergebnis der Kollision zweier Galaxienhaufen. Dunkle Materie (blau koloriert, mit Gravitationslinsen nachgewiesen) und heißes Gas (rot, durch seine Röntgenstrahlung identifiziert) erscheinen klar voneinander getrennt, weil sie lediglich durch ihre Schwerkraft miteinander wechselwirken.

W I S wissenschaft
in die schulen!



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

kosmologische Modell zu Grunde liegt, zu den passenden Zeitpunkten Strukturen der beobachteten Stärke. Wiederum besteht Λ CDM all diese Tests mit fliegenden Fahnen.

Die Liste ließe sich fortsetzen, eine besonders wichtige Beobachtung sei aber ausdrücklich erwähnt. Im so genannten Bullet Cluster (Aufnahme unten) verschmelzen derzeit zwei Galaxienhaufen, die vor langer Zeit miteinander kollidiert sind. Seine baryonische Komponente können wir anhand ihrer Röntgenemissionen vermessen, während sich die Verteilung der Gesamtmasse, in die sowohl baryonische als auch Dunkle Materie einfließt, aus den Positionen der Galaxien sowie aus Gravitationslinseneffekten bestimmen lässt. Interessanterweise erscheinen die Baryonen räumlich gegen den überwiegenden Teil der Masse verschoben. Die derzeit plausibelste Erklärung: Während der Zusammenstoß das baryonische Gas stoppte, scheint sich der größte Teil der Massepartikel einfach durchdrungen zu haben – genau so, wie man es für die Dunkle Materie erwartet, die nur die Schwerkraft fühlt, aber mangels weiterer Wechselwirkungen nicht mit anderen Teilchen zusammenstößt. Computermodelle auf Basis von Λ CDM, welche die Materiebewegungen im Cluster beschreiben, stützen diese Interpretation noch.

Auch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie stellen manche Forscher auf den Prüfstand

Die Evidenz für Dunkle Materie scheint also überwältigend groß. Ob wir die vorliegenden Daten korrekt interpretieren, hängt aber entscheidend davon ab, dass wir auch das Gravitationsgesetz korrekt verstehen. Anders gesagt: Wer zur Erklärung unserer Beobachtungen ohne die Annahme Dunkler Materie auskommen will, muss ein anderes Gravitationsgesetz entwickeln, als es die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt. Auf Mordehai Milgrom geht eine solche Idee zurück. MOND, die Modifizierte Newton'sche Dynamik (siehe »Gibt es Dunkle Materie?« von Mordehai Milgrom, SdW 10/2002, S. 34), postuliert, dass die Stärke der Gravitationskraft nie unter einen bestimmten Wert fällt. So erklärt sie die Rotationskurven von Galaxien recht gut und wurde durch die Tensor-Vektor-Skalar-Theorie (TeVeS) von Jacob Bekenstein mittlerweile auch relativistisch verallgemeinert, gilt in dieser Form also auch für Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit.

Leider beschränken sich die Erfolge von MOND auf die Skala einzelner Galaxien. Will man mit ihr etwa den Bullet

CELESTRON

Modernste Technik
für Ihr Celestron-Teleskop:
Vollautomatisches Alignment

mit **StarSense**
AutoAlign



StarSense
TECHNOLOGY

IHRE ERFOLGSGARANTIE

Sie möchten Ihr Teleskop ganz komfortabel nur aufstellen und anschalten, ohne irgendwelche Daten selbst einzugeben oder Referenzsterne anzufahren?



Dann ist das **StarSense-AutoAlign Modul** die Lösung!

Mit dem StarSense AutoAlign Modul richtet sich Ihr Teleskop **völlig selbständig** am Himmel aus, ohne jegliche Eingaben ihrerseits: Einfach einschalten, 3 Minuten warten, und loslegen.

StarSense ist bei fast allen computerisierten Celestron-Teleskopen nachrüstbar. Das StarSense-Modul wird einfach anstelle des Suchers montiert und der StarSense-Handkontroller angeschlossen. Die eingebaute Kamera fotografiert den Himmel, und die Software erkennt automatisch, welche Sterne gerade zu sehen sind. Das funktioniert ganz ohne GPS. Sie brauchen nur freien Blick auf den Himmel!

Azimutale Montierungen müssen Sie lediglich waagrecht aufstellen und anschalten, alles andere erledigt StarSense für Sie. (Für LCM- und SLT-Montierungen benötigen Sie neben dem StarSense Modul noch einen zusätzlichen AUX-Splitter).

Parallaktische Montierungen müssen zwar weiterhin nach Norden ausgerichtet werden, aber StarSense kann die Positionierungsgenauigkeit deutlich verbessern – selbst wenn die Montierung nur grob auf den Himmelspol ausgerichtet ist. Mit StarSense und dem gewohnten AllStar Polar Alignment erzielen Sie schon nach einem Durchgang eine sehr hohe Genauigkeit für den fotografischen Einsatz!



Das StarSense-Modul
am NexStar 8SE

Für alle modernen und viele
ältere Celestron-NexStar-Teleskope.
Weitere Informationen auf:

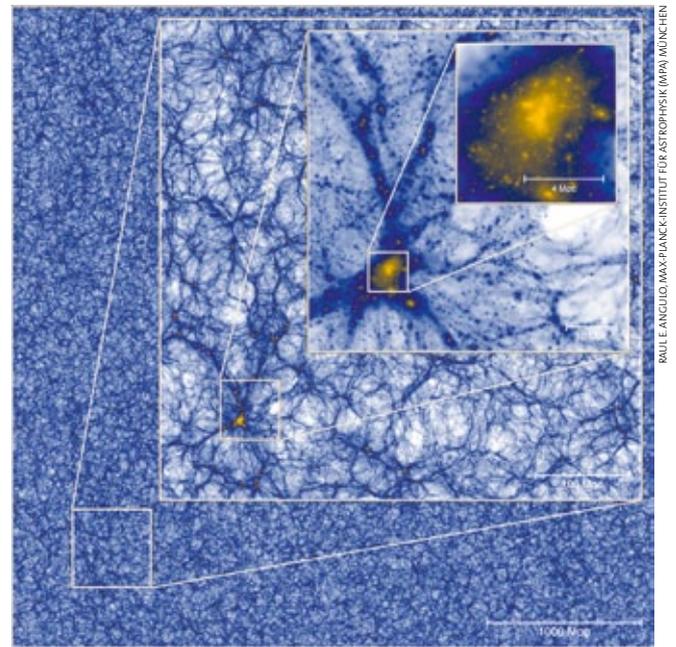
www.celestron-deutschland.de/starsense

Cluster beschreiben, erfordert dies doch wieder die Existenz von Materie, die nicht gewöhnliche Materie sein kann. Der Spielraum für neuartige Gravitationsgesetze ist durch die vielen Präzisionstests der Relativitätstheorie im Sonnensystem ohnehin stark eingeschränkt. Auch die TeVeS-Theorie ist so gut wie ausgeschlossen. Dies haben Tests des Gravitationsgesetzes auf sehr großen Skalen gezeigt, bei denen Daten zu Gravitationslinsen, Galaxien-Clustering und der Geschwindigkeiten von Galaxien auf intelligente Weise miteinander kombiniert wurden.

Kein besseres Modell in Sicht

Zwar suchen manche Forscher auch weiterhin intensiv nach Theorien und Gravitationsgesetzen, die die Annahme von Dunkler Materie möglicherweise verzichtbar machen. Doch nach Lage der Dinge sind wir mit der gewagt scheinenden Idee konfrontiert, dass eine weitere stoffliche Komponente in Form unbekannter Elementarteilchen existiert. Mangels Modellen, die auch nur annähernd so erfolgreich sind wie Λ CDM, bleibt sie derzeit sogar die konservativste Erklärungsmöglichkeit. Worum handelt es sich also bei ihr? In der Vergangenheit haben Teilchenphysiker schon mehrfach die Existenz neuer fundamentaler Partikel vorausgesagt und sie in vielen Fällen dann auch entdeckt. Geleitet wurden sie dabei stets vom Standardmodell der Teilchenphysik, einer unglaublich erfolgreichen Theorie, die alle bekannten Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen sehr gut beschreibt. Die neuen Funde komplettierten dabei allmählich das Teilchensortiment in diesem System, bis als vorläufiger Höhepunkt der Suche der lang ersehnte Nachweis des Higgs-Bosons am Beschleuniger LHC bei Genf gelang. Es kann den Ursprung der Masse von Teilchen erklären und bildet damit eine Art Schlussstein des Standardmodells.

Allerdings wissen wir, dass auch dieses Modell nicht der Weisheit letzter Schluss sein kann. Denn es gilt wohl nur in einem beschränkten Energiebereich, vor allem aber lässt es die Gravitation komplett außen vor. Deshalb fahnden Forscher schon lange nach Erweiterungen des Modells, die letztlich auf eine umfassendere und einfachere Beschreibung der Natur abzielen. »Einfacher« bezieht sich hierbei nicht unbedingt auf die mathematische Formulierung der Theorie, sondern darauf, dass eine neue Theorie auf eine kleinere Zahl freier Parameter und Grundprinzipien gegründet sein sollte. Einer der am meisten diskutierten Kandidaten für eine solche Erweiterung ist die Supersymmetrie, die für jedes Teilchen des Standardmodells die Existenz eines supersymmet-



RAUL E. ANGLICO, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK (MPA), MÜNCHEN

Die Millennium-XXL-Simulation, durchgeführt unter Beteiligung des Autors, umfasst einen Raumwürfel mit einer Kantenlänge von 13,4 Milliarden Lichtjahren. Basierend auf dem Λ CDM-Modell gelingt ihr eine Beschreibung des Universums, deren statistische Eigenschaften sehr nahe an denen der Realität liegen. Der Zoomfaktor zwischen den einzelnen Bildern beträgt jeweils acht.

rischen Partnerteilchens postuliert. Aus kosmologischer Sicht ist sie besonders interessant, da das leichteste supersymmetrische Teilchen, das Neutralino, genau die Eigenschaften eines idealen Kandidaten für Dunkle Materie haben dürfte: Es wäre stabil, sehr schwer und würde nur schwach mit normaler Materie wechselwirken, wäre mithin ein so genanntes WIMP-Teilchen (englisch: weakly interacting massive particle, schwach wechselwirkendes massebehaftetes Teilchen). Außerdem wäre es im frühen Universum genau in der richtigen Menge entstanden, um die heute beobachtete Dichte der Dunklen Materie erklären zu können. Die meisten Physiker werden aber erst von der Supersymmetrie überzeugt sein, wenn die Neutralino-Teilchen tatsächlich in einem Detektor aufgespürt und ihre Eigenschaften vermessen wurden. Aber wie detektiert man Teilchen, über die man kaum etwas weiß?

Immerhin wissen wir, dass die Dichte der Dunklen Materie auf der Bahn der Sonne um das Zentrum der Milchstraße etwa 0,3 Gigaelektronvolt (GeV; Physiker geben Teilchenmassen in Energieeinheiten an) pro Kubikzentimeter beträgt. Man erwartet also etwa ein bis drei Teilchen pro Liter, falls es sich bei den Teilchen um WIMPs handelt, von denen man vermutet, dass sie typischerweise Massen um etwa 100 GeV besitzen. Alle Teilchen der Dunklen Materie innerhalb des Orbits der Erde um die Sonne summieren sich dann auf nur etwa 75 Millionen Tonnen. Das ist weniger als ein Trillionstel der Sonnenmasse; im Sonnensystem selbst spielen sie also



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



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

www.spektrum.de/kosmologie

praktisch keine Rolle. Ganz anders verhält es sich auf großen Distanzen im Universum. Hier wirkt die Dunkle Materie gleichsam als gigantischer Staubsauger, der das Zusammenballen von Materie durch seine gravitative Wirkung verstärkt und das Wachstum der Galaxien so erst ermöglicht.

Mit etwas Glück kann man die Dunkle Materie aber auch auf der Erde aufspüren. Im Gran-Sasso-Labor in Italien, einem der fortgeschrittensten seiner Art, sind mehr als tausend Meter unter dem Fels mehrere Teilchendetektoren in einer großen Experimentierhalle aufgebaut. Der Fels schirmt sie gut vor der kosmischen Strahlung ab, die die Erde unablässig mit energiereichen Protonen und anderen Teilchen bombardiert, während die Dunkle-Materie-Teilchen ungehindert durch ihn hindurchfliegen. Dies verringert die Kakophonie der Ereignisse, aus der man die seltenen Wechselwirkungen von Teilchen der Dunklen Materie mit dem Detektormaterial herausfiltern muss. Auch andere Störquellen wie die natürliche Radioaktivität schalten die Experimentatoren im Gran Sasso so gut wie möglich aus. Dann muss man den Teilchen nur noch genügend Detektormaterial in den Weg stellen. Denn gelegentlich treten Neutralinos eben doch mit Atomkernen in Wechselwirkung und versetzen ihnen dabei einen starken Stoß, den man dann unter anderem durch das dabei ausgestrahlte Szintillationslicht nachweisen kann.

Sind Dunkle-Materie-Teilchen vielleicht schon gemessen worden?

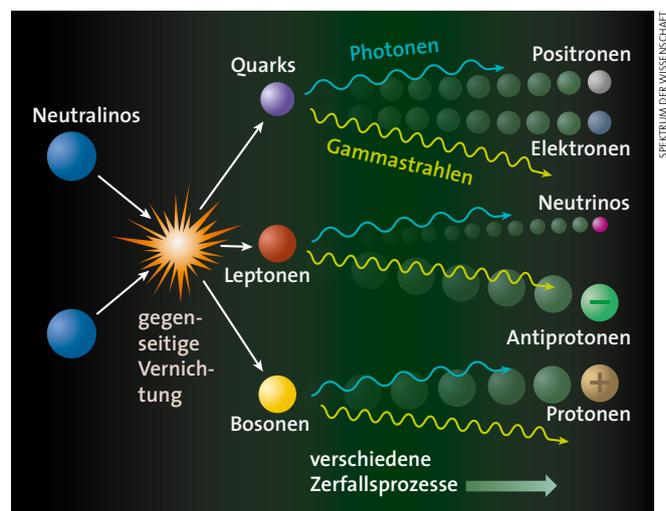
Aktuelle Experimente, die dieses Ziel verfolgen, sind etwa CoGeNT in den USA sowie CRESST, Xenon100 oder auch DAMA/Libra. Die drei letzteren sind alle im Gran-Sasso-Labor installiert. Einige scheinen schon Signale aufgeschnappt zu haben, die man als Dunkle Materie deuten könnte. Allerdings gelang es noch nicht, sie bei anderen Experimenten zu verifizieren. Das macht die aktuelle Situation gleichzeitig verwirrend und spannend. So berichten die Forscher von DAMA/Libra bereits seit 2008, dass sie – mittlerweile mit hoher statistischer Aussagekraft – ein mit den Jahreszeiten schwankendes Signal messen. Das ist auch zu erwarten: Die Sonne umkreist das galaktische Zentrum mit einer Bahngeschwindigkeit von 220 Kilometern pro Sekunde und durchpflügt dabei die Dunkle Materie der Milchstraße. Im Sommer addiert sich die Bewegung der Erde zu dieser Geschwindigkeit, im Winter wird ihre effektive Geschwindigkeit geringer – entsprechend sollte auch der Teilchenfluss durch die Detektoren variieren.

Hat man die Dunkle Materie also bereits gefunden? Vielleicht. Aber es gibt gute Gründe, skeptisch zu bleiben. Auch die CoGeNT-Daten schienen eine Weile lang eine jährliche Modulation anzudeuten, zeitlich allerdings etwas versetzt. Doch andere Experimente, insbesondere die sehr empfindlichen Detektoren Xenon100 im Gran Sasso sowie CDMS in Kalifornien, hätten dieses Signal eigentlich ebenfalls finden müssen. Zur Konfusion trägt auch bei, dass einige schwache Hinweise, die andere Experimente gefunden haben, auf Dunkle-Materie-Teilchen in einem ganz anderen Massenbereich als DAMA hindeuten.

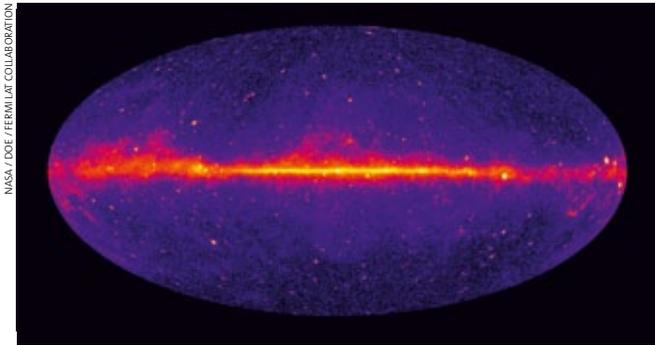
Die Jagd auf WIMPs und ihren ersten direkten Nachweis in einem Detektor bleibt also spannend. In den nächsten Jahren sollte sich die Situation aber klären, da die Experimentatoren die Empfindlichkeit ihrer Detektoren schon in naher Zukunft extrem erhöhen werden und außerdem eine Forschergruppe das DAMA-Experiment am Südpol wiederholen will.

Bleibt die Suche trotz aller Anstrengungen erfolglos, würde es für die Idee der Dunklen Materie sicher enger werden. Allerdings könnte man bei einigen Experimenten auch auf das falsche Pferd gesetzt haben – falls es sich nämlich bei Dunkler Materie um Axionen handelt. Diese unterscheiden sich stark von WIMPs, sind ungleich leichter und lassen sich – sofern es sie gibt – am besten in starken Magnetfeldern detektieren, wo sie sich in Photonen umwandeln können. Nach solchen Teilchen suchen Physiker ebenfalls bereits, wenn auch noch nicht mit derselben Intensität wie die Neutralinoforscher. Axionen bieten den Vorteil, dass sich ihre Bewegungsenergie recht leicht bestimmen lassen sollte. Mit ihrer Hilfe könnte man also sogar die Geschwindigkeitsverteilung der Dunklen Materie im kugelförmigen Außenbereich der Milchstraße vermessen, dem Halo, und so Hinweise auf die galaktische Entstehungsgeschichte finden. Diese Art der Dunkle-Materie-Astronomie ist aber ganz entschieden noch Zukunftsmusik.

Einen anderen Weg zum Nachweis von Dunkler Materie bietet die Gamma-Astronomie. Neutralinos sind ihre eigenen Antiteilchen, würden also bei ihrem Zusammentreffen zu zwei sehr energiereichen Gammaphotonen zerstrahlen (Grafik unten). Dies geschieht allerdings nur selten, denn der Wirkungsquerschnitt der schwachen Wechselwirkung und damit die Wahrscheinlichkeit einer solchen Interaktion ist sehr gering. Zudem müssen sich zwei Teilchen auch erst einmal finden, wofür es hoher Dichten bedarf. Dennoch müssten wir von dort, wo die Dichte der Dunklen Materie beson-



Treffen zwei der von der Supersymmetrie vorhergesagten Neutralinos aufeinander, zerstrahlen sie. Astrophysiker versuchen, die dabei emittierte Gammastrahlung ebenso wie die entstehenden Positronen und Antiprotonen zu registrieren, um so indirekte Hinweise auf die Existenz von Dunkler Materie zu erhalten.



Diese vom Weltraumteleskop Fermi erstellte Karte zeigt die Quellen von Gammastrahlen (rot und gelb) in der Milchstraße. Unter den Emissionen verbirgt sich möglicherweise auch die Vernichtungsstrahlung von Dunkle-Materie-Teilchen.

ders hoch ist, ein schwaches Leuchten im Gammaskpektrum wahrnehmen. Weltraumteleskope wie Fermi könnten es direkt registrieren. Oder aber wir vermessen die Teilchenschauer, die einzelne Gammaquanten in den obersten Atmosphärenschichten auslösen und die von Cherenkov-Teleskopen auf der Erde registriert werden.

Das stärkste Signal, so sagen hochauflösende numerische Milchstraßensimulationen wie das Projekt Aquarius des internationalen Zusammenschlusses Virgo voraus, sollte aus dem galaktischen Zentrum kommen. Denn dort wäre die Neutralino-Dichte am höchsten, so dass sich zumindest gelegentlich zwei Teilchen zur gegenseitigen Vernichtung treffen. Allerdings gibt es in dieser Region auch jede Menge anderer energiereicher Strahlungsquellen, etwa Pulsare oder die unmittelbare Umgebung eines supermassereichen Schwarzen Lochs, die das Signal leicht überdecken könnten. Deshalb kann es klüger sein, weiter abseits der galaktischen Scheibe zu schauen und ein schwächeres, dafür weniger verschmutztes Signal in Kauf zu nehmen. Oder man versucht, einen nahen dichten Klumpen Dunkler Materie ins Visier zu bekommen.

Man kann sogar nahe gelegene Galaxienhaufen untersuchen. Denn lokale Verklumpungen Dunkler Materie werden vom Λ CDM-Modell in so großer Zahl vorhergesagt, dass die von ihnen ausgehende Vernichtungsstrahlung in der Summe eine sehr hohe Leuchtkraft erreichen sollte. Allerdings konnte man bisher noch nichts derartiges nachweisen, sondern nur die möglichen Werte der fundamentalen Parameter supersymmetrischer Teilchentheorien weiter einschränken.

Für einige Aufregung sorgt derzeit Fermis Entdeckung, dass die Intensität der Gammastrahlen aus dem galaktischen Zentrum bei etwa 130 GeV besonders hoch ist. Im für die Suche nach Dunkler Materie günstigsten Fall könnte es sich um eine Signatur der Vernichtungsstrahlung handeln, aus der sich sogar direkt die Masse der Teilchen ergeben würde. Im ungünstigeren – und leider wahrscheinlicheren – Fall narnt ein verzwicktes Messproblem die Astrophysiker. Möglicher-

weise werden erst weitere Experimente wie das geplante, sehr leistungsfähige Cherenkov Telescope Array Licht ins Dunkel bringen.

Einen anderen indirekten Hinweis auf Dunkle Materie fand vor Kurzem das AMS-2-Experiment an Bord der Internationalen Raumstation (siehe »Mit der ISS der Dunklen Materie auf der Spur«, SdW 9/2010, S. 22). Seine Instrumente messen das Verhältnis von kosmischen Positronen zu Elektronen. Interessanterweise entdeckt AMS-2 um so mehr Positronen, je höher deren Energie ist – sie könnten bei der gegenseitigen Vernichtung von Dunkle-Materie-Teilchen entstanden sein. Die Messergebnisse bestätigen nicht nur ältere Ergebnisse des PAMELA-Satelliten, sondern werden auch von einigen theoretischen Modellen vorhergesagt. Allerdings kann man die AMS-2-Messungen auch mit anderen astrophysikalischen Prozessen erklären. Die AMS-2-Daten bleiben darum für den Moment nicht mehr als ein elektrisierender Fingerzeig.

Trotz allem bleibt aber denkbar, dass es die Dunkle Materie aus dem Λ CDM-Modell gar nicht gibt. Beweisen ließe sich dies dadurch, dass dessen Voraussagen zu Widersprüchen mit Beobachtungsergebnissen führen, die nicht aus der Welt zu diskutieren sind. Auf kleinen Skalen, auf der Ebene einzelner Galaxien, gibt es tatsächlich einige Spannungen zwischen Theorie und Beobachtung. So sagt das Standardmodell eine deutlich größere Zahl von Satellitengalaxien voraus, als sie in der Umgebung der Milchstraße beobachtet werden. Auch die Form der Rotationskurven im Zentrum einiger Galaxien beschreibt das Λ CDM nicht gut. Umstritten ist allerdings, wie ernst man diese Diskrepanzen zum jetzigen Zeitpunkt nehmen sollte. Das Problem besteht darin, dass die baryonische Dichte auf den betroffenen Skalen so groß wird, dass sich die Dunkle Materie durch deren Schwerkrafteinfluss umverteilt. Ein solcher Prozess lässt sich aber derzeit nur mit großen Unsicherheiten berechnen; wir wissen also schlicht nicht genau, was Λ CDM für diese Situation vorausagt. Deshalb arbeitet man intensiv an verlässlicheren Berechnungen, um entscheiden zu können, ob sich diese Spannungen in Wohlgefallen auflösen oder ob sie gar die Kalte Dunkle Materie vom Sockel stoßen. Alles in allem stehen die Chancen wohl gut, dass wir diese Frage in den nächsten Jahren beantworten können.

Dann aber wartet gleich eine weitere große Herausforderung auf uns. Ende der 1990er Jahre entdeckten Forschungsteams um Saul Perlmutter sowie um Brian Schmidt und Adam Riess, dass sich die Ausdehnung des Universums immer mehr beschleunigt. Systematisch hatten die 2011 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichneten Wissenschaftler weit entfernte Supernovae vom Typ Ia beobachtet. Bei einer solchen thermonuklearen Explosion, die sich über Milliarden Lichtjahre hinweg beobachten lässt, wird ein Weißer Zwerg zerstört, ein kleiner, heißer Stern. Weil diese Vorgänge eine hohe Universalität aufweisen, kann man aus den gemessenen Lichtkurven ihre absolute Helligkeit berechnen. Solche Supernovae gelten daher als »Standardkerzen«, die einen klassischen kosmologischen Test erlauben, nämlich das

Verhältnis zwischen kosmologischer Rotverschiebung, also der »Dehnung« von Licht durch die Expansion des Raums, und scheinbarer Helligkeit, also der auf der Erde noch messbaren Lichtintensität, zu bestimmen.

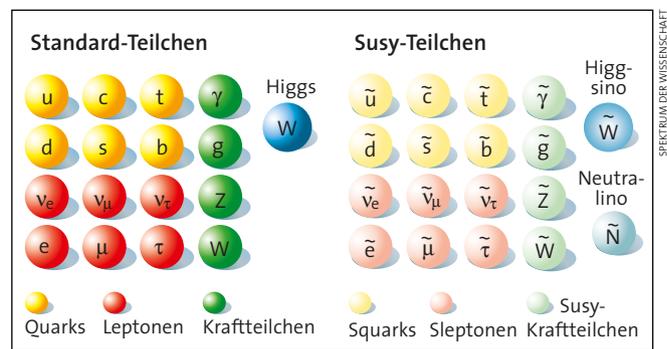
Die Dunkle Energie beginnt, das kosmische Energiebudget zu dominieren

Bei kleinen Abständen liefert der Test das Hubble'sche Gesetz, demzufolge sich Galaxien umso stärker voneinander entfernen, je weiter sie voneinander entfernt sind. Bei größeren Abständen kommt zusätzlich die zeitliche Veränderung der kosmischen Ausdehnungsrate mit ins Spiel. Die Supernova-Daten zeigten nun überraschend, dass sich das Universum seit etwa fünf Milliarden Jahren beschleunigt ausdehnt. Als Ursache dafür kommt nur Dunkle Energie in Frage, also eine abstoßende Kraft. Diese wiederum muss eine bestimmte Stärke besitzen, um die Daten zu erklären. Und tatsächlich stimmt die Stärke der erforderlichen abstoßenden Kraft mit den Ergebnissen überein, die wir aus Analysen des Mikrowellenhintergrunds und anderen kosmologischen Beobachtungen gewinnen.

Ist die Dunkle Energie einfach eine kosmologische Konstante, beeinflusst sie lediglich die Ausdehnungsrate des Universums und besitzt damit nur sehr indirekten Einfluss auf die kosmische Strukturentstehung. Dann war auch ihr Beitrag zur kosmischen Energiedichte im jungen Universum eher unerheblich gegenüber dem Beitrag der Materie. Interessanterweise wird sich die Rolle der Dunklen Energie aber in Zukunft ändern. Denn schon jetzt hat sie begonnen, das Energiebudget des Universums zu dominieren. Anders als die Dunkle Materie wird sie durch die Raumausdehnung nicht kontinuierlich verdünnt, sondern behält einen konstanten Wert. Dies ist zumindest im Λ CDM-Modell der Fall, in dem sie ja explizit als *Konstante* angenommen wird. (In anderen Modellen kann sich die Stärke der Dunklen Energie auch ändern.) Das Universum ist also in eine Phase exponentieller Expansion eingetreten, die sich im Lauf der Zeit – über Hunderte von Jahrmilliarden hinweg – dadurch äußern wird, dass immer größere Bereiche des Kosmos hinter unseren Sichthorizont entschwinden.

Warum aber leben wir gerade zu einer Zeit, in der die Dunkle Energie und die Dunkle Materie ungefähr gleiche Beiträge zur kosmischen Energiedichte liefern? Viele Physiker sind überzeugt, dass diese Koinzidenz nicht einfach zufällig zustande kommt. Stattdessen sollte es einen Grund geben, der sie auf natürliche Weise erklärt. In manchen Modellen wie der Quintessenz-Theorie, welche die Dunkle Energie mit einem sich dynamisch entwickelnden Skalarfeld beschreibt, klappt das schon ganz gut. In der Regel bringen solche hypothetischen Skalarfelder auch neue Wechselwirkungen zwischen Dunkler Materie und Dunkler Energie mit ins Spiel. Die wiederum könnten den Prozess der kosmischen Strukturentstehung beeinflussen, wofür es aber noch keine Indizien gibt.

Radikalere Denkansätze setzen auf Modifikationen des Gravitationsgesetzes selbst. Dazu zählen nichtlineare Erwei-

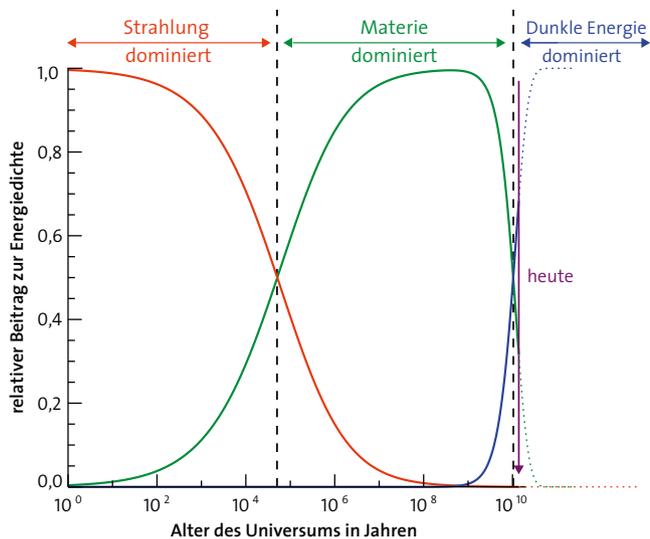


Der Fund des Higgs-Teilchens komplettierte 2012 das Standardmodell der Teilchenphysik (links). Existiert die so genannte Supersymmetrie, würde jede darin enthaltene Teilchenart darüber hinaus noch in einer »Super«-Variante vorkommen (rechts). Nachweisen ließ sich dies bislang aber nicht. Das Neutralino, das als Kandidat für Dunkle-Materie-Teilchen gilt, wird in der Supersymmetrie als Überlagerung eines Binos (\tilde{B} , hier nicht dargestellt), eines Winos (\tilde{W}) und eines Higgsinos (\tilde{H}) beschrieben.

terungen der Relativitätstheorie wie die so genannte f(R)-Gravitation und auch Theorien, in denen der Raum mehr als drei Dimensionen besitzt. Am weitesten gehen die abstrakten Konzepte der Stringtheorie oder der Schleifenquantengravitation. Diese versuchen nichts geringeres als die beiden Grundpfeiler der modernen Physik zu vereinheitlichen, also die Quantenfeldtheorie, die drei der vier Grundkräfte beschreibt, mit der Gravitationstheorie Einsteins zu verschmelzen. Noch sind diese Ansätze nicht ausgereift, aber vielleicht gelingt es den Stringtheoretikern, die komplexe Mathematik ihrer Modelle so weit zu bändigen, dass sie sich künftig auf kosmologische Fragen anwenden lässt. Und möglicherweise liefert sie dann auch Hinweise auf die Natur der Dunklen Energie.

An Hypothesen mangelt es jedenfalls nicht, wenn sie auch oft exotisch anmuten. In jedem Fall brauchen wir neue Beobachtungsdaten, um die vielen Ideen zu ordnen und die guten von den irreführenden zu trennen. Seit einigen Jahren bemüht man sich daher verstärkt, nicht nur die beschleunigte Expansion noch genauer zu überprüfen, sondern auch, die Expansionsgeschichte des Universums zu rekonstruieren. Denn wenn man versteht, wie diese ablief, kann man auch die Eigenschaften des Dunkle-Energie-Felds genauer bestimmen.

Die verschiedenen Theorien zu dieser Frage unterscheiden sich in ihren Voraussagen für die so genannte Zustandsgleichung der Dunklen Energie, unter der man das Verhältnis w von Druck und Energiedichte versteht. Für eine kosmologische Konstante Λ liegt dieses Verhältnis konstant bei $w = -1$, aber für alternative Modelle ergeben sich andere, im allgemeinen zeitlich veränderliche Werte. Wichtigstes Ziel ist es daher, den Parameter w so präzise zu vermessen, dass sich die vermuteten Abweichungen von $w = -1$ in den Daten zeigen. Gelänge das, wäre die kosmologische Konstante und damit auch das einfache Λ CDM-Modell widerlegt. Gleichzeitig



Aus welchen Bestandteilen setzt sich die im gesamten Kosmos enthaltene Energie zusammen? In den ersten 10 000 bis 100 000 (10^4 bis 10^5) Jahren nach dem Urknall dominierte die Strahlung, anschließend übernahm die Materie für lange Zeit das Zepter. Dann, rund zehn Milliarden (10^{10}) Jahre nach dem Urknall, kam es dem Λ CDM-Modell zufolge zu einem neuen Wendepunkt. Seither trägt die Dunkle Energie den größten Teil zur kosmischen Energiedichte bei.

könnte die neue Information theoretische Überlegungen in die richtige Richtung leiten.

Das ambitionierteste Projekt auf diesem Gebiet ist die neue Satellitenmission Euclid der ESA. Dieser kosmische Späher soll gegen Ende der Dekade gestartet werden und eine Reihe physikalischer Effekte nutzen, um die Raumexpansion zu vermessen. Dazu zählen in erster Linie der schwache Gravitationslinseneffekt, der zu kleinen, aber systematischen Verzerrungen der Bilder entfernter Galaxien führt, sowie die Baryonischen Akustischen Oszillationen. Letztere sind die schon erwähnten Schwingungen der baryonischen Materie, die sich im Mikrowellenhintergrund bemerkbar machen. Diese wurden auch der großräumigen Materieverteilung aufgeprägt und lassen sich deshalb in der Verteilung der Galaxien im Universum nachweisen.

Diese Oszillationen kann man wie einen gigantischen Maßstab nutzen. Beobachtet man, welche Größe sie zu verschiedenen Zeiten der kosmischen Entwicklung besaßen, lässt sich die Ausdehnungsgeschichte des Universums rekonstruieren. Euclid wird dazu die Rotverschiebungen von mehr als 100 Millionen Galaxien vermessen. Daneben wird der Satellit noch die Elliptizitäten von mehr als zwei Milliarden Galaxien bestimmen. In ihnen äußern sich die Verzerrungseffekte auf Grund des schwachen Gravitationslinseneffekts, aus denen man wiederum Messungen der Stärke der kosmischen Dichteschwankungen zu verschiedenen Zeiten und damit der Wachstumsgeschwindigkeit kosmischer Strukturen gewinnen kann. Im Ergebnis ist dies ein

weiteres unabhängiges Verfahren, mit dem wir die Dunkle Energie vermessen können – und ein gigantisches Projekt, an dem schon jetzt mehr als tausend Wissenschaftler beteiligt sind.

Werden Astrophysiker mit unterschiedlichen Erklärungen für dasselbe Phänomen konfrontiert, wählen sie in der Regel die einfachste als die wahrscheinlichste aus. Dieses Prinzip ist als Ockhams Rasiermesser bekannt und lässt sich auch auf die Hypothese anwenden, dass das Universum zum größten Teil aus einem noch unbekanntem Dunkelmaterie besteht. So gewagt diese erscheint, so schlägt doch die Annahme, dass Dunkle Materie und Dunkle Energie tatsächlich existieren, alle anderen Konzepte um Längen, wenn man sie auf ihre Plausibilität und Einfachheit überprüft. Doch erst indem wir die Dunkle-Materie-Teilchen eines Tages direkt nachweisen, können wir alle weiterhin berechtigten Zweifel an ihrer Existenz ausräumen. Noch schwieriger dürfte es aber sein, Skeptiker von der Existenz der Dunklen Energie zu überzeugen. Denn diese wird sich, wie anzunehmen ist, dem direkten Nachweis in irdischen Laboren wohl vollständig entziehen.

Die Suche nach den dunklen Substanzen im Universum bleibt daher eine der größten Herausforderungen der Astrophysik. Gleichzeitig ist sie von grundlegender Bedeutung für die Kosmologie. Denn wenn sich Λ CDM bewährt, ist das baryonische Material, aus dem auch wir selbst bestehen, ziemlich unwichtig für das Schicksal des Universums. Das macht uns aber nur zu umso spezielleren Wesen. ∞

DER AUTOR



Volker Springel ist seit 2010 Professor für Theoretische Astrophysik an der Universität Heidelberg und forscht am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS). Springel erhielt mehrere Preise, darunter den Heinz Maier-Leibnitz-Preis der DFG (2004) und den Klug-Wilhelmy-Weberbank-Preis für Physik (2009). Mit seinen immer umfangreicher werdenden Simulationen geht er der Frage nach, wie sich im Lauf der Entwicklung des Universums aus der vorhandenen Materie Sterne und Galaxien entwickelten.

QUELLEN

- Frenk, C., White, S. D. M.:** Dark Matter and Cosmic Structures. In: *Annalen der Physik* 524, S. 507–534, 2012
- Bertone, G., Hooper, D., Silk, J.:** Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints. In: *Physics Reports* 405, S. 279–390, 2005
- Peebles, P. J. E.:** Seeing Cosmology Grow. In: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 50, S.1–28, 2012
- Amendola, L.:** Cosmology and Fundamental Physics with the Euclid Satellite. 6. Juni 2012. Abrufbar unter arxiv.org/abs/1206.1225

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201694



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

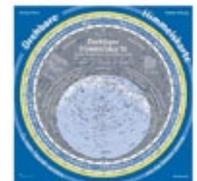
Dieses Buch bringt anfangersfreundlich alle Antworten auf Fragen rund um die Optik, Mechanik und Benutzung eines astronomischen Teleskops. Erstmals wurden alle wichtigen Definitionen und Formeln zur Fernrohrtechnik zusammengefasst.



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 Sternhimmel 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!

Bundestwahlgesetz – dritter Versuch

Die neue Vorschrift für die Wahl des deutschen Bundestags ist komplizierter denn je und überaus schlecht formuliert. Aber sie ist nicht mehr ganz so paradox wie ihre Vorläufer und führt endlich zu einer dem Stimmenverhältnis entsprechenden Sitzverteilung.

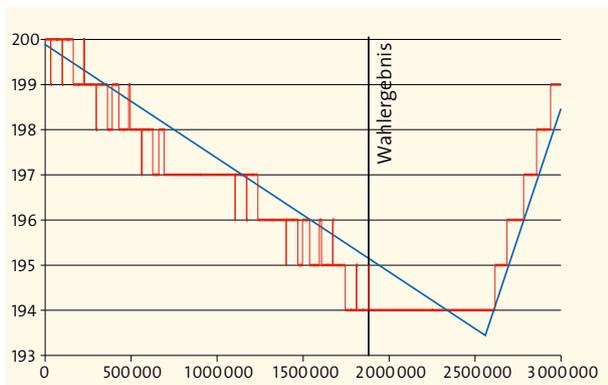
Von Martin Fehndrich

» **E**in Wahlsystem, das ... zulässt, dass ein Zuwachs an Stimmen zu Mandatsverlusten führt oder dass für den Wahlvorschlag einer Partei insgesamt mehr Mandate erzielt werden, wenn auf ihn selbst weniger oder auf einen konkurrierenden Vorschlag mehr Stimmen entfallen, führt zu willkürlichen Ergebnissen und lässt den demokratischen Wettbewerb um Zustimmung bei den Wahlberechtigten widersinnig erscheinen.« So die Entscheidung, mit der das Bundesverfassungsgericht am 25. Juli 2012 die nur wenige Monate zuvor verabschiedete Neufassung des Bundeswahlgesetzes außer Kraft setzte.

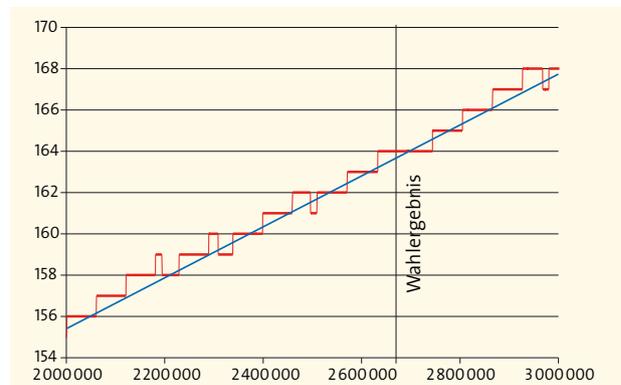
Das von 1957 bis zur Bundestagswahl 2009 gültige Bundestagswahlssystem war verfassungswidrig und verletzte die Prinzipien der Unmittelbarkeit und Gleichheit der Wahl. Schuld war ein Effekt, der als negatives Stimmgewicht bezeichnet wird. Zusätzliche Stimmen für eine Partei konnten für diese zu einem Sitzverlust führen; umgekehrt konnte ein Stimmenverlust einer Partei einen zusätzlichen Sitz einbringen (Kasten unten; siehe auch meinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft 2/1999, S. 70).

In den Blick der Öffentlichkeit rückte der Effekt durch eine Nachwahl zur Bundestagswahl 2005 in einem Wahlkreis in

Negative Stimmgewichte und ähnliche Effekte

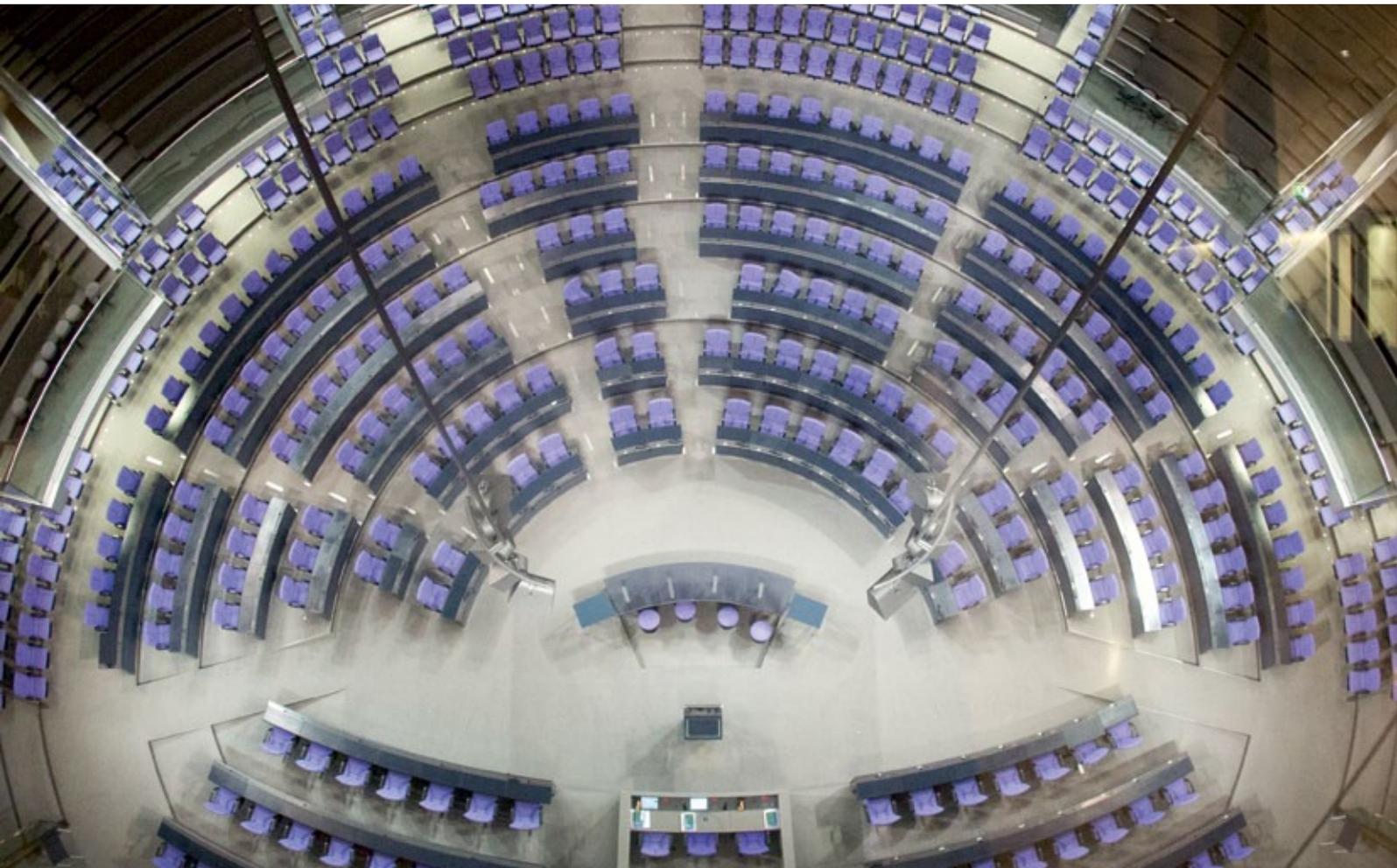


Hätte die CDU 2009 unter ansonsten gleichen Umständen weniger Zweitstimmen in Baden-Württemberg errungen, so hätte das mehr Überhangmandate für sie und damit mehr Sitze im Bundestag ergeben (links in der linken Grafik). Die blaue Linie zeigt die Situation, wenn nicht gerundet würde, es also Bruchteile von Bundestagssitzen gäbe. Unter dem neuen Wahlrecht gibt es nur noch einen dem negativen Stimmgewicht ähnlichen



Effekt (rechte Grafik). Variiert man die Zweitstimmenanzahl für die SPD in Nordrhein-Westfalen und lässt alles andere unverändert, so springt gelegentlich die (rote) Kurve der Sitzzahlen nach unten, ein paar Stimmen mehr würden also die SPD einen Sitz kosten. Aber der Effekt ist zu klein und zu unkalkulierbar, um für taktisches Wählen nutzbar zu sein. Die blaue Linie zeigt wieder die idealisierte Situation.

LIVIS-ULBCHWESNER, RECHTS: MARTIN FEHNDRICH



DPA / MICHAEL KAPPELER

Dresden. Da das Wahlergebnis für den Rest Deutschlands feststand, konnte man sich vorher ausrechnen, dass die CDU in diesem Wahlkreis nicht mehr als rund 42 000 Zweitstimmen erhalten durfte, um sich ein Überhangmandat zu sichern. Am Ende blieb die CDU mit 38 202 Zweitstimmen – zu ihrer Freude – unter dieser Marke.

Auf mehrere Wahlprüfungsbeschwerden hin (darunter eine von mir) erklärte das Bundesverfassungsgericht das Wahlsystem im Juli 2008 für verfassungswidrig, gab aber dem Bundestag eine großzügige Frist von drei Jahren – also über die Bundestagswahl 2009 hinaus – für eine Korrektur. Der verabschiedete Ende 2011 ein Wahlgesetz, das allerdings das Problem mit dem negativen Stimmgewicht nicht beseitigte, sondern noch verschärfte. Im Juli 2012 kassierte das Bundesverfassungsgericht den Fehlversuch; zusätzlich entschied es, dass Überhangmandate nur in einem begrenzten Umfang (konkret: 15 Sitze) hinnehmbar sind.

Daraufhin verabschiedete der Bundestag im Februar dieses Jahres schließlich das Gesetz, das für die anstehende Bundestagswahl gilt. Darin sind Überhangmandate weiterhin möglich; aber sie werden vollständig durch so genannte Ausgleichsmandate kompensiert, so dass nun der Bundestag im Verhältnis der Stärke der Parteien zusammengesetzt ist. Ins-

Im Plenarsaal des Deutschen Bundestags könnte es eng werden. Bei dem Wahlergebnis von 2009 hätten nach dem neuen Wahlrecht 45 Stühle mehr eingebaut werden müssen; andere plausible Wahlergebnisse würden 800 oder mehr Plätze erfordern.

besondere hat der Gesetzgeber von der im letzten Urteil eingeräumten Möglichkeit, bis zu 15 (unkompensierte) Überhangmandate zuzulassen, keinen Gebrauch gemacht.

Das Gesetz ist ein neuer Versuch zur Lösung eines Problems, das so alt ist wie die Bundesrepublik. Zwei unterschiedliche Prinzipien wollen in Einklang gebracht werden:

AUF EINEN BLICK

PARADOXIEN DES WAHLRECHTS

1 Im bisherigen Wahlrecht konnte sich eine zusätzliche Stimme für eine Partei zu deren Ungunsten auswirken: Dieser Effekt wird als **negatives Stimmgewicht** bezeichnet.

2 Das neue Wahlgesetz hilft diesem verfassungswidrigen Zustand ab, indem es die problematischen **Überhangmandate** bereits am Anfang einbezieht und später ausgleicht.

- **Personenwahl:** Die Hälfte aller Bundestagssitze soll an diejenigen gehen, die in einem der (zurzeit 299) Wahlkreise die Mehrheit der Erststimmen erhalten (»Direktmandat«);
- **Verhältniswahl:** Die Anzahl aller Sitze für eine Partei soll ihrem Zweitstimmenanteil proportional sein (»Proporz«).

Erschwerend kommt hinzu, dass beide Forderungen nicht nur für den gesamten Bundestag, sondern für jedes Bundesland einzeln erfüllt werden sollen.

Das Gesetz löst diesen Konflikt, indem es in Kauf nimmt, dass die Inhaber der Direktmandate weniger – möglicherweise weit weniger – als die Hälfte der Abgeordneten stellen. Im neuen Bundestag werden mehr als die eigentlich vorgesehenen 598 (=2·299) Mitglieder sitzen.

Der Größenzuwachs ist theoretisch unbegrenzt. Auf Basis hochgerechneter aktueller Umfragewerte kommt man auf ungefähr 50 zusätzliche Sitze, aber 200 und mehr sind – zumindest bei zukünftigen Wahlen – keineswegs abwegig.

Man hätte zum Ausgleich des zu erwartenden Zuwachses das Bundesgebiet in weniger und dafür etwas größere Wahlkreise neu aufteilen können. Da aber zum Zeitpunkt der Verabschiedung die Aufstellung der Kandidaten für die

Wahlkreise und die Landeslisten bereits in vollem Gange war, schreckten die Parlamentarier offensichtlich vor einem derartigen Schritt zurück.

Pseudo- und Mindestsitzzahlen

Das neue Wahlsystem verfolgt einen mehrstufigen Ansatz (Kasten unten). Noch vor der Wahl bekommt jedes Bundesland entsprechend seiner Bevölkerungszahl ein bestimmtes vorläufiges Kontingent an Sitzen zugewiesen. Nach Auszählung der Erst- und Zweitstimmen berechnet man zunächst für jedes Bundesland getrennt, wie viele Sitze nach den ganz alten Regeln, genauer: nach dem für die Wahl von 1953 gültigen System, jede Partei erhalten würde: eine Anzahl, die ihrem Zweitstimmenanteil in diesem Land proportional ist. Nur die Art der Rundung auf ganze Sitzzahlen hat sich gegenüber 1953 geändert. Inzwischen verwendet man die Divisormethode mit Standardrundung nach Sainte-Laguë/Schepers. Hat eine Partei in einem Bundesland mehr Direktmandate errungen, als ihrer so berechneten Sitzzahl entspricht, so erhält sie diese Sitze zusätzlich; das sind die Überhangmandate.

Das Bundeswahlgesetz von 2013 im Detail

Wie wäre die Zusammensetzung des 2009 gewählten Bundestags bestimmt worden, wenn damals schon das aktuelle Gesetz gegolten hätte?

| 1 Pseudo- verteilung für das Saarland | Zweit- stimmen | ungerundete Sitzzahl | gerundete Sitzzahl | Direkt- mandate | Sitz- anspruch | Überhang- mandate |
|---|-------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| SPD | 144 464 | 1,93 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| CDU | 179 289 | 2,39 | 2 | 4 | 4 | 2 |
| Grüne | 39 550 | 0,53 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| FDP | 69 427 | 0,93 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| DIE LINKE | 123 880 | 1,65 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| Summe | 556 610 | | 8 | 4 | 10 | 2 |

1 **Pseudoverteilung:** Von den 598 Sitzen Sollgröße des Bundestages wird jedem Bundesland proportional der Bevölkerung ein festes Kontingent an Sitzen zugeordnet. (Da aktuelle Bevölkerungszahlen noch nicht vorliegen, verwenden die folgenden Berechnungen ersatzweise die doppelte Anzahl der Wahlkreise.) Innerhalb jedes Landes werden den Parteien, welche die Fünfprozenthürde überwunden haben, diese Sitze entsprechend dem Zweitstimmenanteil nach dem Divisorverfahren mit Standardrundung (Sainte-Laguë) zugeordnet. Erhält eine Partei in einem Bundesland mehr Direktmandate, als diese Berechnung ergibt, erhält sie stattdessen die Anzahl ihrer Direktmandate zugeteilt.

Beispiel Saarland (Tabelle links oben): Die Zweitstimmenzahlen werden durch einen Divisor geteilt, der so zu wählen ist (hier 75 000), dass sich nach Rundung das richtige Pseudo-Landeskontingent von 8 Sitzen ergibt.

Die für eine Partei ermittelten Sitze, über alle Länder zusammengezählt, ergeben die Mindestsitzzahl dieser Partei. Beispiel: Die CDU erhält mindestens 195 Sitze im Parlament.

| 2 Ober- verteilung | Zweit- stimmen | theoretische Sitzzahl | Mindestsitzzahl | Divisor = Zweitstimmen/ (Mindestsitzzahl - 1/2) | ungerundete Sitzzahl | gerundete Sitzzahl | Überhangmandate | Ausgleichsmandate |
|--------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|---|-------------------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| SPD | 9 990 488 | 146 | 148 | 67 732,1220 | 164,2800 | 164 | 2 | 16 |
| CDU | 11 828 277 | 173 | 195 | 60 813,7635 | 194,5000 | 195 | 22 | 0 |
| Grüne | 4 643 272 | 68 | 69 | 67 784,9927 | 76,3523 | 76 | 1 | 7 |
| FDP | 6 316 080 | 93 | 91 | 69 790,9392 | 103,8594 | 104 | 0 | 11 |
| DIE LINKE | 5 155 933 | 76 | 76 | 68 290,5033 | 84,7823 | 85 | 0 | 9 |
| CSU | 2 830 238 | 42 | 45 | 63 600,8539 | 46,5394 | 47 | 3 | 2 |
| Summe | 40 764 288 | 598 | | | | 671 | 28 | 45 |

2 **Oberverteilung:** Die Größe des Bundestags wird so gewählt, dass jede Partei bei proportionaler Verteilung nach dem Divisorverfahren mit Standardrundung mindestens ihre Mindestsitzzahl erhält (Tabelle links unten).

Obwohl die Grünen in keinem Land ein klassisches Überhangmandat erzielt haben, liegt ihre Mindestsitzzahl 69 um eins höher, als ihrem Zweitstimmenanteil auf Bundesebene entspricht. Hier haben kumuliertes Rundungsglück, unterschiedliche Wahlbeteiligung und andere Effekte zusammen-

Das ist der entscheidende Trick zur Vermeidung negativer Stimmgewichte: Die Überhangmandate werden bereits hier ins Verfahren eingeführt (und später ausgeglichen) statt wie bisher ganz am Schluss.

Nennen wir die derart ermittelte Sitzzahl jeder Partei in einem Bundesland ihre Pseudositzzahl; denn sie dient nicht der Zuweisung von Sitzen, sondern einzig als Eingangsgröße für den nächsten Rechenschritt: Für jede Partei werden ihre Pseudositzzahlen aus allen Bundesländern zusammengezählt. Diese Summe bezeichnen wir im Folgenden als die »Mindestsitzzahl« dieser Partei. Die Größe des Bundestages wird nun so erhöht, dass jede Partei mindestens ihre Mindestsitzzahl erhält und zugleich der Proporz eingehalten wird. Für Überhangmandate erhalten die anderen Parteien also Ausgleichsmandate.

Die so ermittelten Sitze einer Partei werden unter Verrechnung der Direktmandate auf ihre Landeslisten verteilt. Von den so ermittelten, nunmehr endgültigen Sitzzahlen jedes Bundeslands erhalten zuerst die Gewinner der Direktmandate je einen Sitz und dann die Inhaber der Listenplätze, in der Reihenfolge der Liste.

Damit stellt das System – bis auf unvermeidbare Rundungsfehler – den vollständigen Proporz wieder her; und wer nach dem bisherigen Verfahren einen Sitz erhalten hätte, muss diesen in aller Regel nicht wieder abgeben – was jedem Abgeordneten, der wiedergewählt werden möchte, die Zustimmung zum Gesetz erleichtert haben dürfte. Es kann einige wenige Ausnahmen geben: Wenn eine Partei beim Runden auf ganze Sitzzahlen in mehreren Ländern Pech hat, fällt ihre Mindestsitzzahl niedriger aus als bisher; dasselbe geschieht, wenn die Wahlbeteiligung in einem Bundesland ungewöhnlich hoch war, so dass ein Pseudositz dort überproportional viele Stimmen erforderte.

Aber das größte Problem ist ein anderes: Die Partei mit dem größten relativen Unterschied zwischen Mindestsitzzahl und Sitzanspruch nach Proporz bestimmt die Anzahl der Ausgleichsmandate – und das sind umso mehr, je kleiner die Partei ist. Eine Fünf-Prozent-Partei, die über ihren proportionalen Anteil hinaus (Überhang-)Mandate erringt, schleppt zur Wiederherstellung des Proporz für jedes zusätzliche eigene Mitglied 19 Angehörige der anderen Parteien mit ins Parlament – bis auf Rundungsdifferenzen.

gewirkt. Die Definition von »Überhangmandat« ist daher aufzuweichen zu »Mandat, das Ausgleichsmandate erfordert«.

Eine Verteilung nur nach Zweitstimmen auf die Sollgröße 598 Sitze (Spalte »theoretische Sitzzahl«) würde den Bundesdivisor 68195 erfordern, der nun in aller Regel zu groß ist. Stattdessen dividiert man für jede Partei deren Zweitstimmenanzahl durch den Wert (Mindestsitzzahl – 1/2); der kleinste dieser Werte, in diesem Fall 60813,7635 aus den CDU-Zahlen, ist der Bundesdivisor. Aus ihm und den Zweitstimmenzahlen ergeben sich – nach Rundung – die Sitzzahlen jeder Partei und daraus die Gesamtgröße des Bundestags.

Anstelle dieser Rechnung kann man den Bundestag schrittweise vergrößern, bis die Forderung nach der Mindestsitzzahl für jede Partei erfüllt ist; so beschreibt es das neue Wahlgesetz.

3 Unterverteilung: Man teilt für jede Partei die oben ermittelte Gesamtsitzzahl nach dem Verfahren von Friedrich Pukelsheim (Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 96) so auf die Länder auf, dass alle Direktmandate erhalten bleiben und im Übrigen die Sitze proportional den Zweitstimmenzahlen auf die Landeslisten verteilt werden. Die genaue Vorschrift lautet: Man ermittelt für jede Partei einen Parteidivisor mit der Eigenschaft, dass die Summe des Maximums der Werte »Zweitstimmenzahl der Landesliste geteilt durch Parteidivisor, standardgerundet« und »Anzahl gewonnener Direktmandate in dem Land«, summiert über alle Länder, der Sitzzahl der Partei aus der Oberverteilung entspricht.

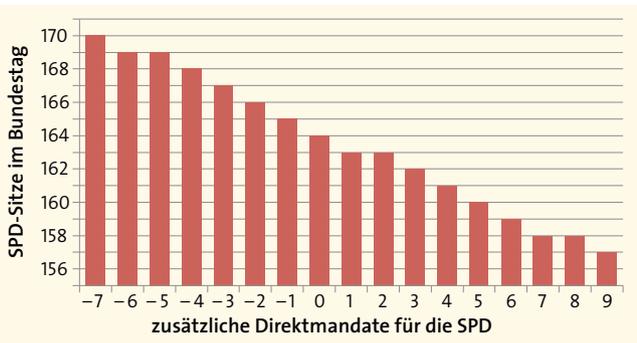
Für die CDU ergibt sich ein Parteidivisor von 68400 (Tabelle rechts). In der Pseudoverteilung hatte die Partei in Niedersachsen einen Sitz weniger, in Sachsen-Anhalt einen mehr erhalten.

Insgesamt werden also drei Varianten des Divisorverfahrens mit Standardrundung angewandt: »normal« mit fester Zahl zu

verteiler Sitze in der Pseudoverteilung (Schritt 1), mit festgelegtem Divisor in der Oberverteilung (Schritt 2) und »direktmandatsbedingt«, das heißt nach der oben genannten Vorschrift, in der Unterverteilung (Schritt 3).

| 3 Unterverteilung für die CDU | Zweitstimmen | Direktmandate | ungerundete Sitzzahl | gerundete Sitzzahl | Maximum |
|---|-------------------|---------------|----------------------|--------------------|------------|
| Schleswig-Holstein | 518 457 | 9 | 7,58 | 8 | 9 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 287 481 | 6 | 4,20 | 4 | 6 |
| Hamburg | 246 667 | 3 | 3,61 | 4 | 4 |
| Niedersachsen | 1 471 530 | 16 | 21,51 | 22 | 22 |
| Bremen | 80 964 | 0 | 1,18 | 1 | 1 |
| Brandenburg | 327 454 | 1 | 4,79 | 5 | 5 |
| Sachsen-Anhalt | 362 311 | 4 | 5,30 | 5 | 5 |
| Berlin | 393 180 | 5 | 5,75 | 6 | 6 |
| Nordrhein-Westfalen | 3 111 478 | 37 | 45,49 | 45 | 45 |
| Sachsen | 800 898 | 16 | 11,71 | 12 | 16 |
| Hessen | 1 022 822 | 15 | 14,95 | 15 | 15 |
| Thüringen | 383 778 | 7 | 5,61 | 6 | 7 |
| Rheinland-Pfalz | 767 487 | 13 | 11,22 | 11 | 13 |
| Bayern | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Baden-Württemberg | 1 874 481 | 37 | 27,40 | 27 | 37 |
| Saarland | 179 289 | 4 | 2,62 | 3 | 4 |
| Insgesamt | 11 828 277 | 173 | | | 195 |

MARTIN FEHNBÜRCH



Auch nach dem neuen Wahlrecht würde es die SPD Sitze kosten, wenn sie der CDU Direktmandate abnähme, und ein Verlust entsprechend Sitze einbringen (Modellrechnung auf Basis des Wahlergebnisses von 2009). Nur würde dieser Verlust beziehungsweise Gewinn jetzt durch gleichartige Änderungen bei den anderen Parteien kompensiert.

Wenn das neue Gesetz bereits für die Bundestagswahl von 2009 gegolten hätte, säßen im derzeit noch amtierenden Bundestag neben den 28 Inhabern von Überhangmandaten 45 Ausgleichs-Abgeordnete, was die Gesamtgröße des Parlaments auf 671 statt 598 Abgeordnete anheben würde. Wenn die nur in Bayern antretende CSU ein Wahlergebnis erzielen würde wie 2009 die CDU in Baden-Württemberg, Saarland oder Mecklenburg-Vorpommern (bei reichlich Direktmandaten nur etwa ein Drittel der Zweitstimmen), käme der Bundestag nach dem neuen Gesetz auf fast 800 Mitglieder.

Ein weiteres verfassungsrechtliches Problem ist ein dem negativen Stimmgewicht ähnlicher Effekt (Kasten S. 72, rechte Grafik, und Grafik oben). Dieser hängt am Prinzip der Ausgleichsmandate und betrifft damit in ähnlicher Form auch vierzehn Landtagswahlssysteme.

Nehmen wir an, ein Direktkandidat der SPD vereinigt so viele Erststimmen auf sich, dass er der CDU den Wahlkreis wegnimmt. Die verliert daraufhin ein Überhangmandat; dieses muss nicht mehr ausgeglichen werden mit der Folge, dass auch ein SPD-Vertreter weniger ins Parlament einzieht (Grafik oben).

Haben sich also die zusätzlichen Stimmen für den SPD-Kandidaten zu Ungunsten seiner Partei ausgewirkt? Eigentlich nicht. Die Fans, die ihm zum Sieg verholfen haben, haben wenig Anlass, ihre Entscheidung zu betrauern. Denn es vermindert sich zwar die Anzahl der SPD-Abgeordneten im Bundestag; aber auch andere Parteien, insbesondere die CDU, verlieren Sitze. Der prozentuale Anteil an der Gesamtzahl der Abgeordneten bleibt also gleich – bis auf Rundungsfehler. Deren Effekt dürfte allerdings außerhalb einer Nachwahl deutlich schwerer vorherzusehen und zu berechnen sein und ist obendrein *unvermeidbar* (ein Kriterium des Bundesverfassungsgerichts für ein akzeptables Wahlrecht), soweit man die Ausgleichsmandate selbst als unvermeidbar akzeptiert. Es ist nämlich nicht möglich, ihn unabhängig von allen anderen Effekten mathematisch zu erfassen. Der Effekt

ist allerdings nicht *selten* (damit ist ein anderes Kriterium des Bundesverfassungsgerichts nicht erfüllt).

Jedenfalls hat er eine andere Qualität als das bisherige negative Stimmgewicht. Denn bei einem Wahlsystem mit Ausgleichsmandaten kommt es weniger auf die absolute Zahl der Sitze einer Partei an als vielmehr auf ihren Sitzanteil. Auch dieser kann einen Sprung nach unten machen, allerdings bleibt die Wirkung auf einen Rundungseffekt begrenzt.

Rechnen befriedigend, Deutsch mangelhaft

Negatives Stimmgewicht im bisherigen Sinn ist dagegen immer noch durch das Erschöpfen einer Landesliste möglich. Wenn eine Landesliste zu wenige Kandidaten (oder Nachrücker) hat, bleiben die nicht besetzbaren Sitze unbesetzt. Dann können mehr Stimmen für eine Partei weniger Sitze bedeuten; denn wenn sie in diesem Land weniger Stimmen erhalten hätte, wäre der Sitz bei der Unterverteilung an eine andere Landesliste der Partei gefallen.

Im Großen und Ganzen ist das neue Wahlrecht eine Verbesserung gegenüber dem bisherigen Bundeswahlgesetz. Allerdings ist der Gesetzestext überaus unklar formuliert. Selbst die verantwortlichen Sachpolitiker geben der Hoffnung Ausdruck, dass wenigstens der Bundeswahlleiter es verstanden habe. Auch die hier gegebene Beschreibung beruht weniger auf dem Wortlaut des Gesetzes als auf den Modellrechnungen des Bundeswahlleiters.

Das Bundesverfassungsgericht hatte im Urteil von 2008 dem Gesetzgeber den Auftrag erteilt, das Bundeswahlgesetz auf eine normenklare Grundlage zu stellen. Diesem ist insofern ein Versagen auf ganzer Linie zu attestieren.

Die noch bestehenden Ungereimtheiten im Wahlsystem beruhen auf dem Versuch, mehr Ziele zu verwirklichen, als unter allen Umständen möglich ist. Das geht so lange einigermaßen gut, wie bei den Wählern die Präferenz für einen Kandidaten und die für seine Partei im Wesentlichen zusammenfallen – was bei der gestiegenen Anzahl der Parteien und der zunehmenden Neigung der Wähler, beide Stimmen unabhängig voneinander zu nutzen, immer weniger der Fall ist.

So kann man nur hoffen, dass die Wahl im September 2013 das Hohe Haus nicht aus den Nähten platzen lässt und der nächste Bundestag endlich ein Wahlgesetz mit klaren Prinzipien und nachvollziehbarer Beschreibung schafft. ☞

DER AUTOR



Martin Fehndrich (www.wahlrecht.de) ist promovierter Physiker und arbeitet im Bereich Akustik bei einem Schienenradhersteller in Bochum. Er war an der Wahlprüfung 2008 und der Verfassungsbeschwerde 2012 vor dem Bundesverfassungsgericht maßgeblich beteiligt.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1202353

Leserreisen – Frühjahr 2014

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern im Frühjahr 2014 die beiden beliebten Reisen zu den großen Observatorien nach Chile und zu den spektakulären Polarlichtern nach Lappland an, sowie eine neue Kurzreise nach Moskau mit Besuch des Sternenstädtchen



Chile

ZU DEN GRÖSSTEN
STERNWARTEN DER ERDE

Unsere erste Leserreise des Jahres führt Ende Januar 2014 wieder in das faszinierende Land der großen Observatorien – in die Atacamawüste und in die Welt der hohen Anden.

Unter der fachkundigen Leitung von Joachim Biefang sind die astronomischen Highlights der Besuch der weltbekannten Großobservatorien Las Campanas, La Silla und natürlich des Cerro Paranal mit seinen berühmten 8,2 m-VLT-Teleskopen und der Interferometrieanlage. Auch eine Sonderführung zu der Montagestation des ALMA-Projekts ist eingeplant.

Landschaftlich stehen vor allem die Atacamawüste und die fantastische Welt der hohen Anden auf dem Programm: San Pedro de Atacama, die große Salzkordilliere, der viertgrößte Salzsee der Welt, die Hochlandlagunen des Altiplano und El Tatio Geysire. Teleskopbeobachtungen am eindrucksvollen Himmel der südlichen Hemisphäre ergänzen dieses erlebnisreiche Reiseprogramm.

In einer siebentägigen Verlängerung geht es nach Südküste – das wildromantische Patagonien mit Magellanstraße, Torres del Paine Nationalpark, Gletscherwelten und Pinguinkolonien.

Hauptreise 21. 1. – 4. 2. 2014:

Preis € 4760,- im DZ/F

Verlängerung 4. 2. – 12. 2. 2014:

Preis € 1970,- im DZ/F



Lappland

POLARLICHTREISE NACH
NORDSKANDINAVIEN

Auf Grund gestiegener Nachfrage bieten wir im Jahr 2014 gleich zwei Leserreisen in das Gebiet des Inarisees, zu den Polarlichtern des hohen Nordens, an.

Das Reiseprogramm am Inarisee in Finnland und im Pasviktal in Norwegen an der russischen Grenze bietet neben geführten Polarlichtbeobachtungen bei stabilem Festlandklima und interessanten Vorträgen viele Winteraktivitäten zur Auswahl: Husky-, Rentier- oder Schneescooter-Safaris und skandinavische Sauna, sowie eine Königskrabben-Safari. Auch die lappländische Samen-Kultur wird bei dieser Reise nicht zu kurz kommen.

Als Verlängerungsoption beginnt in Kirkenes eine 6-tägige Kreuzfahrt entlang der malerischen norwegischen Küste nach Bergen. Bei dieser faszinierenden Hurtigrutenkreuzfahrt erwarten uns viele Küstenstationen über Hammerfest, Tromsø, die Inselwelt der Lofoten, Bodø, Trondheim nach Bergen.

Die Reise wird von unserem erfahrenen Polarlichtspezialisten Joachim Biefang betreut: Vorträge, laserunterstützte Führungen am Nordhimmel – ein handliches Planetarium und ein Teleskop sind auch mit dabei.

1. Termin: Hauptreise 6. 3. – 15. 3. 2014

Verlängerung 15. 3. – 21. 3. 2014:

2. Termin: Hauptreise 19. 3. – 28. 3. 2014

Verlängerung 28. 3. – 3. 4. 2014:

Preis Hauptreise: € 2130,- im DZ/HP

Preis Verlängerung: € 1970,- im DZ/F



Moskau

RUSSISCHE RAUMFAHRT
ERLEBEN

Bei dieser im Jahr 2013 neu konzipierten 6-tägigen Leserreise wird die sowjetische und russische Raumfahrt das Hauptthema sein. Es werden das im Jahr 2009 umfassend modernisierte Kosmonautenmuseum in Moskau, das bekannte Sternenstädtchen (Ausbildungszentrum für Astronauten/Kosmonauten) und das staatliche Ziolkowski Museum für die Geschichte der Raumfahrt sowie das Wohnhaus von Ziolkowski in Kaluga besucht.

Prof. Dieter B. Herrmann wird uns am Anfang der Reise mit seinem interessanten Vortrag über die sowjetisch-russischen und amerikanischen Meilensteine der Raumfahrt umfassend in das Thema einführen. Eine Stadtrundfahrt in Moskau mit Besuch des Kremls und dem Roten Platz, sowie eine Tour nach Sergej Possad (Zagorsk) in das sehenswerte Dreifaltigkeitskloster, dem Zentrum der russisch-orthodoxen Kirche, bereichern das Reiseprogramm landeskundlich.

Ein Vortrag über den Weltraumbahnhof Baikonur wird das Thema am Ende der Reise abrunden. Die Reise findet mit deutscher Reisebetreuung und örtlich deutschsprachiger Reiseleitung statt.

Reisetermin: 21. 4. – 28. 4. 2014,

sechstägig mit Flug ab Berlin oder Düsseldorf (andere Flughäfen auf Anfrage)

Preis € 1590,- im DZ/HP, zzgl. Visumgebühr

INFOPAKET UND BUCHUNG ÜBER:

Wittmann Travel · Urenfleet 6e · 21129 Hamburg
Telefon: 040 851053-76 · Fax: 040 851053-77
E-Mail: info@wittmann-travel.de

ARCHÄOASTRONOMIE

Keltische Sternenforscher

Astronomie stand bei den alten Kelten hoch im Kurs. Vermutlich beeinflussten sogar die »Großen Mondwenden« die Ausrichtung von Gräbern und Kultanlagen.

Von Allard Mees und Bruno Deiss



PAVELOVDKY MIT FRIEL GEN. VOM MUSEUM KEITENWELT AM CLAUBERG

» Ihre Hauptlehre ist, die Seele sei nicht sterblich, sondern gehe von einem Körper nach dem Tod in einen anderen über, und sie meinen, diese Lehre sporne besonders zur Tapferkeit an, da man die Todesfurcht verliere. Auch sprechen sie ausführlich über die Gestirne und ihre Bewegungen, über die Größe der Welt und Länder.« Im sechsten Buch von »De Bello Gallico«, seinem Rechenschaftsbericht für den römischen Senat, befasste sich Gaius Julius Cäsar nicht nur mit kriegsrelevanten Themen wie dem gefürchteten Todesmut gallischer Krieger, sondern er schilderte auch andere Aspekte der spätkeltischen Kultur des von den Rö-

mern als »Gallia« bezeichneten Raums. Sein Interesse an ihrer Astronomie hatte auch professionelle Gründe: Cäsar bekleidete damals das Staatsamt des Pontifex maximus und war in dieser Funktion unter anderem für den römischen Kalender zuständig. Seine Anmerkungen zur Beschäftigung der Druiden mit der Astronomie bestätigen aus heutiger Sicht die Notizen anderer römischer und auch griechischer Autoren der Antike.

Die Kelten selbst haben kaum Schriftzeugnisse hinterlassen. Was durchaus nicht selbstverständlich ist, denn sie standen jahrhundertlang in intensivem kulturellem Austausch mit den Schriftkulturen des Mittelmeerraums. Dazu liefert der Feldherr eine mögliche Erklärung: »Es ist nämlich streng verboten, ihre Lehre aufzuschreiben, während sie in fast allen übrigen Dingen, im öffentlichen wie im privaten Verkehr, die griechische Schrift verwenden. Sie wollen ihre Lehre nicht in der Masse verbreitet sehen und zudem verhindern, dass die Zöglinge im Vertrauen auf die Schrift ihr Gedächtnis zu wenig üben.«

Tatsächlich fanden keltische Stämme von der spanischen Halbinsel bis nach Anatolien die griechische und lateinische Schrift mitunter durchaus passend – für kurze Texte wie Gesetze oder Grabinschriften. Doch selbst diese Praxis war vermutlich nicht weit verbreitet, denn es sind nur wenige Beispiele erhalten.

Hüter allen Wissens waren die Druiden, die ihre Kenntnisse in religiösen Dingen ebenso wie in astronomischen Be-

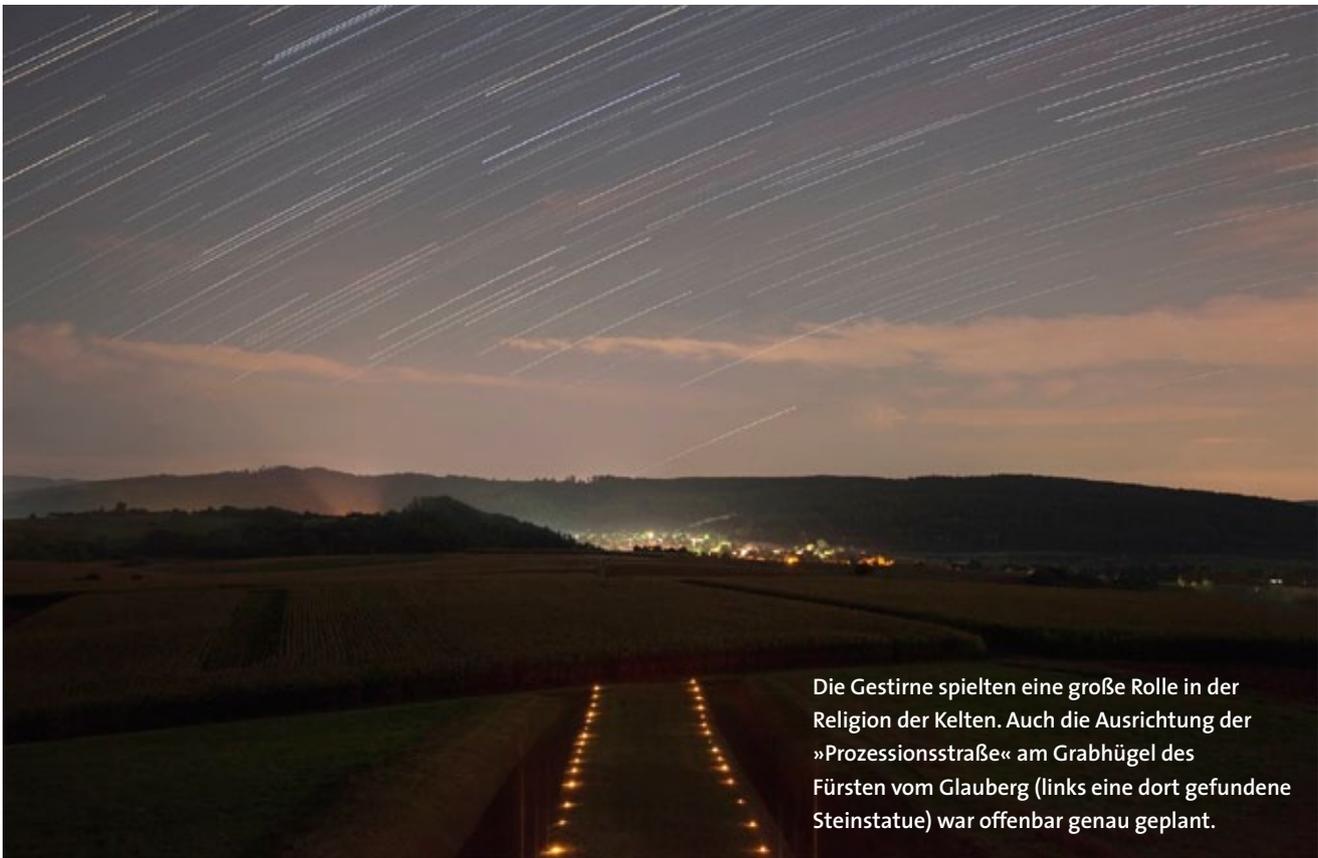
AUF EINEN BLICK

SONNE, MOND UND STERNE

1 Die **Beobachtung der Gestirne**, insbesondere des Mondes, spielte in der spätkeltischen Kultur eine wichtige Rolle. Das berichten römische und griechische Quellen.

2 Archäologische Befunde zu frühkeltischen Grabanlagen zeigen, dass dieses Interesse bereits Jahrhunderte zuvor bestand. So waren wichtige Achsen auf bestimmte **Mondaufgangspunkte am Horizont** ausgerichtet worden.

3 **Archäoastronomen** haben experimentell Möglichkeiten entdeckt, wie dies ohne aufwändige Mathematik zu bewerkstelligen war: mit nicht mehr als einem Brett und astronomischem Grundwissen.



Die Gestirne spielten eine große Rolle in der Religion der Kelten. Auch die Ausrichtung der »Prozessionsstraße« am Grabhügel des Fürsten vom Glauberg (links eine dort gefundene Steinstatue) war offenbar genau geplant.

BÄNNE SPARENBERG / WESTÄLISCHE VOIKSSTERNWART UND PLANETARIUM RECKLINGHAUSEN

langen mündlich weitergaben. Nach heutiger Kenntnis handelte es sich dabei nicht um mistelschneidende Schamanen, sondern um speziell ausgebildete Mitglieder der Oberschicht, die neben ihrer sakralen Funktion auch politische Ämter innehaben konnten.

Der griechische Philosoph Poseidonios von Apameia, der im 2. Jahrhundert v. Chr. keltische Gebiete bereiste, schrieb über sie: »Bei ihnen herrscht die Lehre des Pythagoras, dass die Seelen der Menschen unsterblich seien.« Für diesen Import einer griechischen Geistesschule spielte aber wohl nicht allein ihr Glaube an ein Leben nach dem Tod eine Rolle: »Die Kelten ehren die Druiden als Propheten und Seher, weil sie ihnen aus Ziffern und Zahlen mittels pythagoräischer Wissenschaft manches voraussagen«, überlieferte der Kirchenvater Hippolyt im 2. Jahrhundert n. Chr.

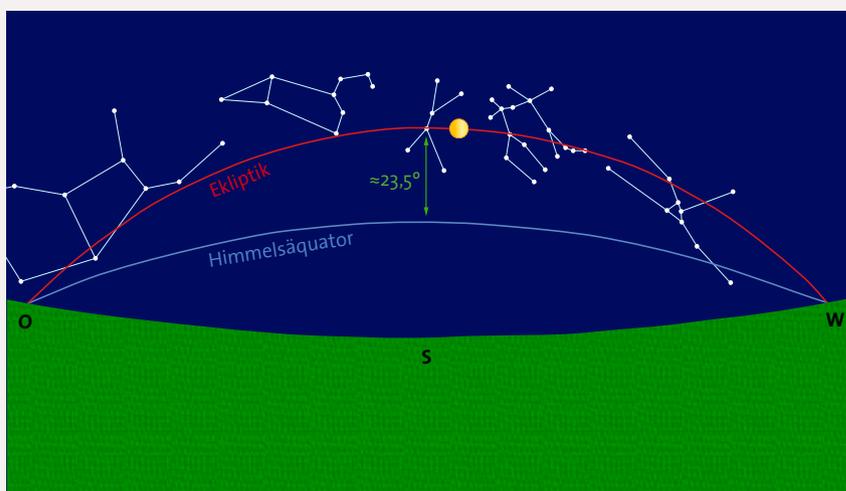
Der heilige Zyklus des Mondes

Heutzutage mag das überraschen, gilt der im 6. Jahrhundert v. Chr. lebende Pythagoras doch eher als Pionier der Mathematik; sein Lehrsatz über rechtwinklige Dreiecke ist aus der Geometrie nicht wegzudenken. Sehr wahrscheinlich war er aber auch Begründer einer religionsartigen Weltanschauung, die Seelenwanderung und Wiedergeburt lehrte. Pythagoras sah darin – so die Legende – Analogien zu den Zyklen des Kosmos, die er eingehend erforschte, möglicherweise sogar anhand jahrhundertealter Aufzeichnungen babylonischer Priester (siehe Foto S. 80).

Vermutlich stand die Astronomie auch bei den Kelten in einem religiösen Zusammenhang. Ihre Feste feierten sie laut dem im 1. Jahrhundert v. Chr. lebenden Chronisten Diodorus Siculus unter anderem in einem 19-Jahres-Rhythmus, immer wenn der Vollmond seinen tiefsten Stand im Süden hatte. Das muss nicht überraschen, denn in der Antike waren Mondkalender verbreitet, da sich die Zyklen des Erdtrabanten leicht beobachten ließen. Allerdings ist das zwölf Mondmonate umfassende Jahr um elf Tage kürzer als das Sonnenjahr, was auf lange Sicht Korrekturen erforderlich macht, weil sich sonst die Jahreszeiten im Kalender verschieben.

Für einen Astronomen der Antike stand die Erde im Zentrum des Kosmos. Über ihm wölbte sich die Himmelskuppel auf einer vom Horizont allseitig begrenzten Scheibe. Auf ihr vollzog sich Tag für Tag und Nacht für Nacht ein wunderbares Schauspiel: Die Sonne, der Mond, die Sternbilder und Planeten gingen am östlichen Horizont auf und wanderten über das Firmament, um dann im Westen wieder unterzugehen (siehe Grafik S. 80). Die Gründe dieser Bewegungen erkannten erst die Gelehrten der Renaissance: Die Erde dreht sich um die eigene Achse sowie um die Sonne, die Erdachse steht zur Ebene dieses Umlaufs aber nicht senkrecht, was die Jahreszeiten hervorruft. Ohne das Warum zu kennen, registrierten die frühen Astronomen das Wie: Während jeder Stern und jedes Sternbild jahrein, jahraus seinen festen Aufgangsort am östlichen Horizont hat, variieren die Aufgangsorte von Sonne und Mond innerhalb eines Jahres beziehungsweise Monats.

Ein keltischer Astronom, der um 500 v. Chr. zur Zeit der Sommersonnenwende den südlichen Nachthimmel beobachtete, hätte dieses Sternenmuster gesehen. Planeten, Sonne und Mond schienen sich von der Erde aus betrachtet entlang eines schmalen Bands durch die Sternbilder zu bewegen. Dessen Mittellinie – die Ekliptik – entspricht dem Jahreslauf der Sonne vor dem Fixsternhintergrund. Im Sommerhalbjahr liegt sie oberhalb, im Winterhalbjahr unterhalb des Himmelsäquators. Welche Sternbilder die Kelten kannten, wissen wir nicht. Die hier dargestellten entsprechen unseren heutigen Vorstellungen.

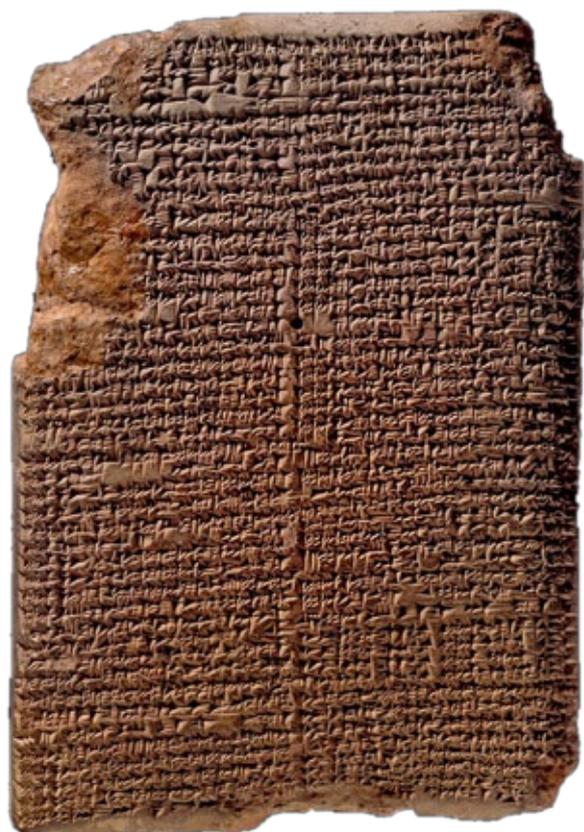


ALFARO/REES

Ein aufmerksamer Betrachter erkannte in dieser Bewegung eine gleichmäßige Schwingung entlang des Horizonts (siehe Grafik rechte Seite). Die Sonne vollführt sie im Jahresrhythmus zwischen Sommer- und Wintersonnenwende, wenn sie die höchste beziehungsweise niedrigste Mittagshöhe erreicht. Der Aufgangsort des Mondes pendelt schneller,

nach dem heutigen Kalender etwa innerhalb eines Monats, doch die genaue Lage der beiden Wendepunkte variiert. So gibt es Jahre, in denen sie eng beieinanderbleiben, und andere, in denen der Mond noch weiter südlich beziehungsweise nördlich aufgeht als die Sonne.

Aber auch diesem scheinbar unsteten Verhalten des Mondes liegt ein Rhythmus zu Grunde. Alle 18,61 Jahre – in der antiken Lehre alle 19 Jahre – wiederholt sich dieser Zyklus, und der Mond erreicht die Aufgangsorte geringster Distanz, Kleine Mondwenden genannt, beziehungsweise seinen nördlichsten und südlichsten Aufgangsort, heute als Große Nördliche und Südliche Mondwende bezeichnet. Diese sind besonders auffällig, denn in einem solchen Jahr zieht der Sommervollmond eine auffällig flache Bahn am Nachthimmel und scheint nur eine gute Hand breit über dem Horizont zu stehen. Der Hinweis Diodors über die im 19-Jahres-Takt stattfindenden Feierlichkeiten bezeugt, dass spätkeltische Kulturen dies als besonderes Himmelsereignis ansahen.



THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM (INV.-NR. 86378)

Astronomische Beobachtungen babylonischer Priester (hier eine Tontafel von 687 v. Chr. zur Pendelbewegung des Mondes um die Ekliptik) waren griechischen Gelehrten vertraut. Wohl von diesen gelangte das Wissen bis zu den Kelten.

Mondwenden und Hügelgräber

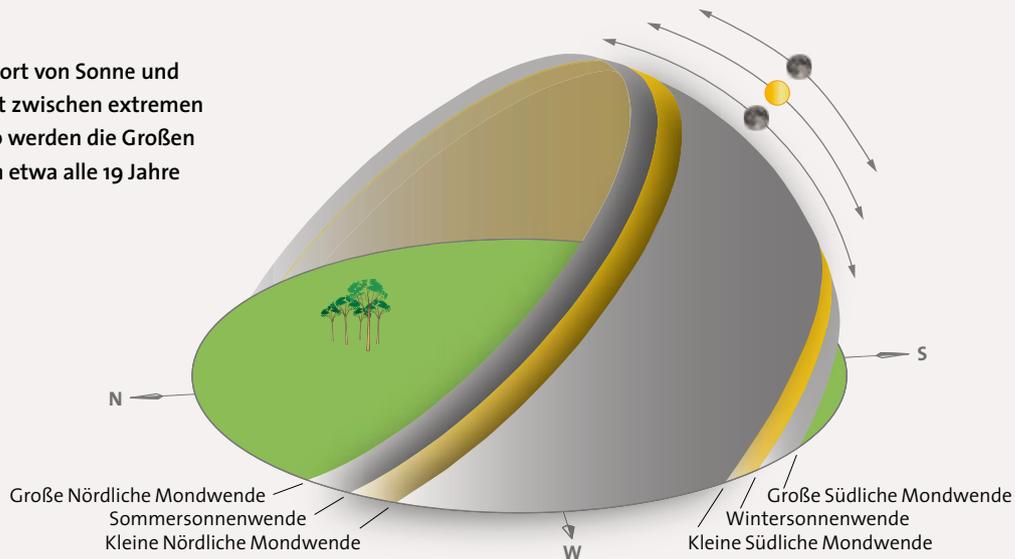
Galt das auch schon in früherer Zeit, als keltische Höhensiedlungen im mitteleuropäischen Raum zu »Fürstensitzen« ausgebaut wurden (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2013, S. 64)? Da über diese Kulturphase nur wenige, dazu kurze und nicht konsistente Berichte erhalten sind, vermag hier lediglich die Archäologie Hinweise zu liefern.

Vor zehn Jahren fiel einem von uns (Deiss) die Orientierung der so genannten Prozessionsstraße auf, die zum Fürstengrab vom Glauberg bei Frankfurt führt: Angelegt im 4. Jahrhundert v. Chr., ziehen zwei parallele Gräben auf etwa 300 Meter Länge schnurgerade hinauf zur Grabstätte. Blickt man umgekehrt vom Monument entlang dieser Linie zum Horizont, trifft ihre Verlängerung den südlichsten Aufgangspunkt des Mondes zu Zeiten der Großen Mondwende (siehe Foto rechts).

Auch eine Anlage unterhalb des Fürstensitzes auf dem Mont Lassois, einem landschaftsbherrschenden Bergrücken

Der Aufgangsort von Sonne und Mond pendelt zwischen extremen Positionen. So werden die Großen Mondwenden etwa alle 19 Jahre erreicht.

ALLARD MEES UND KATJA HÖLZL



am Oberlauf der Seine, ist so ausgerichtet. Im 6. Jahrhundert v. Chr., während der späten Hallstattzeit, waren dort Gräben ausgehoben worden, die ein etwa 24 mal 25 Meter großes Rechteck bildeten. Darin wurden Teile von zwei Götterstatuen gefunden. Zudem war diese Anlage Teil einer ausgedehnten Nekropole nahe des Flusses. Ihr sakraler Charakter ist also sehr wahrscheinlich, daher nennen Forscher sie Heiligtum. Nach Untersuchungen von Bruno Deiss weisen Achse und die durch den Eingang vorgegebene Blickrichtung wieder zum Aufgangsort der Großen Südlichen Mondwende hin.

Dass es sich dabei nicht um Sonderfälle handelt, zeigt eine Überprüfung verschiedener Grabhügel von einem von uns (Mees). Ein markantes Beispiel ist der mehr als 100 Meter durchmessende Magdalenenberg-Tumulus bei Villingen-Schwenningen, der aus dem späten 7. Jahrhundert v. Chr. stammt. In den 1970er Jahren haben Archäologen ihn Schicht für Schicht abgetragen. Dabei entdeckten sie etliche massive Holzstangen. Diese waren ursprünglich so aufgestellt worden, dass sie nach der Aufschüttung des Grabhügels aus ihm herausragten. Die Grabungsdokumentation ist hier leider etwas ungenau, doch anscheinend liefen die Stangenreihen auf die Großen und Kleinen Wendepunkte des Mondes am Horizont zu.

Im Fluchtpunkt dieser Linien beziehungsweise im Zentrum des Tumulus hatte man einen Fürsten beigesetzt, erkennbar an den reichlichen, kostbaren Beigaben, die um das Skelett des Mannes herum zu Tage kamen. Darüber hinaus enthielt der künstliche Hügel weitere 126 Gräber, die laut dendrochronologischer Datierung der Holzüberreste von 616 bis 593 v. Chr. angelegt worden waren. Ihre Ausrichtung überraschte: Die Körper waren so bestattet worden, dass sie auf konzentrischen Kreisen um das Zentralgrab lagen, in der einen Hügelhälfte aber so, dass die Linie Füße-Kopf dem Uhrzeigersinn folgte, in der anderen umgekehrt. Die Kopfrichtungen definierten also zwei Halbkreise. Deren Trennlinie traf in der Verlängerung den Horizontpunkt der Kleinen Südlichen Mondwende.

Dies ist kein Einzelfall: Dieselben geometrischen Strukturen lassen sich auch bei kleineren Grabanlagen nachweisen. So zielten die Tumuli von Courtesoult im Burgund und von Dattingen beim badischen Kaiserstuhl auf die Großen Mondwenden, der Grabhügel beim burgundischen Bressey auf die Kleinen. Ebenfalls auf die Großen Mondwenden orientiert scheinen die Ecken der Grabkammer des berühmten Fürstengrabs von Hochdorf nördlich von Stuttgart zu sein.

Doch damit nicht genug. Allard Mees hat vor wenigen Jahren die räumliche Anordnung der Gräber im Tumulus von Villingen-Schwenningen mit dem Sternenhimmel zur Sommersonnenwende vor 2600 Jahren verglichen, wie er sich mit Hilfe astronomischer Programme berechnen lässt. Zu dieser Zeit stand der Vollmond tief, wie es Diodorus erwähnt hat. Außerdem wären den Berechnungen zufolge Sternbilder, die Autoren der Mittelmeerkulturen namentlich erwähnt haben, im Muster der Grablegungen vertreten. Allerdings nicht mit 100-prozentiger Genauigkeit: Der Drache und der Kleine Bär etwa hätten damals im Zenit gestanden,



BRUNO DEISS; KLEINES FOTO: VERA RUPP

Die »Prozessionsstraße« vom Glauberg (siehe Einklinker) trifft den Aufgangspunkt der Großen Südlichen Mondwende (Sommer 2006).

Experimentelle Archäoastronomie

Wie sicher darf man sein, dass die Erbauer eines prähistorischen Monuments wirklich beabsichtigten, es nach einer bestimmten Himmelsrichtung zu orientieren? Im Einzelfall lässt sich eine zufällige Übereinstimmung nur selten ausschließen, mehrere vergleichbare Befunde sprechen jedoch für ein durchgängiges Konzept. Eine Abweichung von plus oder minus einem Grad gilt Experten noch als akzeptabel.

Doch wie genau war eine astronomisch bedeutsame Richtung überhaupt mit den Mitteln der Zeit zu bestimmen? Stand der Sonnenaufgang im Fokus wie etwa vor gut 7000 Jahren bei der Kreisgrabenanlage beim heutigen Goseck in Sachsen-Anhalt, war die Aufgabe vergleichsweise einfach: Der entsprechende Ort am Osthorizont ändert sich von Tag zu Tag nur wenig, und zur Zeit einer Sonnenwende bleibt er für zirka acht Tage konstant.

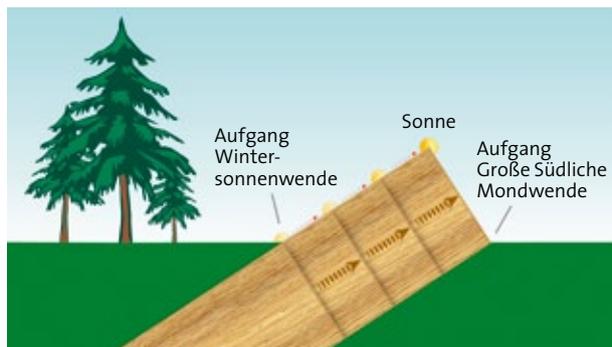
Der Mond aber geht auf Grund seines schnellen Erdumlaufs von einem zum nächsten Mal an einer um mehrere Grad verschobenen Stelle auf. Deren südlichste Position – der Punkt der Großen Mondwende – wird nur etwa alle 19 Jahre erreicht, und vielleicht ausgerechnet an diesem Abend bei wolkenverhangenem Himmel. Experten schätzen, dass die Dokumentation von zehn solcher großen Zyklen, also Beobachtungen aus fast zwei Jahrhunderten, erforderlich gewesen wären, um eine Anlage wie den Grabhügel von Villingen-Schwenningen auf die Mondwenden auszurichten.

Daher suchen wir derzeit nach Tricks und Kniffen, das Kunststück auch in einem kürzeren Zeitraum zu vollbringen. So liegt etwa der Aufgangsort des Mondes zum fraglichen Zeitpunkt ein wenig südlich von einem einfacher zu bestimmenden Aufgangsort: dem der Sonne zur Wintersonnenwende (siehe linke Grafik unten). Hätte man beide irgendwo in der keltischen Welt bestimmt, wäre es leicht gewesen, ihren Abstand auf den Nachthimmel zu projizieren und zwei Sterne in der entsprechenden Distanz zu finden. Dieses Wissen hätte sich dann an-

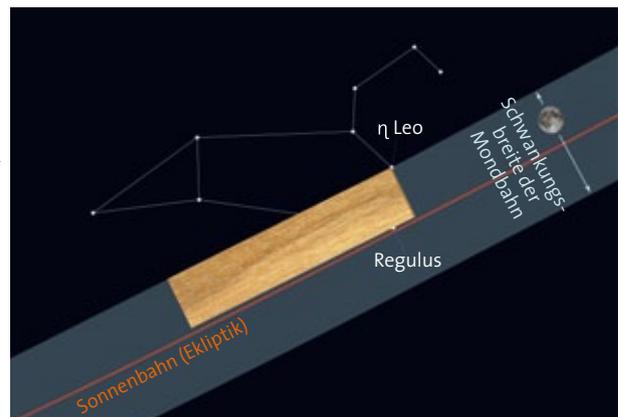
denorts wieder anwenden lassen, allerdings je nach Breitengrad mit wachsendem Fehler. Hätten die Planer der Glauberg-Prozessionsstraße etwa Beobachtungen aus Südfrankreich übernommen, wäre der von ihnen ermittelte Horizontpunkt um knapp drei Grad zu weit nördlich gelegen. Weil ihr Fehler aber unter einem Grad liegt, wurden die Positionen – falls diese Methode zum Einsatz kam – offenbar doch vor Ort ermittelt.

Anspruchsvoller hinsichtlich der astronomischen Kenntnisse, jedoch ebenso einfach in der Durchführung wäre eine Methode gewesen, welche die so genannte Ekliptik einbezieht. Das ist jene Linie, auf der die Sonne während eines Jahres vor dem Fixsternhimmel entlangwandert – aus Sicht eines Astronomen auf der Erde. Den Mond erblickt er zeitweise oberhalb, dann wieder unterhalb davon. Spätestens seit dem 7. Jahrhundert v. Chr. wurde dessen Pendelbewegung um die Ekliptik beobachtet, wie eine Liste in einem assyrischen Tontafelarchiv dokumentiert (siehe Bild S. 80). Darin waren jene Sterne notiert worden, die der Mond dabei erreichte und die somit die Breite der Schwingungszone markierten.

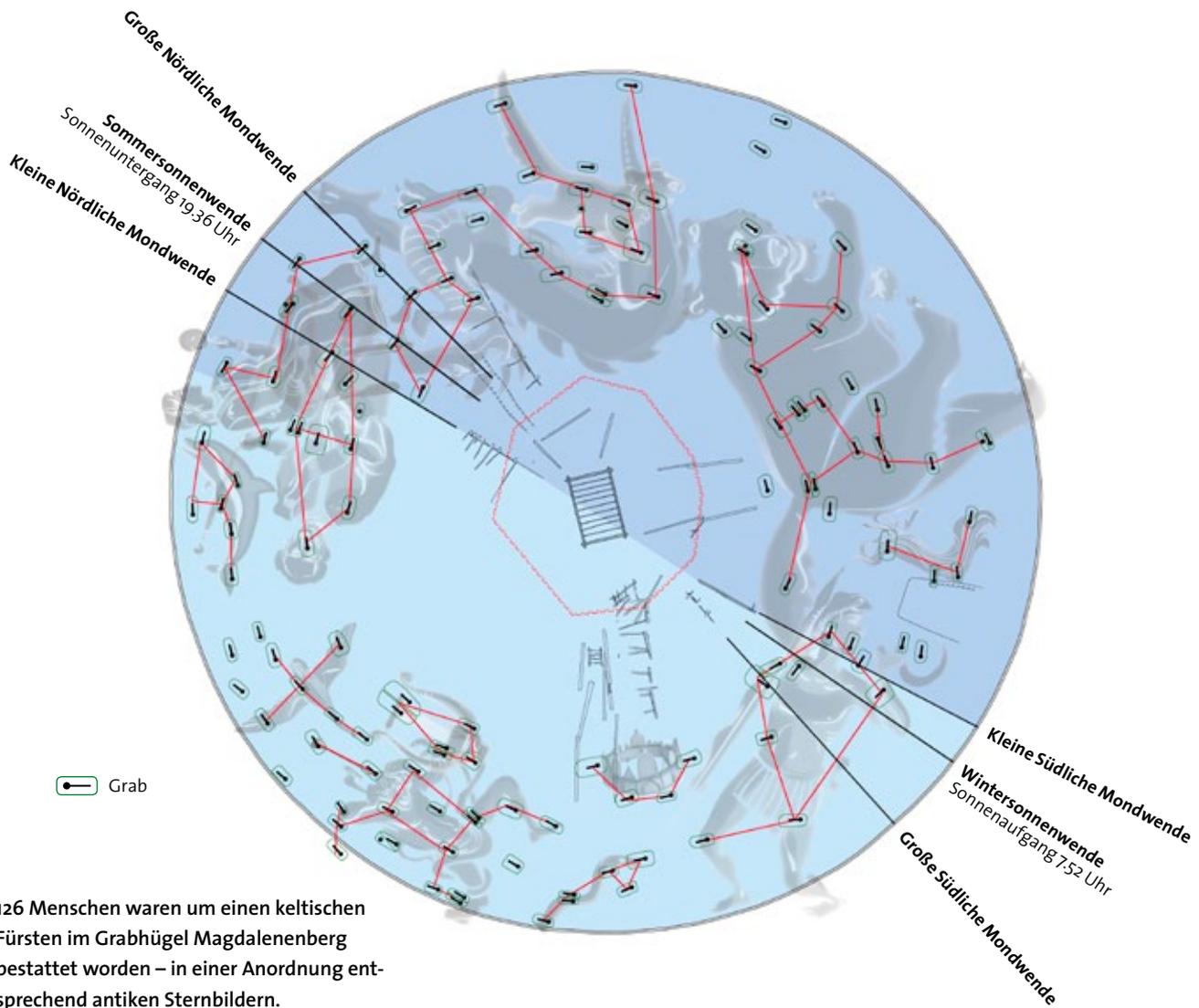
Nun rührt der Horizontabstand zwischen den Sonnen- und den Mondwendepunkten von ebendieser Pendelbewegung. Ein keltischer Astronom, der über entsprechende Kenntnisse verfügte, wäre daher zur Wintersonnenwende in der Lage gewesen, auch den Wendepunkt des Mondes zu finden: Die Ekliptik liegt nahe Regulus, dem hellsten Gestirn im Löwen, während der Stern η Leo in diesem Sternbild die Breite der Schwingungszone markiert. Mit Hilfe dieser Entfernung konnte man ein einfaches Brett entsprechender Breite herstellen. Es hätte nun genügt, die aufgehende Wintersonne anzupeilen und den Horizontpunkt der Großen Südlichen Mondwende zu ermitteln (siehe rechtes Bild unten). Über mehrere Wintersonnenwenden hinweg wäre der so recht genau zu bestimmen gewesen – und das in einer Zeit ohne Teleskope und Winkelmesssysteme.



Praktische Methode zur Bestimmung des Mondaufgangspunktes zur Großen Südlichen Mondwende: Mit dem Brett wird sowohl die aufsteigende Sonne als auch der Winter-sonnenwendepunkt angepeilt. Dort, wo die untere Ecke den Horizont berührt, liegt der gesuchte Mondaufgangspunkt.



Die Abweichungszone der Mondbahn (grau) von der Ekliptik. Der Abstand zwischen den Sternen Regulus und π Leonis ist ein Maß für die größtmögliche Abweichung.

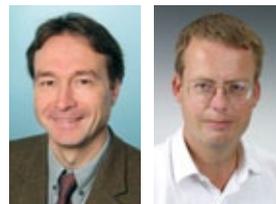


126 Menschen waren um einen keltischen Fürsten im Grabhügel Magdalenenberg bestattet worden – in einer Anordnung entsprechend antiken Sternbildern.

wurden aber sozusagen zum Rand hin verschoben (siehe Grafik oben). Das geschah wohl, um das Zentralgrab nicht zu stören. Exaktheit in unserem modernen Sinn war vermutlich ohnehin nicht das Ziel dieser Abbildung des Firmaments, sie hatte eher eine symbolische Funktion.

Mit dem archäologisch nachweisbaren Austausch von Waren zwischen keltischen Stämmen und mediterranen Hochkulturen war sicher auch ein Ideenimport verbunden. Umgekehrt können griechische und römische Autoren Hinweise darauf geben, welche Vorstellungen die Kelten beispielsweise mit den Mondwenden verknüpften. Der Astronom Ptolemäus etwa beschrieb nicht nur die astronomischen Gegebenheiten, sondern auch ihre astrologische Bedeutung. So sollten bestimmte Sternkonstellationen während der Mondwenden schuld an der Geburt verkrüppelter Kinder sein, andere hingegen für künftige Helden sorgen. Cäsar und viele andere berichteten, dass die Kelten an Wiedergeburt glaubten. Somit liegt die Vermutung nahe, dass sie die zyklisch auftretenden Mondwenden in einem Zusammenhang mit dem Wiedergeburtsgedanken sahen. ∞

DIE AUTOREN



Bruno Deiss (links) lehrt an der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main und ist Direktor des »Physikalischen Vereins – Gesellschaft für Bildung und Wissenschaft«. Gemeinsam mit dem Archäologen **Allard Mees** (rechts) vom Römisch-Germanischen Zentralmuseum in Mainz forscht er zu Themen der Archäoastronomie.

QUELLEN

Mees, A. W.: Die Kelten und der Mond. Neue Forschungen am Magdalenenberg. In: Antike Welt 6/2012, S. 47–54, Philipp von Zabern, Mainz

Steinrücken, B.: Sonnenwenden und Mondwenden.

www.sternwarte-recklinghausen.de/archaeoastro/sm_wenden.pdf
Diesen Artikel finden Sie auch im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201697

Die Wissenschaft von den klebrigen Kugeln

Wie viele Küsse können neun, zehn oder elf gleich große Kugeln austauschen, ohne sich zu bewegen?

VON BRIAN HAYES

Man nehme ein Dutzend gleich große Murmeln, drücke sie möglichst dicht aneinander und zähle anschließend die Stellen, an denen sich je zwei von ihnen berühren. Wie viele solcher Punkte kann es bei zwölf Murmeln höchstens geben? Wie sieht die zugehörige Anordnung aus? Ist diese eindeutig bestimmt, oder gibt es mehrere Möglichkeiten, diese maximale Anzahl zu erreichen?

Als ich diese Fragen zum ersten Mal hörte, fand ich sie nicht besonders schwer. Immerhin konnte ich mir die Lösung für zwei, drei, vier oder sogar fünf Kugeln ohne weiteres im Kopf zu rechtlegen. Dann müsste das Problem für etwas größere Kugelzahlen doch auch längst gelöst sein?

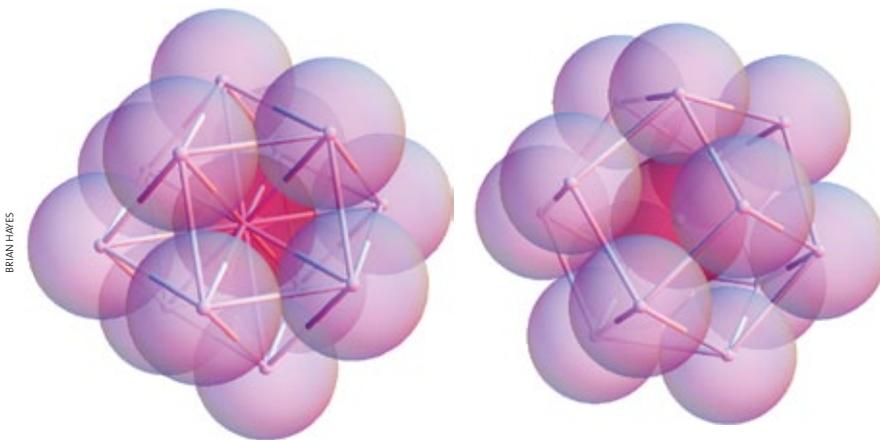
Weit gefehlt! Die Schwierigkeit steigt mit wachsender Kugelzahl rapide an. Die Lösungen für bis zu elf Kugeln ha-

ben Mathematiker erst in den letzten Jahren gefunden. Und sie mussten dafür ein ganzes Arsenal von Methoden zu Hilfe nehmen, aus der Graphentheorie, der Matrizenrechnung und der Geometrie, dazu reichlich Rechenleistung von Computern und – zur Verbesserung des Vorstellungsvermögens – Kinderspielzeug: Stahlkugeln und magnetische Stäbe, die es unter anderem unter dem Namen »Geomag« zu kaufen gibt. Für Packungen mit zwölf oder mehr Kugeln ist die Antwort noch unbekannt.

Dass eine derart simple Frage über kleine Häufchen von Kugeln so schwierig zu beantworten ist, gibt vielleicht Anlass zur Bescheidenheit, aber kaum zur Verwunderung. Kugelpackungsprobleme sind notorisch heimtückisch; einige haben sich mehrere Jahrhunderte lang einer Lösung widersetzt.

Schon Johannes Kepler (1571–1630) hatte neben den himmlischen Sphären auch irdische Kugeln der Beschäftigung für wert befunden. Er behauptete 1611, die dichteste Packung gleich großer Kugeln sei diejenige, die der Gemüsehändler beim Orangenstapeln praktiziert. Wer statt appetitlicher Früchte Kanonenkugeln zu stapeln hatte, verfiel auf dieselbe Anordnung. Jede Kugel im Inneren dieses Kepler-Gitters berührt genau zwölf andere, und der von ihnen ausgefüllte Raum macht $\pi/\sqrt{18}$, also etwa 74 Prozent, vom Gesamtvolumen aus. Anscheinend hielt Kepler diese Packung für so offensichtlich optimal, dass er sich nicht um einen Beweis bemühte. So einfach war es dann doch nicht: Erst 1998 konnte Thomas C. Hales von der University of Pittsburgh zeigen, dass unter allen Packungen gleich großer Kugeln, die den gesamten dreidimensionalen Raum ausfüllen, keine eine größere Dichte erreicht (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 10, und 9/2003, S. 13).

Keplers Vermutung und Hales' Beweis dafür gelten für Packungen aus unendlich vielen Kugeln gleicher Größe. Ein anderes, Jahrhunderte altes Problem hat mit endlichen Kugelpackungen zu tun. Die Geschichte beginnt mit einem Streit zwischen Isaac Newton und seinem Schüler David Gregory in den 1690er Jahren. Nach einer ihrer Versionen war Newton der Ansicht, eine Kugel im Zentrum einer Packung könne nie mehr als zwölf andere derselben Größe berühren; Gregory dagegen glaubte, die zentrale Kugel habe noch Platz für eine dreizehnte. Irgendwann im Lauf der Jahrhunderte kamen romantisch gesinnte Mathematiker (ja, so etwas gibt es) auf die Idee, die Berüh-



Wie viele Kugeln können eine zentrale Kugel derselben Größe berühren? Dieses »Kusszahlproblem« musste mehr als 250 Jahre auf eine Antwort warten. Zwölf äußere Kugeln berühren die rote in der Mitte (links); die entstehende Konfiguration ist ein Ausschnitt der keplerschen Kugelpackung. Eine dreizehnte äußere Kugel passt nicht mehr dazu, wohl aber, wenn man die Zentralkugel um nur etwa fünf Prozent vergrößert (rechts). In allen Abbildungen dieses Artikels sind die Mittelpunkte einander berührender Kugeln durch einen Stab verbunden.

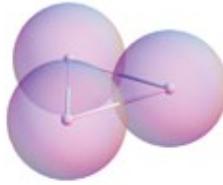
$\max(C_1)=0$



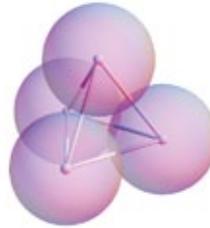
$\max(C_2)=1$



$\max(C_3)=3$



$\max(C_4)=6$



$\max(C_5)=9$



BRIAN HAYES

Für Packungen mit bis zu fünf Kugeln ist die maximale Kusszahl leicht zu finden.

rung zweier Kugeln einen »Kuss« zu nennen; fortan hieß die Frage das »Kusszahlproblem«. Es wurde erst 1953 gelöst, als Kurt Schütte und B. L. van der Waerden nachwiesen, dass Newton Recht hatte – wenn auch sehr knapp. Die dreizehnte Kugel findet Platz, sowie man die Zentralkugel – und nur sie – um knapp fünf Prozent vergrößert.

Sie nannten es küssen

Statt wie Newton einer Zentralkugel eine herausgehobene Position zu geben, kann man auch eine »demokratischere« Variante des Problems studieren: Man finde eine Anordnung von, sagen wir, dreizehn Kugeln mit einer maximalen Anzahl von »Küssen«, ohne vorzuschreiben, wer wen zu küssen hat.

Warum ist das – ziemlich polygame – Liebesleben der Kugeln so interessant? Kepler versuchte, auf diese Weise die Symmetrien von Schneeflocken zu erklären. Zu späteren Zeiten wollten viele Forscher auf dem Weg über Kugelpackungen der Struktur von Festkörpern und Flüssigkeiten auf die Schliche kommen. Das gegenwärtige Interesse an kussreichen Kugelhaufen ist durch Kolloide, Pulver und andere physikalische Systeme motiviert, in denen Teilchen durch Kräfte extrem geringer Reichweite zusammengehalten werden (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 2/2012, S. 68).

In diesem Geschäft ist es zweckmäßig, sich auf Einheitskugeln festzulegen; das sind Kugeln mit dem Durchmesser 1, also dem Radius 1/2. Berühren sich zwei von ihnen, dann haben ihre Mittelpunkte den Abstand 1; das

ist in den Abbildungen dieses Artikels durch einen Stab von Mittelpunkt zu Mittelpunkt gekennzeichnet. Im Prinzip genügt es, mit Skeletten aus derartigen Stäben zu arbeiten und die Kugeln ganz wegzulassen (oder viel kleiner zu machen); so funktionieren Baukästen wie zum Beispiel Geomag.

Nennen wir die Gesamtzahl der Berührungspunkte einer gegebenen Kugelpackung mit n Kugeln C_n . Mit $\max(C_n)$ soll der größte Wert von C_n gemeint sein, der unter allen Packungen von n Kugeln erreichbar ist.

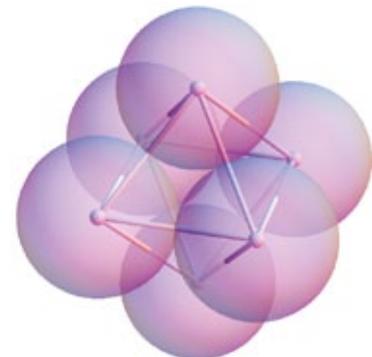
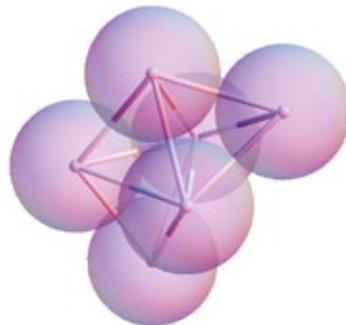
Für kleine Werte von n ist es nicht schwer, diesen Wert zu finden (Bild oben). Der Fall $n=1$ ist trivial, denn eine einzelne Kugel berührt keine andere: $\max(C_1)=0$. Zwei Kugeln können sich in höchstens einem Punkt berühren, also ist $\max(C_2)=1$. Drei Kugeln im Dreieck kommen auf $\max(C_3)=3$, und eine vierte Kugel, in der Mitte obenauf gesetzt, ergibt ein reguläres Tetraeder mit sechs Berührungspunkten: $\max(C_4)=6$. Dass die genannten Zahlen tatsächlich maximal

sind, ist nicht schwer einzusehen: In den genannten Anordnungen küsst bereits jede Kugel jede andere; mehr geht nicht.

Wenn das so weiter ginge, wäre einfach $\max(C_n)=n(n-1)/2$. Die Folge dieser Zahlen beginnt mit 0, 1, 3, 6, 10, 15, 21, ... Es geht aber nicht so weiter. Schon fünf Einheitskugeln kann man nicht so anordnen, dass jede die übrigen vier berührt. Daher ist $\max(C_5)$ nicht gleich 10, sondern nur gleich 9. Diese Zahl wird erreicht, wenn man die fünfte Kugel an irgendeine Seite eines Tetraeders aus vier Kugeln anlegt. Die Kugelmittelpunkte dieser Packung bilden die Ecken eines Körpers, der nicht zu den platonischen gehört, obwohl er von lauter gleichseitigen Dreiecken begrenzt wird; man nennt ihn die dreiseitige Doppelpyramide.

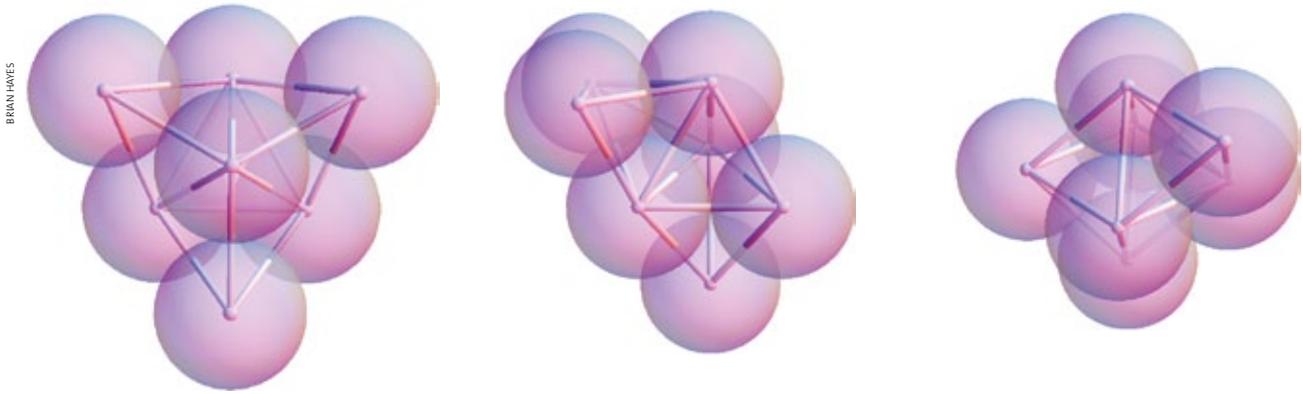
Sechs und sieben

Bis zu diesem Punkt ist die Packung, für die C_n sein Maximum erreicht, eindeutig bestimmt und entsteht aus der maximalen Packung mit $n-1$ Kugeln durch schlichtes Anlegen einer weiteren Kugel. Beides gilt ab $n=6$ nicht mehr.



BRIAN HAYES

Für $n=6$ gibt es zwei wesentlich verschiedene Anordnungen mit maximaler Kusszahl: die dreiseitige Doppelpyramide mit aufgesetzter Kugel (links) und das Oktaeder (rechts).



Optimale Packungen von sieben Kugeln mit 15 Berührungen findet man durch Anlegen einer Kugel an optimale Sechserpackungen. Das »Vierfachtetraeder« (links) weist viele Symmetrien auf; die Packung in der Mitte ist nicht völlig unsymmetrisch, sondern auch chiral, existiert also in einer links- und einer rechtshändigen Version. Eine optimale Packung entsteht auch, indem man einem Oktaeder eine Kugel hinzufügt (rechts).

Die maximale Kusszahl $\max(C_6) = 12$ erreicht man entweder, indem man an die dreiseitige Doppelpyramide eine weitere Kugel anlegt, oder durch eine neue Anordnung ohne maximalen Vorgänger (einen »Keim«): das Oktaeder oder auch die vierseitige Doppelpyramide (Bild S. 85 unten).

Für größere Werte von n wird es immer mühsamer, alle Packungen mit maximaler Kontaktzahl zu bestimmen. Für $n = 7$ erhält man mit dem Anlegeverfahren – füge an eine maximale Packung mit $n = 6$ eine Kugel an – vier Lösungen mit jeweils 15 Berührungspunkten (Bilder oben und S. 87 links). Drei von ihnen bestehen aus vier Tetraedern, die auf unterschiedliche Weise aneinander geklebt sind; eine darunter ist »chiral«, das heißt, es gibt sie in zwei zueinander spiegelbildlichen Varianten, die man aber als eine einzige zu zählen pflegt. Die vierte entsteht aus einem Oktaeder durch Anlegen einer weiteren Kugel, was dem Aufsetzen eines Tetraeders entspricht.

Diese speziellen Strukturen sind nicht einmal besonders schwer zu finden. Wer eine Weile mit Geomag oder ähnlichen Baukästen spielt, stößt ziemlich sicher darauf. Aber woher weiß man, ob keine weiteren existieren? Oder gar eine Anordnung mit 16 oder mehr Kontaktpunkten?

Es stellt sich heraus, dass zwar $\max(C_7) = 15$ ist, es aber noch eine wei-

tere optimale Siebenerpackung gibt, und zwar die fünfseitige Doppelpyramide (Bild S. 87 rechts). Wieder handelt es sich um einen »Keim«, das heißt um eine Struktur, die nicht aus einer optimalen Anordnung eine Nummer kleiner »herauswächst«. Gibt es eine systematische Methode, solche »Überraschungssieger« zu finden?

Die Antwort ist ja. Natalie Arkus von der Rockefeller University begann vor fünf Jahren, damals als Doktorandin an der Harvard University, ein solches Verfahren auszuarbeiten. In mehreren Artikeln haben sie und ihre Harvard-Kollegen Michael P. Brenner und Vinodhan N. Manoharan alle Konfigurationen aus sieben bis zehn Kugeln aufgelistet, welche die jeweils maximale Kusszahl realisieren. Später erweiterten Robert S. Hoy, Jared Harwayne-Gidansky und Corey S. O'Hern von der Yale University diese Ergebnisse auf $n = 11$. Alle Resultate, über die ich hier berichte, stammen von diesen beiden Gruppen.

Dynamik der Attraktion

Eine Lösungsidee macht Anleihen bei der Physik. Wenn zwischen den Kugeln eine Anziehungskraft wirkte, dann würden sie sich vielleicht von allein zu einer dichten Packung zusammenfinden. Und wenn solche Kugeln in der Natur nicht zu finden – oder herzustellen – sind, kann man sie ja mathematisch simulieren. Zu der Anziehungs-

kraft gehört eine potenzielle Energie; also suche man mit mathematischen Verfahren nach einer Anordnung, welche diese Energie minimiert.

Auf große Distanzen ist die Kraft vernachlässigbar; bei geringerer Entfernung wirkt sie stark anziehend; und plötzlich, beim Kontakt, schlägt sie in eine heftige Abstoßung um, die das Eindringen der Kugeln ineinander verhindert. Unter dem Einfluss einer solchen Kraft kommen die Teilchen in einem Gleichgewichtszustand zur Ruhe, bei dem sie einen kleinen, aber positiven Abstand voneinander haben.

Unter einem derartigen Kraftgesetz kommen die Kugeln einander zwar sehr nahe, küssen sich aber nicht unbedingt besonders häufig. Zur Maximierung der Berührungszahl müsste die Kraft stark anziehend sein, wenn die Kugeln sich berühren, unendlich abstoßend, wenn sie einander noch näher kommen wollen – und null außerhalb: Solange meine Nachbarin mich nicht küsst, ist es mir vollkommen egal, wo sie sich heruntreibt. Martin Gardner hat einmal vorgeschlagen, sich Tischtennisbälle vorzustellen, die mit einem milden Klebstoff bestrichen sind.

Die Kraft ist also unstetig: Sie ändert sich plötzlich, wenn der Systemzustand von »gerade noch nicht berühren« in »berühren« übergeht. An solchen Kraftgesetzen scheitern die üblichen Rechenverfahren, welche die Positionen der Beteiligten ein bisschen verändern, nachrechnen, ob die potenzielle Energie kleiner geworden ist, daraufhin die Kugeln wieder ein wenig versetzen, und so weiter: So lange keine Berührung stattfindet, hat der Algorithmus ja keinen Anhaltspunkt für irgendeine Posi-

tionsveränderung. Aus diesem Grund erschien das Problem der klebrigen Kugeln schwieriger als die meisten anderen Packungsprobleme.

Andererseits hat die Unstetigkeit des Potenzials auch einen bedeutenden Vorteil: Da es bei jedem Kugelpaar nur darauf ankommt, ob es sich berührt oder nicht, gibt es nur eine endliche Anzahl wesentlich verschiedener Konfigurationen. Die könnte man im Prinzip alle einzeln untersuchen und unter ihnen die mit den meisten Berührungen auswählen. Mit dieser Idee – man löse das Problem durch erschöpfendes Auszählen – erzielten die beiden Gruppen in Harvard und Yale ihre aktuellen Erfolge.

Von der Geometrie zur Graphentheorie ...

Wie notiert man eine Konfiguration aus Kugeln, von denen sich manche berühren und andere nicht? Zum Beispiel als Graph. Jede Kugel entspricht einer Ecke (einem »Knoten«) des Graphen, und zwei Knoten sind genau dann durch eine Linie (eine »Kante«) verbunden, wenn die beiden zugehörigen Kugeln sich berühren. Oder abstrakter: Man notiert in einer Tabelle in Zeile i und Spalte j genau dann eine Eins, wenn Kugel i Kugel j berührt, sonst eine Null. Das ist die so genannte Nachbarschaftsmatrix (adjacency matrix; Bild S. 88 oben).

Es ist einfach, für eine gegebene Kugelpackung den zugehörigen Graphen oder die Nachbarschaftsmatrix anzugeben. Geht es auch umgekehrt? Kann man aus einer Tabelle, die nur angibt, welche Kugeln sich berühren, die Koordinaten der Mittelpunkte aller Kugeln im Raum errechnen? Die Antwort ist: nicht immer. Wenn die Matrix nur Nullen enthält, heißt das nur, dass die Kugeln sich überhaupt nicht berühren, was offensichtlich nichts über ihre Positionen sagt. Andererseits gibt es zu der Matrix, in der alle Einträge gleich 1 sind, für $n > 4$ gar keine Kugelpackung.

Glücklicherweise gelingt die Rekonstruktion für eine wichtige Klasse von Packungen; dazu gehören insbesondere diejenigen, für welche die Kusszahl

maximal wird. Damit liegt eine direkte Strategie zur Lösung des Problems nahe: Erzeuge alle in Frage kommenden Matrizen und finde heraus, welche davon zu geometrisch realisierbaren Packungen gehören.

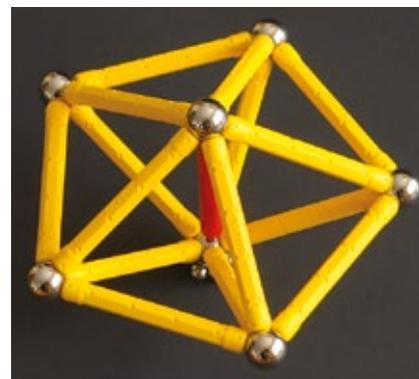
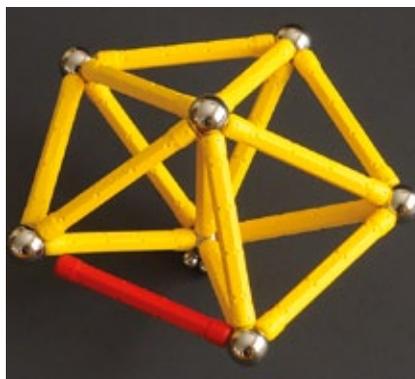
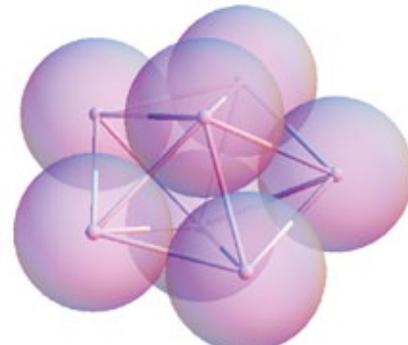
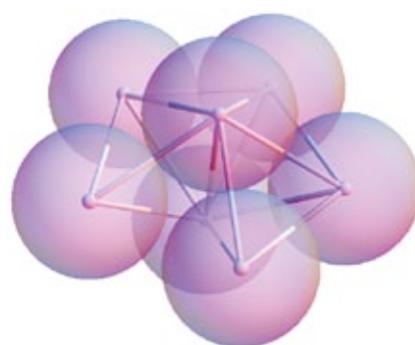
Interessant ist natürlich, wie viele Nachbarschaftsmatrizen dafür geprüft werden müssen. Da die Berührung zweier Kugeln eine symmetrische Beziehung ist – wenn Kugel i Kugel j berührt, dann berührt Kugel j auch Kugel i –, enthält allein das rechte obere Dreieck der Matrix mit seinen $n(n-1)/2$ Einträgen schon die gesamte Information. Für jeden Eintrag gibt es zwei mögliche Werte, also beträgt die Gesamtzahl aller zu prüfenden Nachbarschaftsmatrizen $2^{n(n-1)/2}$.

Das sind für $n=7$ über zwei Millionen und für $n=11$ sogar mehr als 10^{16} . So viele Matrizen zu durchmustern würde einen astronomischen Aufwand erfor-

dern; aber das ist gar nicht nötig. Viele Matrizen beschreiben denselben Graphen mit einer anderen Nummerierung der Knoten. Eliminiert man Redundanzen dieser Art, so schrumpft die Zahl der verschiedenen (7-7)-Matrizen von 2 097 152 auf lediglich 1044.

Arkus und ihre Gruppe konnten die Anzahl der Kandidaten noch gewaltig ausdünnen. Aus Gründen, die ich noch erläutern werde, untersuchten sie nur Matrizen, die zwei Kriterien erfüllen: Jede Spalte und jede Zeile enthält mindestens drei Einsen, und die Gesamtzahl der Einsen im oberen Dreieck beträgt $3n-6$. Für $n=7$ lässt diese Bedingung von den 1044 Kandidaten nur 29 übrig, und unter diesen gehören nur noch die fünf, die wir schon kennen, tatsächlich zu dreidimensionalen Kugelpackungen.

Wie gewinnt man nun die konkrete geometrische Struktur der Packung aus



Zwei weitere optimale Packungen von sieben Kugeln sind sich zum Verwechseln ähnlich: Fügt man vier Tetraeder entlang einer gemeinsamen Kante zusammen (linke Teilbilder), entsteht eine fast fünfeckige Gestalt – aber nur fast, denn die beiden vorderen Kugeln haben keinen Kontakt zueinander. In der Geomag-Version (untere Teilbilder) haben die gelben Stäbe die Länge 1, der rote ist geringfügig länger. Eine kleinere Änderung macht aus dieser Anordnung eine symmetrische fünfseitige Doppelpyramide (rechte Teilbilder); aber nun berühren sich die obere und die untere Kugel nicht mehr.

der Nachbarschaftsmatrix? Der erste entscheidende Schritt: Man verwandle die Nachbarschaftsmatrix A in eine Abstandsmatrix D . Während ein Eintrag A_{ij} in der Nachbarschaftsmatrix nur die beiden Werte 1 und 0 annehmen kann, steht an der entsprechenden Stelle D_{ij} von D eine reelle Zahl, nämlich der Abstand der beiden Kugelmittelpunkte.

... und zurück zur Geometrie

Einige dieser Abstände kennen wir bereits: Jede Eins in der Nachbarschaftsmatrix steht für ein Paar sich berührender Einheitskugeln, der Abstand ihrer Mittelpunkte ist also genau 1; aus $A_{ij}=1$

folgt $D_{ij}=1$. Über die anderen Einträge von D wissen wir immerhin, dass $D_{ij} \geq 1$ sein muss. Jeder Abstand, der kleiner als 1 ist, würde ja bedeuten, dass die beiden Kugeln einander durchdringen.

Um die Geometrie einer Packung vollständig zu kennen, brauchen wir $3n$ reelle Zahlen, nämlich für jede der n Kugeln ihre x -, y - und z -Koordinate. Ein Gleichungssystem benötigt unter normalen Umständen ebenso viele Gleichungen wie Unbekannte, also in unserem Fall $3n$. Tatsächlich genügen aber bereits $3n-6$ Gleichungen. Es kommt nämlich nicht auf die Positionen unserer Kugeln in irgendeinem absoluten

Raum an, sondern nur relativ zueinander. Also haben wir die Freiheit, unsere erste Kugel mit dem Mittelpunkt in den Nullpunkt unseres Koordinatensystems zu setzen, die zweite auf die x -Achse und die dritte immerhin noch in die (x, y) -Ebene. Das legt sechs Koordinaten fest. Hat man also $3n-6$ Einsen in der Nachbarschaftsmatrix, so erhält man daraus ebenso viele Gleichungen – gerade so viele wie nötig, um die übrigen Kugeln zu lokalisieren.

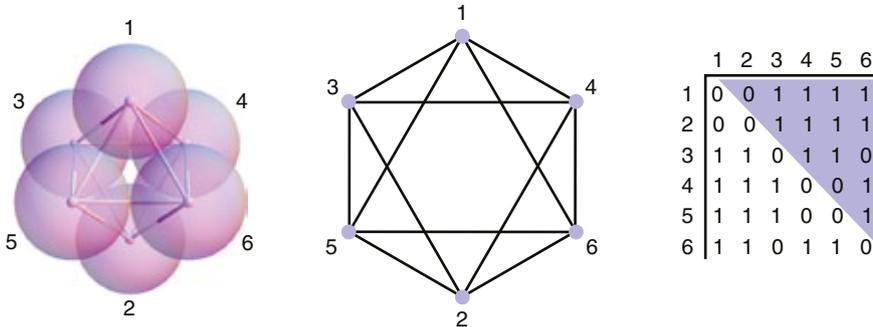
Hat ein Kugelhaufen von n Kugeln genau $3n-6$ Berührungspunkte und jede Kugel Kontakt zu mindestens drei anderen, so hat die Packung eine Eigenschaft namens »minimale Starrheit«. Das ist eine notwendige Bedingung für Maximalität: Eine Kugel, die nur eine oder zwei andere berührt, könnte unter Wahrung dieser Kontakte noch ein bisschen wandern. Dann aber wäre die Packung nicht maximal, denn am Ende ihrer Wanderung würde die Kugel unweigerlich eine weitere Kugel küssen und damit C_n erhöhen.

Jeder der $3n-6$ Gleichungen hat die Gestalt

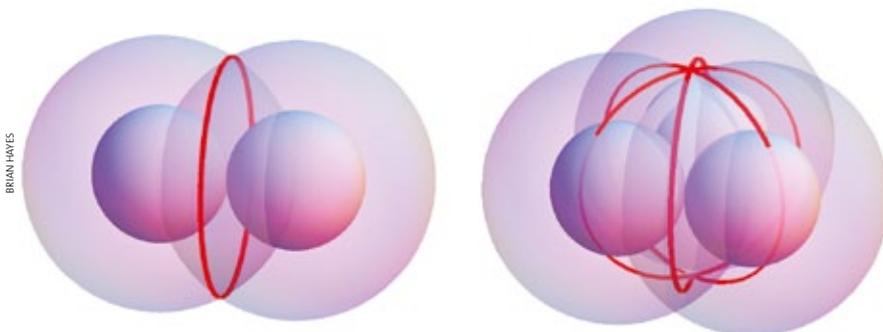
$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} = 1,$$

denn der Wurzelausdruck beschreibt nach dem Satz des Pythagoras den Abstand der Mittelpunkte beider Kugeln. Das lästige Wurzelzeichen kann man sich übrigens ohne Weiteres vom Halse schaffen, indem man beide Seiten der Gleichung quadriert. Es bleibt ein System aus $3n-6$ Gleichungen zu lösen, in dem die Unbekannten quadriert und miteinander multipliziert vorkommen. Für derartige polynomiale Gleichungssysteme existiert ein leistungsstarkes Hilfsmittel namens Gröbner-Basis; es dient dazu, die Anzahl der Unbekannten so lange zu reduzieren, bis sich schließlich eine Lösung ergibt. In einem Computeralgebra-System programmiert, war das Verfahren tatsächlich imstande, die Gleichungen für den Fall $n=7$ zu lösen; für Packungen mit acht Kugeln erwies es sich jedoch als zu langsam.

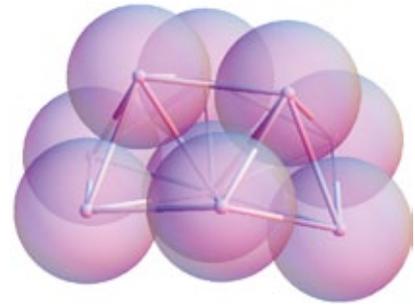
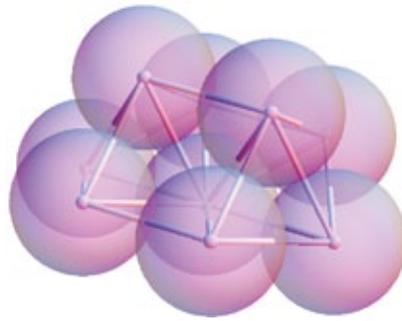
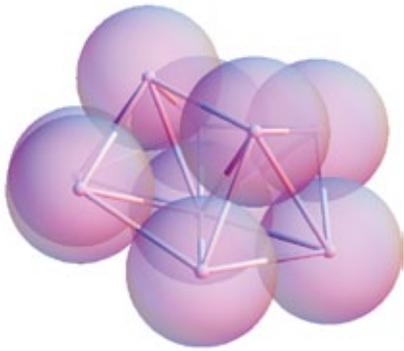
Man kann das Gleichungssystem auch numerisch lösen, indem man aus



Die Graphentheorie bietet ein bequemes Mittel, alle Packungen klebriger Kugeln mit einer gegebenen Zahl von Berührungen aufzulisten. Jede Kugel entspricht einem Knoten des Graphen (üblicherweise als dicker Punkt dargestellt), jede Berührung einer Kante (Linie) zwischen den entsprechenden Knoten. Der Graph (Mitte) gibt die oktaedrische Kugelpackung (links) wieder, allerdings ohne jeden Hinweis auf die geometrische Anordnung der Kugeln. Dieselbe Information steckt in der Nachbarschaftsmatrix (rechts), die in Zeile i und Spalte j genau dann eine Eins verzeichnet, wenn Kugel i Kugel j berührt, ansonsten eine Null. Es genügt dabei, das obere Dreieck (blau) zu kennen, denn das untere ist sein Spiegelbild. Jede Matrix mit m Einsen im oberen Dreieck kommt als Nachbarschaftsmatrix einer Packung mit m Berührungen in Frage.



Berühren sich zwei Kugeln (links), dann kann eine dritte die beiden nur berühren, wenn ihr Mittelpunkt auf dem Durchschnitt der beiden »Nachbarschaftssphären« liegt (links, rote Kreislinie). Berühren sich drei Kugeln, dann gibt es nur noch zwei mögliche Positionen für den Mittelpunkt einer vierten, die alle drei berührt – die beiden Schnittpunkte der drei zugehörigen Kreise (rechts).



BRIAN HAYES

einem irgendwie erratenen Startwert eine Näherung an eine Lösung errechnet, aus dieser eine bessere Näherung und so weiter, bis das Verfahren »konvergiert«, das heißt, die Näherungslösung nicht mehr nennenswert verändert. Das bekannteste Beispiel ist das Newton-Verfahren. Wenn eine solche Methode konvergiert, liefert sie eine Lösung; man weiß aber nie, ob sie alle Lösungen findet. Es hängt nämlich vom Startwert ab, gegen welche Lösung das Verfahren konvergiert, und für manche Lösungen sind geeignete Startwerte schwer zu finden.

Nach den durchwachsenen Ergebnissen mit algebraischen und numerischen Verfahren griff Arkus wieder auf die Geometrie zurück, und zwar sowohl bei der Suche nach möglichen Packungen als auch, um die physikalisch unmöglichen auszuschließen. Wenn Kugel i Kugel j berührt, dann liegt der Mittelpunkt von j auf der Oberfläche einer (größeren) Kugel vom Radius 1 um den Mittelpunkt von i . Wenn k sowohl i als auch j berührt, dann liegt ihr Mittelpunkt auf zwei solcher Kugeloberflächen zugleich, das heißt auf einer Kreislinie. Und eine Kugel, die drei andere berührt, hat für ihren Mittelpunkt nur noch genau zwei Punkte zur Auswahl (Bild S. 88 unten). Diese und einige weitere Regeln genügen, um die unbekannteren Einträge in der Abstandsmatrix zu bestimmen – jedenfalls dann, wenn die Nachbarschaftsmatrix eine physikalisch mögliche Packung beschreibt.

Mit weiteren geometrischen Regeln lassen sich gewisse Klassen von Nachbarschaftsmatrizen als unrealisierbar ausschließen, weil sie keinen tatsächlich möglichen Kugelpackungen ent-

Eine unter den 52 maximalen Packungen von neun Kugeln ist flexibel: Zwei Teile der Struktur lassen sich gegeneinander verdrehen, ohne dass die Kontakte zwischen den Kugeln aufbrechen. Die Abbildungen zeigen, der Deutlichkeit zuliebe leicht übertrieben, drei Phasen dieser Bewegung, die neutrale Lage in der Mitte. Die Internetfassung dieses Artikels zeigt die Packung in Bewegung.

sprechen. So bilden die Mittelpunkte dreier sich berührender Einheitskugeln stets ein gleichseitiges Dreieck. Mehr als zwei Kugeln können nicht in Kontakt mit diesen dreien stehen. Jede Nachbarschaftsmatrix, die solches vorschreibt, kann man als unphysikalisch verwerfen, ohne irgendwelche Abstände bestimmen zu müssen.

Schließlich scheute Arkus sich nicht, ihrer geometrischen Intuition mit Geomastäben und -Kugeln aufzuhelfen.

Acht, neun, zehn, elf

Die Ergebnisse sind in der Tabelle auf S. 91 zusammengestellt. Arkus und ihre Kollegen bestimmten $\max(C_n)$ – und auch alle Packungen, für die diese maximalen Anzahlen erreicht werden – für jedes $n \leq 10$. Dabei entdeckten sie eine ganze Reihe von Konfigurationen mit bemerkenswerten Eigenheiten.

Für $n=8$ ist die maximale Kusszahl 18, und es gibt 13 verschiedene Möglichkeiten, sie zu realisieren. Mit einer Ausnahme lassen sie sich durch Anlegen einer Kugel an eine der Packungen mit sieben Kugeln aufbauen.

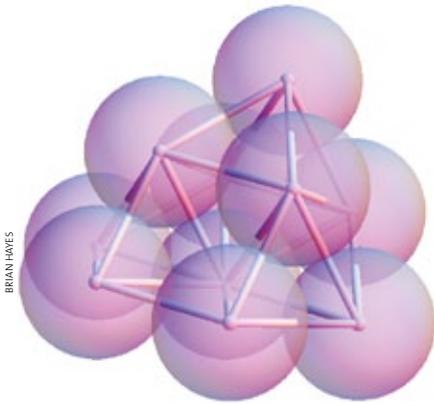
Packungen aus neun Kugeln können bis zu 21 Berührungspunkte haben, und es gibt 52 Möglichkeiten, diese maximale Zahl zu erreichen, darunter vier neue Keime. Eine von ihnen hat eine Eigenschaft, die unter den Packungen mit maximaler Berührungszahl bisher nicht auftrat: Flexibilität. Ein Teil der Anordnung kann gegen den ande-

ren verdreht werden, ohne dass die Kontakte zwischen den Kugeln aufbrechen. Das ist überraschend, da ja die Nachbarschaftsmatrix ausdrücklich nach dem Kriterium »minimale Starrheit« ausgewählt wurde.

Aber die Starrheit ist eben nur minimal, und das heißt lediglich: Eine Kugel allein kann sich nicht bewegen, ohne zumindest eine Bindung aufzubrechen. Das ist der Fall, solange jede Kugel mindestens drei andere berührt. Damit ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass ganze Kugelgruppen ihre Lage ändern. Die flexible Packung mit neun Kugeln besteht aus zwei dreiseitigen Doppelpyramiden, die sich eine Kugel teilen. Diese ist sozusagen das Gelenk, um das sich die beiden Teile ein wenig gegeneinander verdrehen können (Bild oben).

Bei den Packungen mit zehn Kugeln wird eine weitere Schwelle überschritten: Zum ersten Mal übersteigt die Anzahl der Berührungen $3n-6$ (in diesem Fall also 24). 259 Packungen mit zehn Kugeln weisen genau 24 Berührungen auf, drei weitere aber sogar 25. Wie kann das sein? Unser Gleichungssystem enthält doch nur $3n-6$ Gleichungen, die jede für eine Berührungsbedingung stehen. Die Antwort ist: Mehr als 24 Küsse sind zwar nicht gefordert, aber auch nicht verboten. Der fünfundzwanzigste ist gewissermaßen ein glücklicher Zufall (Bild S. 90 oben).

Für die erschöpfende Durchmusterung aller Zehnerpackungen mussten



Diese Packung mit zehn Kugeln und 25 Berührungspunkten entsteht aus der flexiblen Packung mit neun Kugeln, indem man eine weitere Kugel an vier Kugeln zugleich anfügt (und dabei die Flexibilität zerstört).

Arkus und ihre Kollegen mehr als 750 000 Matrizen für minimal starre Konfigurationen untersuchen. Für $n=11$ wäre der Rechenaufwand abermals ausgeföhrt. Als Hoy, Harwayne-Gidansky und O’Hern aus Yale diese Herausforderung angingen, mussten sie sich also etwas Neues einfallen lassen. Dabei kam ihnen ein merkwürdiges Ergebnis zupass, das Therese Biedl, Erik Demaine und andere bewiesen hatten: Man kann jede zulässige Kugelpackung vollständig »durchwandern«, indem man immer nur von einer Kugel zu einer sie berührenden übergeht und keine Kugel zweimal betritt. Wenn man die Kugeln in der Reihenfolge dieses Weges nummeriert, stehen in der Nebendiagonale (unmittelbar rechts oberhalb der Hauptdiagonale) der Nachbarschaftsmatrix lauter Einsen. Beschränkt man sich auf Matrizen mit dieser Eigenschaft, so reduziert sich der Arbeitsaufwand für elf Kugeln um den Faktor 1000.

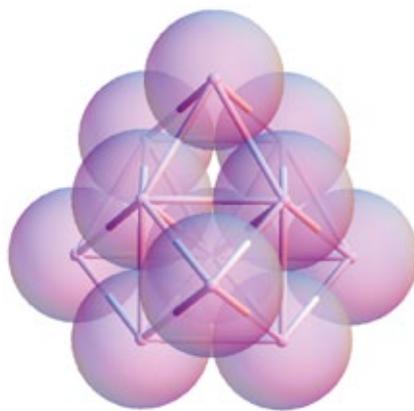
Die Gruppe in Yale fand außerdem weitere Kriterien, um unphysikalische Packungen auszuschließen, ohne erst mühsam die Abstände zwischen Kugelmittelpunkten berechnen zu müssen. Ein Beispiel: Hat man acht Kugeln, die einander so beröhren, wie die Ecken eines Würfels durch Kanten verbunden sind, dann kann eine neunte höchstens vier von ihnen beröhren. Sonst müsste sie nämlich im Inneren des Würfels sit-

zen, und da ist nicht genug Platz. Ein Verstoß gegen diese Regel lässt sich durch geeignetes Abzählen der Einsen in der Nachbarschaftsmatrix aufspüren – das geht sehr viel schneller als der ohnehin vergebliche Versuch, Koordinaten zu berechnen.

Für $n=11$ identifizierte die Gruppe aus Yale 1641 Packungen mit $C_{11} \geq 27$. Die überwiegende Mehrzahl von ihnen weist genau 27 Berührungspunkte auf (das sind hier $3n - 6$), aber es gibt auch 20 Packungen mit $28 (= 3n - 5)$ Berührungen und eine einzige mit $29 (= 3n - 4)$. Diese letzte Konfiguration entsteht aus dem »Glücksfall« mit den zehn Kugeln, indem man ein weiteres außen liegendes Quadrat mit einer Kugel bedeckt (Bild links).

Der Rekordhalter zeigt wieder vier Kugeln in Quadratanordnung an der Außenseite und bietet damit die Gelegenheit, dort eine weitere Kugel anzusetzen. Das ergibt eine Zwölferpackung mit $C_{12} = 33 = 3n - 3$, also besser, als der Stabilitätsbedingung von $3n - 6$ entspricht. Ist 33 die maximal mögliche Anzahl? Wir wissen es nicht; bisher hat noch niemand eine erschöpfende Durchmusterung aller Zwölferpackungen in Angriff genommen.

Selbst für $n=11$ ist die Sache mit der Vollständigkeit nicht über jeden Zweifel erhaben. Die Gruppe aus Yale hat einige ihrer Ergebnisse mit den geschilderten numerischen Verfahren zur Lö-



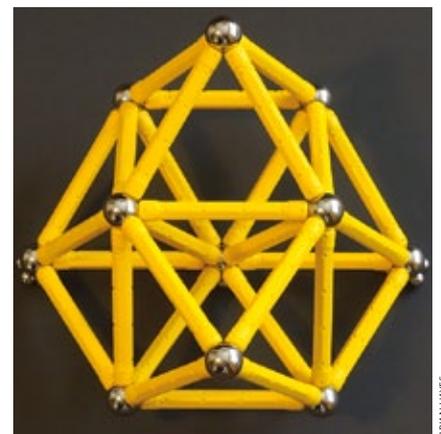
Der Rekordhalter unter den Packungen mit elf Kugeln (links eine Computergrafik, rechts das Foto eines Geomag-Modells) hat 29 Berührungspunkte, zwei mehr als die Mindestzahl von $3n - 6 = 27$. Die Packung entsteht aus der flexiblen Packung mit neun Kugeln, indem man auf die beiden außen liegenden Quadrate je eine weitere Kugel aufsetzt.

sung der Abstandsgleichungen erzielt. Wenn ein solches Verfahren nicht konvergiert, beweist das noch nicht, dass es keine Lösung gibt; vielleicht hätte das Verfahren mit einem anderen Startwert ja eine gefunden. Realistisch gesehen ist es äußerst unwahrscheinlich, dass den Forschern eine Lösung entgangen ist; aber in diesem Punkt haben Mathematiker und Physiker unterschiedliche Vorstellungen von Gewissheit.

Klebrige Kugeln in Aktion

Sowohl die Gruppe in Harvard als auch die in Yale interessieren sich mehr für echte, physikalische Kugeln als für die idealen mathematischen. So sind Hoy, Harwayne-Gidansky und O’Hern den Geheimnissen der Kristallisation auf der Spur. Viele gleiche Kugeln – oder auch Atome – unter Druck neigen dazu, eine Konfiguration maximaler Dichte wie die Kepler-Packung anzunehmen. Kristallwachstum beginnt jedoch mit sehr wenigen Atomen, und die haben keinen Anlass, eine Anordnung anzustreben, die nur bei sehr großen Anzahlen die potenzielle Energie minimiert. Entsprechend findet man unter den kussreichen Packungen aus wenigen Kugeln neben Teilmengen der Kepler-Packung auch solche, die sich nicht periodisch in den Raum fortsetzen lassen wie die dreiseitige Doppelpyramide.

Arkus interessiert sich besonders für die selbsttätige Zusammensetzung



| n | $\frac{n(n-1)}{2}$ | $3n-6$ | C_n | Anzahl |
|-----|--------------------|--------|-------|--------|
| 1 | 0 | | 0 | 1 |
| 2 | 1 | | 1 | 1 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 4 | 6 | 6 | 6 | 1 |
| 5 | 10 | 9 | 9 | 1 |
| 6 | 15 | 12 | 12 | 2 |
| 7 | 21 | 15 | 15 | 5 |
| 8 | 28 | 18 | 18 | 13 |
| 9 | 36 | 21 | 21 | 52 |
| 10 | 45 | 24 | 24 | 259 |
| | | | 25 | 3 |
| | | | 27 | 1620 |
| 11 | 55 | 27 | 28 | 20 |
| | | | 29 | 1 |

Die bisher bekannten Ergebnisse über Packungen klebriger Kugeln, welche die Anzahl C_n der Berührungen maximieren. Bis $n=4$ stimmt $\max(C_n)$ mit $n(n-1)/2$ überein, also der Anzahl, die sich ergibt, wenn jede der Kugeln jede andere berührt. Bis $n=9$ gilt $\max(C_n) = 3n-6$, die für mechanische Stabilität nötige minimale Anzahl.

(self-assembly) von Nanostrukturen, sowohl natürlichen wie den äußeren Hüllen von Viren als auch technisch erzeugten. Guangnan Meng aus Harvard, der mit Arkus, Brenner und Manoharan zusammenarbeitet, hat eine gute physikalische Näherung an die idealen klebrigen Kugeln entwickelt. Es handelt sich um Styroporkugeln mit einem Durchmesser von einem Mikrometer, die gemeinsam mit einer großen Menge viel kleinerer Nanopartikel aus Kunststoff in Wasser verteilt sind. Sobald sich zwei dieser Kugeln berühren, verdrängen sie die Nanopartikel aus dem Zwischenraum, wodurch sich die Gesamtenergie verringert. Dadurch entsteht eine Anziehungskraft mit sehr geringer Reichweite zwischen den Kugeln.

In Mengs Experimenten sind die Mikrokugeln auf Glasplatten mit tausenden zylindrischer Nöpfchen verteilt; dort bilden sich Packungen mit durchschnittlich etwa zehn Kugeln, die man unter dem Mikroskop betrachten und auszählen kann. Wenn es nur auf die potenzielle Energie ankäme, müssten die Packungen umso häufiger vorkommen, je mehr Berührungspunkte sie haben. Allerdings spielt auch die En-

tropie eine Rolle: Strukturen, die auf viele unterschiedliche Weisen gebildet werden können, sind wahrscheinlicher als solche, die nur einen Entstehungsweg haben. Die experimentellen Ergebnisse stimmten weit gehend mit den theoretischen Vorhersagen überein. Die Entropie begünstigt weniger symmetrische und weniger festgefügte Packungen; da aber zusätzliche Kontakte die potenzielle Energie senken, waren auch Konfigurationen mit mehr als $3n-6$ Bindungen überrepräsentiert.

Neben diesen physikalischen Anwendungen stehen klebrige Kugeln auch in Beziehung zu einem berühmten Problem der reinen Mathematik. Der legendäre Paul Erdős (1913–1996) stellte 1946 folgende Frage: Gegeben seien n Punkte im d -dimensionalen Raum. Wie viele von ihnen können denselben Abstand voneinander haben (den man einfach gleich 1 setzen darf)? In drei Dimensionen ist die Frage nach der maximalen Anzahl von Berührungen von Einheitskugeln äquivalent zu diesem Problem mit der zusätzlichen Forderung, dass keiner der Abstände kleiner als 1 sein darf. Die jüngsten Resultate für klebrige Kugeln lösen demnach diese verschärfte Version des Problems zumindest für $n \leq 11$.

Wie geht es jenseits von $n=11$ weiter? Nach Auffassung von Arkus liegt die größte Schwierigkeit nicht in der Geometrie oder in der Berechnung der Koordinaten, sondern in der Kombinatorik: Wie erzeugt man alle zulässigen Nachbarschaftsmatrizen? Genauer: Wie findet man die verschwindend wenigen Matrizen, die realisierbaren Packungen entsprechen, in dem immensen Heuhaufen der unphysikalischen, denen man diese Eigenschaft aber nicht ansieht?

Arkus schlägt einen alternativen Zugang vor, den sie bisher aber noch nicht erfolgreich umsetzen konnte. Für $n \leq 10$ gelang es ihr zu beweisen, dass sich jede Packung mit $3n-6$ Berührungen in jede andere mit derselben Eigenschaft verwandeln lässt, indem man eine Folge einfacher Transformationen anwendet. Bei jeder dieser einfachen Operationen wird eine Bindung aufgebrochen und

dafür eine neue geknüpft. Wenn das für alle n gilt – was sie vermutet –, dann gibt es ein neues, viel versprechendes Suchverfahren: Erzeuge eine einzige Packung mit $3n-6$ Berührungspunkten und finde dann alle anderen, indem du systematisch alle Folgen dieser Transformationen auf sie anwendest.

Bei irgendeiner – vermutlich großen – Anzahl von Kugeln wird die Vielfalt dieser seltsamen geometrischen Gebilde notwendigerweise abnehmen, weil alle größeren Packungen mehr und mehr wie Ausschnitte der Kepler-Packung aussehen. Aber so weit sind wir noch lange nicht, und bis dahin könnte es noch manche Kuriosität zu entdecken geben. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

- Arkus, N. et al.:** Minimal Energy Clusters of Hard Spheres with Short Range Attractions. In: Physical Review Letters 103, 118303, 2009
- Arkus, N. et al.:** Deriving Finite Sphere Packings. In: SIAM Journal on Discrete Mathematics 25, S. 1860–1901, 2011
- Biedl, T.E., et al.:** Locked and Unlocked Polygonal Chains in Three Dimensions. In: Discrete and Computational Geometry 26, S. 269–281, 2001
- Hoare, R.S. et al.:** Structure of Finite Sphere Packings via Exact Enumeration: Implications for Colloidal Crystal Nucleation. In: Physical Review E 85, 051403, 2012
- Hoy, R.S., O'Hern, C.S.:** Minimal Energy Packings and Collaps of Sticky Tangent Hard-Sphere Polymers. In: Physical Review Letters 105, 068001, 2010
- Meng, G. et al.:** The Free-Energy Landscape of Attractive Hard Spheres. In: Science 327, S. 560–563, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel, weitere Literaturhinweise sowie Verweise auf bewegte Versionen der Bilder dieses Artikels finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201698

Der steinige Weg zur friedlichen Koexistenz

Das Beispiel Yellowstone-Nationalpark zeigt: Die Tierwelt hält sich nicht an die Grenzen eines Schutzgebiets. Umsichtiges Management muss den Interessen der verschiedenen Seiten gerecht werden.

Von Pat Shipman

Bei einer Fortbildung über Konflikte rund um den berühmten Yellowstone-Nationalpark im Nordwesten der USA nutzten einige Teilnehmer einen freien Tag zu einem Ausflug in die Wildnis. Wir fuhren mit Brad Bulin, einem der Dozenten, in den Nordosten, ins Tal des Lamar. An dem Fluss im Grenzgebiet des Parks hatte ein Wolfsrudel tags zuvor einen Bison erlegt. Mit etwas Glück würden wir das Rudel an seiner Beute antreffen.

Vor Ort hatten Wissenschaftler die Situation seit dem Morgengrauen verfolgt. Das Lamar-Canyon-Rudel, das den Bison gerissen hatte, war die ganze Zeit über da gewesen. Zu früher Stunde hatte es einen Grizzly verjagt, der ihm den Fang streitig machen wollte. Später hatte es einen Wolf von einem anderen Rudel, der sich zum Kadaver wagte, getötet. Gerade jetzt machten sich die Lamar-Tiere wieder über ihre gestrige Beute her. Sie wirkten schon ziemlich vollgefressen und zufrieden.

Manche Wölfe hatten ein grauschwarzes Fell mit braunen Flecken, einige ein völlig schwarzes, und ein Tier wirkte beinahe weiß. Das Alphaweibchen und ein Bruderpaar hatten sich erst vor ein paar Jahren zusammengeschlossen. Die Zwei- und Dreijährigen, ihr Nachwuchs, waren schon gute Jäger, und gemeinsam brachte es das Team auf acht Köpfe –

ein starkes Rudel. Mindestens vier Welpen befanden sich zudem in einer Höhle in der Nähe.

Bald trotteten die Wölfe zum Fluss hinunter. Zwei der jüngeren sprangen ins Wasser, und die übrigen tollten miteinander herum, während die Leittiere nur am Ufer tranken und sich dann allmählich Schlafplätze suchten.

Nach einer halben Stunde schaute ich mit dem Fernglas nochmals zum Bison, an dessen Überresten sich jetzt Raben labten. Etwas Graues fiel mir auf: ein Wolf! Schnell blickte ich zurück zum Fluss – und zählte dort immer noch acht Tiere.

Während wir noch überlegten, was das bedeuten mochte, wurde das Rudel offenbar aufmerksam. Die Tiere richteten sich auf, blickten umher und witterten. Dann stand das Alphaweibchen auf und lief die Böschung hinauf Richtung Kadaver, die anderen ihm nach. Sobald das Rudel den neuen Wolf sehen konnte, begann es zu rennen, und er preschte davon, das Lamar-Rudel hinterher. Die Verfolgungsjagd über den Hang dauerte nach unserem Gefühl sehr lange, in atemberaubendem Tempo zog sie sich mindestens einen Kilometer weit. Einmal hatte das fremde Tier so viel Vorsprung gewonnen, dass ich es schon in Sicherheit wähnte. Doch dann setzte sich einer der jüngeren Wölfe an die Spitze seines Trupps und holte langsam auf. Wir sahen noch, wie er den fremden Wolf erreichte und ins Hinterteil biss. Die folgende Szene war für uns teilweise von einer Pappel verdeckt. Zu erkennen war, dass sich sämtliche Verfolger ins Getümmel stürzten. Dabei flogen Fellfetzen, und Schwänze peitschen durch die Luft. Der einzelne Wolf tauchte später nicht wieder auf. Wahrscheinlich war er tot.

Das Lamar-Rudel hingegen gab sich nun ausgelassen-tänzelnd. Dreimal hatte es heute seine Beute erfolgreich verteidigt und sein Territorium zweimal gegen einen anderen Wolf behauptet. Es kehrte zunächst zu dem Bison zurück, fraß ein bisschen und verzog sich dann wieder zum Fluss zu einer Siesta. Die beiden überwältigten fremden Artgenossen gehörten, so vermuteten unsere Begleiter, zur Nachbarfamilie, Mollies Rudel genannt. Diese Gruppe könnte auseinander-

AUF EINEN BLICK

NATUR UND ZIVILISIERTE WELT

1 Seit Mitte der 1990er Jahre leben wieder **Wölfe im Yellowstone-Nationalpark** der USA. Damit gleicht sich das Ökosystem deutlich den früheren Verhältnissen an.

2 Die **Balance der verschiedenen Raubtierarten**, der großen Huftiere und anderen Pflanzenfresser sowie der Vegetation verändert sich sichtlich. Viel mehr als vorher prägen Bäume – und Biber – die Landschaft. Der **Artenreichtum** nimmt zu.

3 Wölfe, und noch mehr Bisons, die den Park verlassen, schüren Konflikte mit angrenzenden Farmern. **Managementprogramme** versuchen ihnen gerecht zu werden.

fallen, fürchtete Brad, nachdem sie an einem Tag gleich zwei ihrer Mitglieder verloren hatte.

Wölfe töten, wenn es sein muss, Artgenossen, die in ihr Territorium eindringen und ihnen ihre Nahrung streitig machen. Andernfalls würde das Rudel womöglich verhungern. Das mag in einem so tierreichen Gebiet wie dem Yellowstone-Park mit seinen zahlreichen großen Huftieren verwundern. Dort leben außer Bisons unter anderem Elche, Wapitis (besondere große Rothirsche, die wohl eine eigene Art darstellen) und verschiedene kleinere Hirsche. Dennoch sind Wölfe anscheinend auf ein reichliches Angebot und ein genügend großes eigenes Revier angewiesen.

Für die Farmer, die nahe an diesem Nationalpark leben, werden die Yellowstone-Wölfe allerdings zunehmend zum Problem. Als die ersten Weißen im 19. Jahrhundert in die

Diese Wölfin, von der die Autorin hier schreibt, führte das Lamar-Canyon-Rudel im Grenzgebiet des Yellowstone-Nationalparks zu Wyoming mehrere Jahre und hatte jedes Jahr einen Wurf. Im Dezember 2012 wurde sie außerhalb des Nationalparks von einem Jäger erschossen. Auch der Bruder des Vaters ihrer Welpen, der dem Rudel angehörte, wurde erlegt. Die übrigen Rudelmitglieder sind noch dabei, sich in der veränderten Situation zurechtzufinden oder neue Partner zu suchen.



JIMMY JONES PHOTOGRAPHY

hoch gelegene, schwer zugängliche Region der Rocky Mountains gelangten, waren diese Räuber noch verbreitet. Aber sie wurden binnen weniger Jahrzehnte ausgerottet; der letzte territoriale Wolf starb 1926.

Wölfe für ein historisches Ökosystem

Als der Nationalpark 1872 gegründet wurde, umfasste das nicht den Schutz der großen Raubtiere. Vielmehr waren sie ausdrücklich zu bekämpfen, um für das Umland einen stetigen reichen Nachschub an Bisons und anderen Huftieren zu gewähren, die man zu jagen pflegte. Die Pelztier als Konkurrenten des Menschen mussten verschwinden. Dass sich damit der gesamte Tier- und Pflanzenbestand stark verändern würde, kam unerwartet.

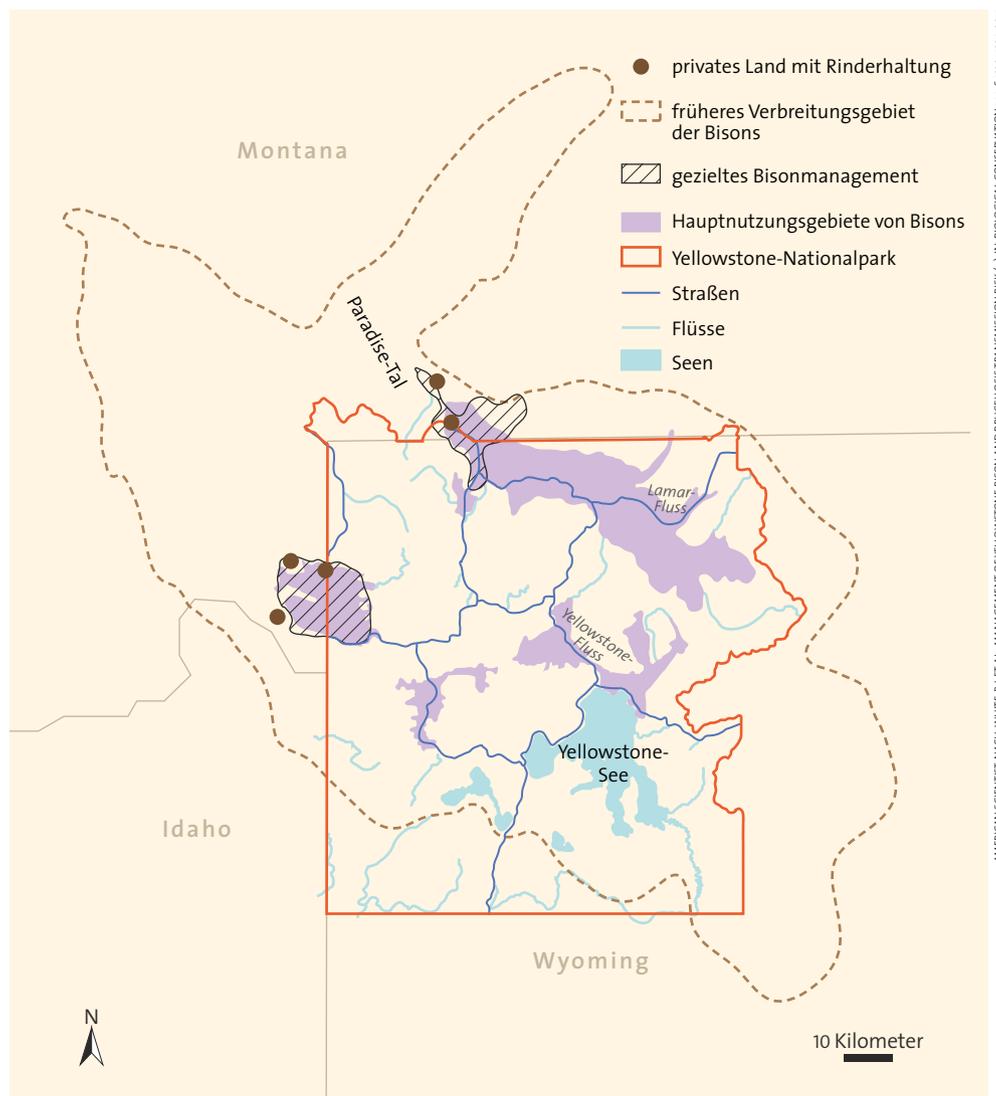
Erst in den 1990er Jahren versuchte man, Wölfe wieder anzusiedeln, um dem Ökosystem die alte Balance und somit sein früheres Gesicht zurückzugeben. Insgesamt 31 Tiere aus zwei Gebieten in Kanada setzte man 1995 und 1996 aus, damals alle im Tal des Lamar. Das Unterfangen hatte Erfolg. Heute leben in dem fast 9000 Quadratkilometer großen

Schutzgebiet rund 100 Wölfe, und es gibt etwa zehn Rudel, die sich über weite Teile des Parks verteilen.

Die ökologischen Auswirkungen der Maßnahme sind schon jetzt eindrucksvoll – auch wenn einige neuere Studien annehmen lassen, dass nicht die Wölfe allein die beobachteten Veränderungen bewirkten. Denn vielleicht trugen auch klimatische Schwankungen dazu bei. Vor allem ging, wie gewünscht, die Anzahl der Wapitis deutlich zurück. Diese großen Hirsche, hier Hauptbeute der Wölfe, hatten sich stark vermehrt und ließen kaum noch Baumschösslinge aufkommen. Inzwischen verjüngt und verdichtet sich der Bewuchs an Pappeln, Weiden und Espen entlang der Flüsse sichtlich. Als Folge dessen nehmen die Biber wieder zu, die Flüsse aufstauen und dadurch feuchte Wiesen und Auen schaffen – Siedlungsraum für viele Fische und Vögel.

Auch die Anzahl der Kojoten, der kleineren Verwandten der Wölfe, geht zurück. Die Wölfe behandeln sie als Beutekonkurrenten und bringen sie um, wenn sie welche antreffen. Daher verziehen sich Kojoten mittlerweile möglichst in wolfsfreie Gegenden. Davon profitieren wiederum die noch

Das Bisonproblem für den Yellowstone-Nationalpark: Wie auch die Wölfe respektieren die Wildrinder keine künstlichen Grenzen. Vor allem im Winter verlassen regelmäßig größere Herden den hoch gelegenen Park und wandern in Land, das ihnen mehr Nahrung bietet – oft sehr zum Ärger der Grenzbewohner, die Rinder halten. Beim bisherigen Management werden sie von dort mühsam wieder in den Nationalpark zurückgetrieben – oder getötet.



AMERICAN SCIENTIST, NACH: WHITE, P.J. ET AL., MANAGEMENT OF YELLOWSTONE BISON AND BRUCELLUS TRANSMISSION RISK (L.) IN BIOLOGICAL CONSERVATION 144, S. 132-134, 2011



DOUG SMITH, NATIONAL PARK SERVICE

Wölfe tragen im Yellowstone-Nationalpark zur Bestandsregulation der Bisons bei. Gegen ausgewachsene Exemplare haben sie in der Regel zwar keine Chance, sie reißen aber jüngere Tiere.

kleineren Füchse. Allen Aasfressern, von Raben bis hin zu Bären, stehen durch die Wölfe jetzt wieder mehr Kadaver zur Verfügung. Sogar die Bisons scheinen von der neuen ökologischen Situation zu profitieren, denn ihre Bestände wachsen weiter. Allerdings ziehen sie nun verstärkt in Täler außerhalb des Nationalparks. Zwar verstehen es nur ein paar der Wolfsrudel, die großen Wildrinder zu erjagen – und auch nur jüngere Bisons –, aber vielleicht weichen diese den Wölfen ja doch lieber aus.

Nicht nur Wölfe, auch Bisons unerwünscht

Wenig erbaut von der neuen Situation sind verständlicherweise die Viehzüchter, deren Land nah am Nationalpark liegt – zum einen wegen der Wölfe, zum anderen wegen der Bisons. Die Tiere halten sich nun einmal nicht an dessen Grenzen. Manche der Ranches direkt im Norden, im Paradise Valley, betreiben dieselben Familien schon seit dem 19. Jahrhundert. Von früheren Problemen mit Wölfen wissen die heutigen Besitzer nichts. Aber jetzt, seit im Yellowstone-Gebiet wieder einige Rudel leben, sehen sie sich damit konfrontiert. Die Menschen haben auch Angst um ihre Kinder und Haustiere.

Farmer erhalten zwar eine Entschädigung, wenn Wölfe Schafe oder Rinder töten. Sie müssen dies aber gleich nachweisen, das heißt die gerissenen Tiere schnell finden, und es muss auch zu erkennen sein, dass tatsächlich Wölfe die Schuldigen waren. Hierzu kursiert die wohl übertriebene Geschichte von einer Schafzüchterin, die in einer Nacht 35 Schafe durch Wölfe verlor. Die Räuber, heißt es, hätten sie gleich so gründlich gefressen, dass die Frau fast nichts mehr nachweisen konnte und keine Kompensationszahlungen erhielt. Außerdem hätten sämtliche tragenden Mutterschafe,

die davongekommen waren, durch die Aufregung ihre Lämmer verworfen.

Bisons, die früher in Riesenherden die amerikanische Prärie besiedelten, haben bis heute für Indianer große symbolische Bedeutung. Die Weißen schlachteten sie auch deswegen massenhaft bis ins 20. Jahrhundert hinein ab, weil sie der amerikanischen Urbevölkerung schaden wollten. Als im Yellowstone-Nationalpark endlich Schutzmaßnahmen griffen, existierten dort noch gerade einmal 25 Exemplare der Wildrinder. Mittlerweile ist die Population wieder auf bald 4000 Tiere angewachsen. Die Wölfe dämmen die Anzahl nun zwar etwas ein, können aber nur jüngere Individuen überwältigen. Dass manche Bisons immer wieder das Naturschutzgebiet verlassen, dürfte auch, besonders in strengen Wintern, an dem besseren Nahrungsangebot in tiefer gelegenen Zonen wie dem Paradise Valley liegen. Dieses Tal ist weniger schneereich, was es auch für die Rinderhaltung so attraktiv macht.

Die eigentliche Sorge bereitet bei Bisons aber nicht die Futterkonkurrenz, sondern die Rinderbrucellose – eine gefürchtete bakterielle Seuche, die beim Vieh Fehlgeburten auslöst und auch auf andere Tiere und den Menschen übergehen kann. Sie überträgt sich durch Ausscheidungen, besonders durch Schleim- und Blutreste nach einer Geburt.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Artenvielfalt und Artensterben« finden Sie unter

www.spektrum.de/artenvielfalt

Wölfe in Deutschland

Über 20 Wolfsrudel leben derzeit wieder in Ost- und Norddeutschland. Und die streng geschützte Art breitet sich weiter aus. Dank umsichtiger Maßnahmen gelingt offenbar ihre Integration in unsere Kulturlandschaft.

VON URSULA LOOS

Wölfe hier zu Lande – das gab es mehr als 100 Jahre lang nicht.

Auch in anderen Ländern Mitteleuropas waren diese Tiere mehr oder weniger ausgerottet. Noch heute findet man Wölfe vor allem in Osteuropa und auf dem Balkan. Doch um die Jahrtausendwende kamen einige Tiere aus Polen nach Deutschland zurück – wohlgerichtet von allein. Der erste territoriale Wolf wurde 1996 in der Lausitz vermerkt, die ersten Welpen kamen dort im Jahr 2000 zur Welt. Inzwischen leben in den östlichen Bundesländern, vor allem in Sachsen und Brandenburg, fast 20 Rudel, sowie einige wenige in Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Die meisten von ihnen haben jetzt jährlich Nachwuchs. In den alten Bundesländern ist der Wolf seit 1980 eine streng geschützte Art, in den neuen seit 1990.

Diese Wölfe bilden genetisch eine gemeinsame Population mit westpolnischen Tieren. Es handelt sich allerdings noch um einen sehr kleinen Bestand, der Unterstützung benötigt. In Ostpolen hatte die Anzahl der Wölfe infolge verstärkter Schutzbemühungen zugenommen, und die Tiere bewegten sich auf der Suche nach neuem Lebensraum nach Westen. Immerhin 26 Rudel vermuten Wissenschaftler inzwischen im Westen Polens.

Da Wölfe weder Grenzen von Naturschutzgebieten noch Weidezäune anerkennen, kommt es immer wieder zu Konflikten: Zum einen ist die Angst vor dem Raubtier tief im Menschen verwurzelt, zum anderen befürchten Tierhalter Verluste bei ihren Schafen und Ziegen und damit finanzielle Einbußen. Ohne vorsorgliche Maßnahmen wie spezielle hohe Zäune oder Schutzhunde sind die Haustiere den Fleischfressern hilflos ausgeliefert. Doch weil es diese Gefahr jahrhundertlang nicht gab, verzichten Landwirte schon seit Langem auf entsprechende Vorkehrungen. Die zuständigen Behörden und Naturschutzverbände informieren Halter in Gebieten mit Wölfen über entsprechende Herdenschutzmöglichkeiten und unterstützen sie darin finanziell und anderweitig. Eine Akzeptanz der Wölfe ist verständlicherweise nur mit effektiven Vorsorgemaßnahmen sowie Entschädigung im Schadensfall zu erreichen.

Solche Probleme bestehen bei der Auswilderung von Wisenten nicht. Die Verwandten der amerikanischen Bisons sind heute die größten Landsäugetiere Europas. Im Rothaargebirge dürfen seit diesem Frühjahr wieder einige der Wiederkäuer frei leben, von denen es hier zu Lande seit Jahrhunderten keine na-



NABU / JAN NODICK

türliche Population mehr gab; im Mai wurde sogar das erste Kalb geboren. Auf ihre Auswilderung hat man die Tiere in den letzten Jahren sorgfältig vorbereitet. Jetzt zeigen sie in dem 7000 Hektar großen Wald ihr natürliches scheues Verhalten: Sie ziehen sich vor Menschen, Hunden und Autos zurück. Als Wanderer oder Radfahrer wird man die Wisente folglich nicht zu sehen bekommen.

Bei den Wölfen arbeiten deutsche Umwelt- und Naturschutzorganisationen mit polnischen zusammen, denn ihr Vorkommen in Deutschland ist von dem Bestand in Polen abhängig. Das Projekt TEWN (Transeuropean Wildlife Network) setzt sich für Korridore ein, in denen die Tiere einigermaßen gefahrlos wandern können. So müssen in Polen über Autobahnen, die den Lebensraum der Wölfe durchschneiden, per Gesetz »grüne Brücken« gebaut werden – die auch Bären, Luchse und Rothirsche nutzen. Doch ob in Deutschland, Polen, Slowenien, Bulgarien oder Kroatien – überall sind die Konflikte um den Wolf ähnlich. Nur wenn alle Interessengruppen miteinbezogen werden, lassen sie sich beilegen. Es wäre schließlich paradox, Ökobauern dafür zu bestrafen, dass sie ihre Tiere auf der Weide halten!

In vielen Ländern entwickeln die Verantwortlichen Managementpläne, damit Wölfe unter uns Menschen existieren können. Ein 100-prozentiger Schutz von Tierherden gelingt zwar nicht, aber die Maßnahmen beginnen zu greifen. In der Lausitz fallen in den letzten Jahren immer weniger Schafe oder Ziegen Wölfen zum Opfer – obwohl ihre Anzahl zunimmt. Nachweislich fressen die Wölfe in Deutschland überwiegend Wild, größtenteils Rehe.

Ursula Loos ist Biologin und Wissenschaftsautorin in Heidelberg.

Weiterführende Literatur:

Kluth, G., Reinhardt, I.: Mit Wölfen leben. Informationen für Jäger, Förster und Tierhalter in Sachsen und Brandenburg. Kontaktbüro Wolfsregion Lausitz et al. (Hg.), 2., überarbeitete Auflage 2009

Sürth, P. et al.: Leitfaden: Lernen, mit dem Wolf zu leben. Fragen aus Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Tourismus. WWF Deutschland (Hg.), Berlin 2011

Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1202354

Eine Infektion beim Menschen kann sich in wiederholten Fieberschüben äußern und wird manchmal chronisch. Vermutlich schon vor Jahrzehnten haben Hausrinder das Bakterium auf Bisons übertragen. Rund 45 Prozent der Yellowstone-Bisons tragen den Erreger, ebenso zwischen 5 und 10 Prozent der dortigen Wapitis. Bei den Hausrindern hält man die Brucellose unter Kontrolle: Herden mit infizierten Tieren werden getötet, außerdem sind die Bestände in Amerika jährlich zu impfen. (In Deutschland, das heute als brucellosefrei gilt, darf nicht geimpft werden, damit etwaige Infektionen durch Importe nachweisbar sind.) Doch die Impfung schützt nicht 100-prozentig. Es bleibt stets ein Restrisiko für eine Neuansteckung – und für den Verlust der gesamten Herde. Außerdem verliert ein US-Bundesstaat den Status als brucellosefrei, sobald nur zwei Infektionsfälle auftreten. Das bedeutet Einbußen beim Verkauf der Tiere und strenge Auflagen für den Transport in andere Bundesstaaten.

Brucellose – ein schwer besiegbarer Feind

Man könnte nun zwar alle Bisons vorsorglich impfen, die an den Grenzen des Nationalparks erscheinen. Das würde die Ansteckungsquote bei den Hausrindern langfristig aber wohl nicht senken. Selbst eine flächendeckende Impfung der Bisons im gesamten Schutzgebiet böte laut einer wissenschaftlichen Untersuchung von 2011 keine Garantie, die Brucellose weit gehend auszurotten. Zudem wäre solch eine Maßnahme in jeder Hinsicht sehr aufwändig, teuer und ein störender Eingriff.

Bisonherden, die außerhalb des Nationalparks auftauchen, versucht man mit Hubschraubern, Geländewagen und berittenem Personal zurückzutreiben, ein stets mühsames Unterfangen, das oft tagelang dauert. Zudem widersetzen sich die Tiere dem manchmal, wenn im Nationalpark Futtermangel herrscht. Solche Herden werden mit viel Aufwand zusammengetrieben, eingepfercht, auf Brucellose untersucht – und bei positivem Befund getötet. Der oben genannten Studie zufolge betraf das in den Jahren von 1985 bis 2000 rund 3100 Bisons. Diese Lösung befriedigt nicht, zumal die Art vor Kurzem noch bedroht war und im Yellowstone-Park eine wichtige ökologische Funktion ausübt. Früher gehörten auch die heute streng überwachten Flächen jenseits der Parkgrenzen zum Verbreitungsgebiet der Population. Die Bisons versuchen sie lediglich wieder zu besiedeln.

Die Rancher beurteilen die derzeitige Situation unterschiedlich. Manche von ihnen akzeptieren sie, und ich hörte einen Farmer sagen: »Wem Bisons auf seinem Land nicht passen, der soll doch nach Ohio ziehen.« Aber einige Tierhalter finden es ungerecht, dass eine wilde Art, die eigentlich auf den Nationalpark beschränkt sein soll, ihre mühselig mit viel Umsicht aufgebauten Rinderherden in Gefahr bringt, ihre Arbeits- und Lebensgewohnheiten umkrempelt und ihrem Geldbeutel zusetzt. Sie fordern Maßnahmen, die jede Ansteckungsgefahr von ihren Rindern abwehren.

Auf der anderen Seite setzen sich Fürsprecher der Bisons, darunter die Buffalo Field Campaign von Nevada, dafür ein,

die großen Wildrinder frei umherziehen zu lassen und den Selektionskräften der Natur auszusetzen. Sie argumentieren, dass genetisch unberührte Bisons nur noch im Yellowstone-Gebiet leben sowie im Wind Cave National Park im westlichen South Dakota, einem der nördlichen Präriebundesstaaten. Alle anderen Vorkommen tragen längst Erbgut von Hausrindern, die Rancher früher gern einkreuzten, damit die Tiere etwas sanftmütiger würden.

Die Yellowstone-Bisons sind hart im Nehmen. Über Jahrtausende haben sich ihre Vorfahren auf diesen durchschnittlich 2500 Meter hoch gelegenen Lebensraum eingestellt und kommen in dem schroffen, felsigen Gelände mit seinen strengen Wintern zurecht. Und mit den 1000-Kilo-Kolossen ist nicht zu spaßen. Bisons verletzen in dem Park mehr Besucher als Bären, denn viele unterschätzen ihre Unberechenbarkeit und Kraft. Während meines Aufenthalts kam ein Tourist einem Bullen näher, als es die Anweisungen erlauben. Prompt nahm der ihn auf die Hörner – der Mann landete im Krankenhaus.

Die Wölfe und Bisons liefern nur zwei besonders eklatante Aspekte für Konflikte rund um den ältesten und einen der größten Nationalparks der Vereinigten Staaten. Es ist äußerst schwierig, heutzutage ein Ökosystem nach früheren Bedingungen zu gestalten. Umsonst bekommen wir ursprüngliche Natur nicht zurück. Notwendig sind ausgewogene Lösungen, die allen Betroffenen und Interessengruppen Rechnung tragen. ~

DIE AUTORIN



Pat Shipman ist emeritierte Professorin für Anthropologie an der Pennsylvania State University in University Park. Zu ihren Forschungsschwerpunkten gehört die menschliche Evolution in Anbetracht der Beziehung zu Tieren.

QUELLEN

Middleton, A. D. et al.: Linking Anti-Predator Behaviour to Prey Demography Reveals Limited Risk Effects of an Actively Hunting Large Carnivore. In: *Ecology Letters* 16, S. 1023–1030, 2013
White, P. J. et al.: Management of Yellowstone Bison and Brucellosis Transmission Risk. Implications for Conservation and Restoration. In: *Biological Conservation* 144, S. 1322–1334, 2011

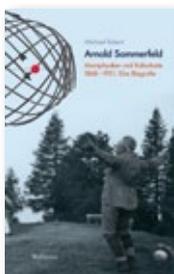
LITERATURTIPP

Robbins, J.: Wieder Wölfe im Yellowstone-Park. In: *Spektrum der Wissenschaft* 8/2004, S. 24–29
Diskussion zum ökologischen Einfluss von Wölfen auf die Pflanzen- und Tierbestände des Nationalparks

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1201699

© American Scientist



Michael Eckert

Arnold Sommerfeld

Atomphysiker und Kulturbote 1868–1951

Eine Biografie

Wallstein, Göttingen 2013. 604 S., € 39,90

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Quanten- und Kriegsphysik

Das Leben des großen Physikers Arnold Sommerfeld liefert spannenden Stoff für eine Biografie. Doch das Buch ist schwere Kost.

Der Physiker Arnold Sommerfeld war kaum weniger bedeutend als seine Zeitgenossen Max Planck oder Albert Einstein, ist aber heute weitaus weniger bekannt. Auch eine Biografie fehlte bisher auf dem Markt. Hier schafft das neu erschienene Buch Abhilfe.

Aber Vorsicht! Das Werk ist aus einem DFG-geförderten Projekt hervorgegangen, das die Wirkung Sommerfelds auf die Physik des 20. Jahrhunderts zum Thema hatte; entsprechend richtet es sich in Inhalt und Stil hauptsächlich an Wissenschaftshistoriker. Michael Eckert, theoretischer Physiker

und am Deutschen Museum für die Geschichte der Physik zuständig, beschreibt in den ersten fünf Kapiteln Sommerfelds Familiengeschichte, seine jungen Jahre und seine frühe berufliche Entwicklung vor dem Hintergrund des späten 19. Jahrhunderts. Das liefert durchaus interessanten Stoff, der allerdings sehr detailreich ausgewalzt wird. So breitet der Autor auf mehreren Seiten aus, wie Sommerfeld Enzyklopädieartikel redigierte oder Register erstellte. Die langwierige, rein chronologische Darstellung unterscheidet Wichtiges nicht von Nebensächlichkeiten; ein und dasselbe Detail wird oft mit mehreren Zitaten belegt. Das macht es schwierig, interessante Höhepunkte aus dem Text zu klauben.

Wer sich die Mühe macht, lernt eine facettenreiche Person kennen: Sommerfeld war nicht nur ein vielseitiger und produktiver Forscher, sondern auch ein begabter Klavierspieler, ein überzeugter Idealist, der sich preußischen Tugenden verpflichtet fühlte, ein geselliger Mensch, dem Frauen ihr Herz ausschütteten, und ein liebevoller Ehemann. Fotos veranschaulichen wichtige Lebensereignisse, und eine Zeichnung verrät Sommerfelds künstlerisches Talent. Zahlreiche Zitate aus seinen Briefwechseln bringen dem Leser die damalige Denk- und Ausdrucksweise nahe und zeigen Sommerfelds feinen Humor. Er erfand Fantasienamen für Politiker und Kollegen (»Giovanni Fortissimo« für einen seiner

Liebblingsfeinde in der Nazizeit, Johannes Stark), und gab seiner Frau ungewöhnliche Kosenamen wie »sympathisches Pendelchen«; gemeint sind gekoppelte Pendel mit gleicher Frequenz, die einander die Energie immer wieder hin- und herreichen. Er zeigte auch eine poetische Ader, indem er die Atomphysik im Vorwort zu seinem Standardwerk »Atombau und Spektrallinien« mit Musik verglich: »Die Quantentheorie ist das geheimnisvolle Organon, auf dem die Natur die Spektralmusik spielt und nach dessen Rhythmus sie den Bau der Atome und der Kerne regelt.«

Hier und da sind kuriose und unterhaltsame Anekdoten über bekannte Wissenschaftler der damaligen Zeit verstreut – wie die Bemerkung von Sommerfelds vierjährigem Sohn zu seiner zwei Jahre jüngeren Schwester: »Du isst ja wie Onkel Boltzmann!«

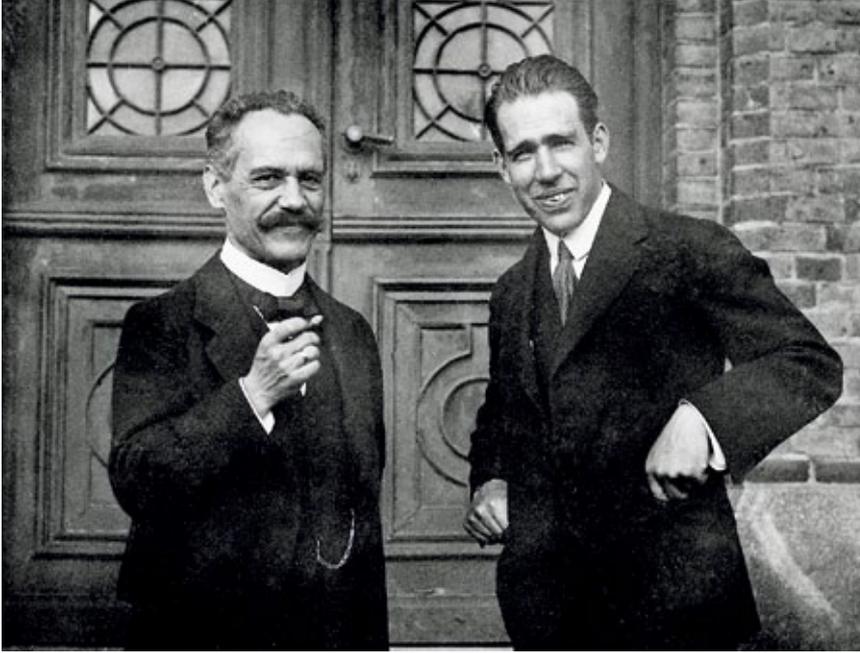
Weitere drei Kapitel befassen sich hauptsächlich mit Sommerfelds wissenschaftlicher Arbeit in München, wo er ab 1906 bedeutende Beiträge zur Atomphysik und Quantentheorie leistete. Unter anderem zeigte er, dass Röntgenstrahlen sich wie Wellen verhalten, und erklärte bis dahin unverstandene Eigenschaften von Metallen. Als begabter Lehrer und Buchautor inspirierte er viele junge Wissenschaftler, darunter Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli. Sommerfeld hält einen zwiespältigen Rekord: Für seine wissenschaftlichen Leistungen wurde er 81 Mal für den Nobelpreis vorgeschlagen und erhielt ihn doch nie – dafür bekamen mehrere seiner Schüler diese Auszeichnung.

Für theoretische Physiker, die sich für die Geschichte ihres Fachs interessieren, sind diese Kapitel Leckerbissen, doch Leser mit weniger Vorkenntnissen dürften sich an der Fülle wenig erklärter Fachbegriffe die Zähne ausbeißen. Die langatmigen Ausführungen machen es schwer, die Rolle Sommerfelds für die Entwicklung der Physik einzuschätzen. Prägnante Zusammenfassungen, ein Stichwortverzeichnis oder ein Glossar wären hilfreich, oder auch eine Zeitleiste wichtiger Ereignisse. All dies fehlt jedoch, so dass man sich wissen-



MIT FRIEDRICH DES WALLSTEINVERLAGS

Nach dem Studium leistete Sommerfeld seinen Militärdienst in Königsberg ab. Er war jedoch kein begeisterter Soldat.



1919 besuchte Arnold Sommerfeld (links) eine Physikerkonferenz in der schwedischen Stadt Lund. Dort traf er auch den berühmten Niels Bohr.

schaftliche und historische Zusammenhänge mühsam aus dem Text herauszusuchen muss.

Schließlich geht es in fünf Kapiteln darum, wie Sommerfeld trotz zwei Weltkriegen die Entwicklung der Quantenphysik vorantrieb. Dieser Teil des Buchs dürfte am ehesten ein breiteres Publikum ansprechen: Hier wird an-

hand von Originalquellen lebendig, welche Schikanen Sommerfeld und andere Wissenschaftler im Dritten Reich ertragen mussten und wie sich die Vertreter einer ideologisierten »Deutschen Physik« selbst lächerlich machten. Einstein und viele andere Fachkollegen wanderten aus, so dass Deutschland seine Führungsrolle in der Forschung

an andere Länder abtrat. Ein Highlight des Buch ist ein leidenschaftliches Anti-Nazi-Gedicht von Sommerfelds Frau.

Wer sich durch die langwierigen Ausführungen kämpft, erfährt viel über wissenschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen zu Anfang des 20. Jahrhunderts und lernt einen der bedeutendsten Physiker jener Zeit als vielseitigen Menschen kennen. Wahrscheinlich jedoch wird das vorliegende Buch nur einen kleinen Leserkreis begeistern. Es bleibt zu hoffen, dass zukünftige Autoren Sommerfelds Leben einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich machen werden.

Manuela Kuhar

Die Rezensentin ist Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in Braunschweig.



Claudi Alsina und Roger B. Nelsen

Bezaubernde Beweise

Eine Reise durch die Eleganz der Mathematik

Aus dem Englischen von Thomas Filk.

Springer, Berlin 2013. 352 S., € 24,95

MATHEMATIK

Eindrucksvolle Sammlung elementarer Beweise

Die Mathematiker Claudi Alsina und Roger B. Nelsen überzeugen mit einer Fülle anschaulicher, kluger und vor allem eleganter Beweise aus zahlreichen Teilgebieten der Elementarmathematik.

»Bezaubernde Beweise« ist die deutsche Ausgabe des Buchs »Charming Proofs: A Journey into Elegant Mathematics«, das die Mathematical Association of America (MAA) 2010 he-

rausgegeben hat. Man kann nur hoffen, dass sie viele Leser findet – nicht nur wegen ihres erstaunlich günstigen Preises. Für das amerikanische Original muss man 60 Dollar bezahlen.

Einer der beiden Autoren, Roger B. Nelsen vom Lewis & Clark College in Portland (Oregon, USA) hat die Taschenbücher »Proofs without Words« (Beweise ohne Worte) verfasst, die in Deutschland schon seit einigen Jahren als Geheimtipp unter Mathematiklehrern gelten. Der andere, Claudi Alsina von der Universität Politècnica de Catalunya (Spanien) ist in Deutschland bisher weniger bekannt. Beide haben jahrelang, auch gemeinsam, Erfahrungen darin gesammelt, Schülern und Lehrern Mathematik zu vermitteln.

Im Vorwort beziehen sich die Autoren auf »Das Buch der Beweise« von Martin Aigner und Günter Ziegler (Erstauflage 1998), jenes Projekt, zu dem der ungarische Mathematiker Paul Erdős, der »Euler des 20. Jahrhunderts«, ermuntert hatte. Während Aigner und Ziegler sich auf Herleitungen beschränken, die Leser mit erfolgreich absolviertem Mathematik-Grundstudium nachvollziehen können, setzen Nelsen und Alsina »bestenfalls etwas Inte-



Chad Orzel

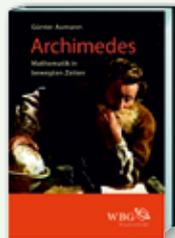
Einsteins Hund. Relativitätstheorie [nicht nur] für Vierbeiner

Aus dem Englischen von Bernhard Gerl.

Springer Spektrum, Berlin 2013. 470 S., € 19,99

Ein Physiker unterhält sich mit seinem sprechenden Hund über die Relativitätstheorie: Das ist die Rahmenhandlung dieses Buchs. Wer das nicht von vornherein für albern hält, findet eine gut verständliche, fachlich solide Einführung ins Thema vor. Auch das Standardmodell der Teilchenphysik kommt zur Sprache. Chad Orzel, Privatdozent für Physik und Astronomie am Union College in New York (USA), nutzt den fiktiven Dialog mit einem Vierbeiner, um den Stoff aufzulockern. Zwar wirken die vermeintlich frechen Bemerkungen des Tiers manchmal arg bemüht, umso mehr in der deutschen Übersetzung (»Alter!«). Liest man darüber hinweg, hilft der Plauderton aber, die Scheu vor dem schwierigen Stoff zu überwinden.

MARTIN SCHEUFENS



Günter Aumann

Archimedes. Mathematik in bewegten Zeiten

Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2013. 224 S., € 39,90

Wie groß ist der Flächeninhalt eines Parabelsegments, also der Figur, die von einer Parabel und einer sie schneidenden Gerade begrenzt wird? Das ist mithilfe der Integralrechnung einfach zu beantworten. Aber wenn man die nicht zur Verfügung hat? Dann geht es mit Mitteln der Schulmathematik, aber es ist überhaupt nicht einfach. Dass Archimedes (287–212 v. Chr.) die Lösung gefunden hat, gilt zu Recht als epochale wissenschaftliche Leistung. Der Karlsruher Mathematiker Günter Aumann führt sie uns vor, dazu weitere Errungenschaften des antiken Großmeisters wie die Berechnung der Volumina von Kegel, Kugel und Zylinder. Das ist schwer genug, aber es handelt sich bereits um die vereinfachte Version, weil Aumann sich der heutigen Notation bedient und auf Konzepte aus der modernen Analysis zurückgreift. Wer dieses Buch durchgeackert hat, wird mit gutem Grund tiefe Bewunderung für den antiken Mathematiker empfinden.

CHRISTOPH PÖPPE



Wilhelm Schmid

Dem Leben Sinn geben. Von der Lebenskunst im Umgang mit Anderen und der Welt

Suhrkamp, Berlin 2013. 472 S., € 22,95

Glaube, Arbeit, Liebe oder eine Passion – was spendet unserem Leben Sinn? Dieser Frage geht der Philosoph Wilhelm Schmid, Autor zahlreicher Bücher zur Lebenskunst, in seinem neuesten Werk nach. Für ihn ist Sinn nichts, was man sich im stillen Kämmerlein zurechtlegen oder herbeirationalisieren kann. Sinn entstehe vielmehr in Auseinandersetzung mit anderen, sprich: durch Liebe. »Ein sinnerfülltes Leben ist ein Leben in Beziehungen«, so die Prämisse, die der Autor in zig Varianten durchspielt. Als Liebe zur Familie, zu Freunden und sogar Feinden, zu Dingen, zur Welt, zum Leben ... Schmid zeigt hunderte Möglichkeiten auf, weist aber in keine Richtung. Als Anleitung zum »guten Leben« taugt seine Prosa daher kaum. Sie liest sich zwar geschliffen, beschränkt sich jedoch auf schier endlose Paraphrasen dessen, worauf man ohne große Mühe selbst gekommen wäre.

STEVE AYAN



Ernst Peter Fischer

Wie der Mensch seine Welt neu erschaffen hat

Springer Spektrum, Berlin 2013. 301 S., € 24,99

Nicht die Technik ist hier Thema, wie der Titel vermuten ließe, sondern die Geschichte der Naturforschung. Anekdotenreich galoppiert der Autor von den Anfängen neuzeitlicher Wissenschaft über die klassische Physik bis zur Quantentheorie und Molekularbiologie. In der Eile misslingen einige Formeln und Eigennamen, und die populäre Darstellung von Kosmologie und Quantenphysik verharrt auf dem Niveau der Mitte des vorigen Jahrhunderts. Unglücklich finde ich Fischers Begeisterung für die naturphilosophischen Eskapaden des österreichischen Quantenphysikers Wolfgang Pauli (1900 – 1958), der in späten Jahren unter den unseligen Einfluss des Schweizer Psychoanalytikers C.G. Jung (1875 – 1961) geriet. Der Abschnitt über Molekularbiologie ist dagegen kenntnisreich. In der Schlussbemerkung drückt der Autor die fragwürdige Hoffnung aus, der Begriff »Information« werde die große Vereinheitlichung aller Wissenschaftszweige bringen.

MICHAEL SPRINGER

gral- oder Differenzialrechnung und elementare Mathematik« voraus. Irritierend ist die vom Übersetzer Thomas Filk gewählte Formulierung, »Bezaubernde Beweise« solle das Buch von Aigner und Ziegler fortsetzen. Das trifft nicht zu; vielmehr möchten Nelsen und Alsina das Werk ihrer Kollegen auf elementarem Niveau ergänzen.

»Bezaubernde Beweise« gliedert sich in zwölf Kapitel, an deren Ende jeweils Aufgaben stehen, die der Leser möglichst selbst bewältigen soll. Ungeduldige können die Lösungen aber auch am Ende des Buchs nachlesen. Ein umfassendes Literaturverzeichnis verweist auf weiterführende Quellen, allerdings erschließt sich nicht immer, welche Referenz zu welchem Thema

Das zweite Kapitel behandelt »besondere Zahlen«. Es enthält den klassischen Beweis der Irrationalität von $\sqrt{2}$ und die Übertragung des Beweises auf \sqrt{k} für nichtquadratische k . Zudem beschäftigen sich die Autoren mit dem Goldenen Schnitt, mit Eigenschaften der Zahl π , ihrer Kettenbruchentwicklung und der Formel von Moivre-Binet. Dass π eine irrationale Zahl ist, hatte bereits 1766 der schweizerisch-elsässische Mathematiker und Philosoph Johann Heinrich Lambert (1728–1777) gezeigt. Nelsen und Alsina präsentieren aber auch jenen eleganten Beweis, den der amerikanisch-kanadische Mathematiker Ivan Morton Niven (1915–1999) im Jahr 1947 führte. Zudem enthält das Kapitel die Lösung der Steiner'schen

»Wegen seines elementaren Anspruchsniveaus eignet sich das Werk auch generell für mathematisch Interessierte«

hilfreich ist. Positiv fällt auch das nützliche Stichwortverzeichnis auf. Die Kapitel sind unabhängig voneinander lesbar und werden durch geistreiche Zitate eingeleitet, die allein schon eine Lektüre lohnen.

Die Fülle der behandelten Themen soll für die ersten drei Kapitel etwas ausführlicher dargestellt werden. Das erste Kapitel widmet sich unter anderem figurierten Zahlen (Klassen von Zahlen, die sich auf geometrische Figuren beziehen, etwa Dreiecks- oder Quadratzahlen), Summen von besonderen Zahlen, Primzahlen, Fibonacci-Zahlen sowie vollkommenen Zahlen und enthält auch Abschnitte über den kleinen Satz von Fermat und den Satz von Wilson. Die Autoren greifen hier wunderbare Konzepte auf, um arithmetische Sachverhalte mithilfe geometrischer Muster anschaulich zu beweisen. Zudem ergänzen sie den genialen indirekten Beweis Euklids, dass es unendlich viele Primzahlen gibt, um zwei vergleichsweise elementare direkte Konstruktionsverfahren für beliebig große Primzahlen. Den kleinen Satz von Fermat beweisen sie sehr anschaulich mit Hilfe der Perlenketten-Idee des amerikanischen Mathematikers und Ingenieurs Solomon Wolf Golomb.

Aufgabe: »Für welche positive Zahl x ist die x -te Wurzel von x die größte?« (Antwort: $x = e$). Den Abschluss bildet die Frage, ob eine Potenz mit irrationaler Basis und irrationalen Exponenten rational beziehungsweise irrational sein kann.

Kapitel 3 beschäftigt sich unter anderem mit dem Satz von Pick, der eine fundamentale Eigenschaft von einfachen Gitterpolygonen beschreibt, sowie dem Satz von Sylvester und Gallai, den Erdős wie folgt formulierte: » n Punkte sollten die Eigenschaft haben, dass die gerade Linie durch zwei beliebige Punkte immer auch durch einen dritten Punkt der Menge verläuft. Man zeige, dass die n Punkte auf einer Geraden liegen.« Anhand von vier eindrucksvollen Beispielen wird die Bedeutung des dirichletschen Schubfachprinzips demonstriert (das die Autoren, wie im Englischen üblich, als Taubenschlagprinzip bezeichnen), bevor das Kapitel mit der genialen Lösung einer Aufgabe der US-Mathematikolympiade endet.

Auch die folgenden Kapitel reizen den Leser, zu Bleistift und Papier zu greifen und Skizzen zu den angesprochenen Problemen anzufertigen. Sie befassen sich unter anderem mit Eigen-



**UNSER UNIVERSUM –
BILDSCHÖN.**

Sterne und Weltraum präsentiert in diesem Kalender 13 faszinierende Motive aus der Welt der Astronomie und Raumfahrt. Zusätzlich bietet er Hinweise auf die wichtigsten Himmelsereignisse 2014 und erläutert auf einer Extraseite alle abgebildeten Objekte. 14 Seiten, 13 farbige Großfotos, Spiralbindung, 55 x 45,5 cm. € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- (inkl. Inlandsversand)

So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
spektrum.com/kalender2014
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com

schaften elementarer geometrischer Figuren, mit kombinatorischen Fragen in Vielecken, mit Parkettierungen, aufregenden Kurven und dreidimensionalen Objekten.

»Bezaubernde Beweise« ist insbesondere Mathematiklehrern uneingeschränkt zu empfehlen. Es enthält viele Anregungen und Hintergrundinforma-

tionen zu unterschiedlichen Fragen, die zwar im Alltag des Mathematikunterrichts nicht immer eine Rolle spielen, aber allein schon deshalb nützlich sind, weil sie eine ungewöhnliche bunte Mischung von elementarer Mathematik und anschaulichen, eleganten Herleitungen ergeben. Wegen seines selbst gewählten »elementaren An-

spruchsniveaus«, das fast immer eingehalten wird, eignet sich das Werk aber auch generell für mathematisch Interessierte.

Heinz Klaus Strick

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



Daniel Chamovitz

Was Pflanzen wissen

Wie sie sehen, riechen und sich erinnern

Aus dem Englischen von Christa Broermann.

Hanser, München 2013. 208 S., € 17,90

BOTANIK

Chemische Kriegführung der Bohne

Dem esoterisch angehauchten Titel zum Trotz weiß Daniel Chamovitz Seriöses über das Wahrnehmungsvermögen der Pflanzen zu berichten.

Natürlich wissen Pflanzen nichts! Erst der Titel des letzten Kapitels »Epilog« ist korrekt und trifft den Inhalt des Buchs: »Die wahrnehmende Pflanze«. Der Autor selbst warnt mehrfach davor, menschliche Tätigkeiten wie »sehen, riechen und sich erinnern« auf die Objekte seiner Forschung zu projizieren. Warum er im Buchtitel und in jeder Kapitelüberschrift genau diesen Fehler begeht, bleibt sein Geheimnis.

Aber davon abgesehen: Daniel Chamovitz versteht es, seine Leser mit vielen Erkenntnissen aus der klassischen Sinnes-, Wachstums- und Bewegungsphysiologie der Pflanzen zu gewinnen. Als Direktor des Manna Center for Plant Biosciences an der Universität Tel Aviv arbeitet er selbst an solchen Fragestellungen. Eine ganze Reihe seiner Beispiele im Buch gehört seit über 100 Jahren zum Grundstudium der Botanik und ist in einer solchen Auswahl nicht

überraschend. Aber auch viele neue Forschungsergebnisse (bis 2011) sind dabei.

Bereits Wilhelm Pfeffer (1845–1920) untersuchte die (Wachstums-)Bewegungen von verschiedenen Pflanzen. Seine Zeitrafferfilme von 1898 bis 1900 kann man sich sogar immer noch im Internet ansehen (suchen Sie unter www.dailymotion.com nach »Wilhelm Pfeffer plant movement«; die im Buch angegebene Adresse stimmt nicht mehr). Charles Darwin (1809–1882) hatte schon vorher die – wie er meinte – den Pflanzen innewohnenden Bewegungen von über 300 Arten durch Nachzeichnen der Bewegungsbahnen auf darüber liegenden Glasplatten studiert. Da sie mehr oder weniger spiralförmig verliefen, nannte er sie Circumnutationen. Er schloss daraus, dass die wichtigen Bewegungen zum Licht (Phototropismus) oder zum Boden hin (Gravitropismus) lediglich Varianten solcher Spiralbewe-

gungen seien. Das blieb Lehrmeinung bis 1968. Dann erkannte man, dass es genau umgekehrt ist: Gravitropismus ist die Ursache, Circumnutation die Folge. Beweisen konnte man das aber erst 2000 an Bord der Internationalen Raumstation, denn in der Schwerelosigkeit zeigten die Pflanzen nur ganz kleine Kreisbewegungen. Setzt man dort jedoch in einer komplizierten Versuchsanordnung die Pflanzen einer künstlichen Schwerkraft aus, verhalten sie sich wie auf der Erde.

Ausführlich schildert Chamovitz die Forschungsgeschichte und Physiologie des Photoperiodismus bei Kurz- und Langtagpflanzen. Es ist die Variation der Tageslänge, die den Blühtermin einer Pflanze bestimmt – wirtschaftlich bedeutend für diejenigen, die pünktlich zu Weihnachten blühende Weihnachtssterne oder Chrysanthemen, eigentlich Herbstpflanzen, zum Muttertag auf den Markt bringen wollen.

Ebenfalls von ökonomischem Interesse sind die Möglichkeiten zur biologischen Schädlingsbekämpfung bei Kulturpflanzen. Pflanzen nutzen Duftstoffe – die wir selbst recht gut wahrnehmen und nicht immer schätzen –, um zum Beispiel Insekten zur Bestäubung anzulocken. Seit 1983 kennt man darüber hinaus eine Art Kriegführung mit chemischen »Kampfstoffen«. Blätter der Limabohne (*Phaseolus lunatus*) geben, wenn sie von Käfern angefressen werden, aus den Wunden einen flüchtigen Duft ab. Der veranlasst die Blüten, einen Nektar zu produzieren, der nun Fressfeinde der angreifenden Käfer anlockt!

Berührt ein Insekt die Blattoberfläche einer fleischfressenden Pflanze wie

Sonnentau oder Venusfliegenfalle, dann wird das Tier relativ schnell in eine raffiniert konstruierte Falle eingeschlossen und anschließend an Ort und Stelle durch aus Drüsen abgeschiedene Säfte verdaut. Das hat wiederum Darwin schon genau beschrieben, aber erst 2007 wurde dabei ein Aktionspotenzial

ten. Diese Gruppe gründete 2005 sogar die »Society for Plant Neurobiology«, milderte allerdings den durch den Namen ausgedrückten Anspruch 2009 durch Umbenennung in »Society of Plant Signaling and Behavior« ab.

Unter den im Untertitel aufgelisteten Fähigkeiten der Pflanzen fehlt

»Der Autor warnt davor, ›sehen, riechen und sich erinnern‹ auf Pflanzen zu projizieren. Warum er im Buchtitel und den Kapitelüberschriften genau diesen Fehler begeht, bleibt ein Rätsel«

wie bei tierischen Nerven gemessen. Diese Vorgänge sind elektrochemisch sehr kompliziert. Chamovitz hilft sich hier – und auch an anderen Stellen – durch Einschalten eines Kastens in den Text. Bei der kritischen Einordnung dieser Ergebnisse vermeidet er einen Konflikt mit anderen Wissenschaftlern, die ähnliche Phänomene als Ausdruck »pflanzlicher Intelligenz« interpretier-

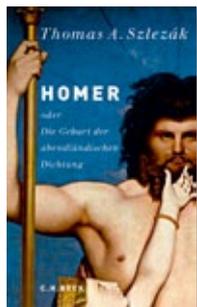
das Hören. Zu Recht, denn »neuere Daten, die irgendeine signifikante Reaktion von Pflanzen auf Klänge belegen würden, gibt es nicht«, so der Autor. Für dieses wenig überraschende Ergebnis verschwendet Chamovitz immerhin 14 Seiten, in denen er unter anderem über die ernst gemeinten Versuche einer Frau berichtet, schädliche Wirkungen lauter Rockmusik von Jimi Hendrix und

Led Zeppelin im Vergleich zu Bach, Mozart und Schönberg auf Pflanzen im Labor zu erforschen, um dann die Ergebnisse als Warnung für junge Menschen zu verwenden. Die kulturpolitische Landschaft der 1960er Jahre und die Auswüchse des New-Age waren der Nährboden für solche »Erkenntnisse«. Dieser Abschnitt ist aber der einzige, den man zu Recht bemängeln kann.

Ansonsten berichtet der Autor in »lesbarer Prosa« – wie er selbst sagt –, was Pflanzen alles wahrnehmen und wie sie darauf oft völlig überraschend reagieren. Interesse an Pflanzenphysiologie sollte der Leser aber schon mitbringen. Das Buch ist äußerlich sehr ansprechend aufgemacht, wie ein Lyrikbändchen; aber als Bettlektüre eignet es sich dann doch nicht.

Jürgen Alberti

Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.



Thomas A. Szlezák

Homer
oder die Geburt der abendländischen
Dichtung

C.H. Beck, München 2012. 255 S., € 24,95

KLASSISCHE PHILOGIE

Homer gehört nicht nur den Humanisten

Wer »Ilias« und »Odyssee« auf den Ursprung abendländischen Gedankenguts reduziert, erfasst die archaische und bildhafte Sprache Homers nur unvollkommen.

Thomas Szlezák, emeritierter Professor für Klassische Philologie in Tübingen, ist ein exzellenter Homer-Kenner. In seinem neuen Buch bietet er vielfältige und aufschlussreiche Einblicke in die philologische Forschung, die sich mit den klassischen altgriechi-

schen Großepen »Ilias« und »Odyssee« befasst.

Man muss allerdings beachten, dass Szlezák zu seinem Thema recht konservative Ansichten vertritt. So geht er von der Überzeugung aus, dass das Abendland die bisher höchste geistige Ent-

wicklungsstufe der Menschheitsgeschichte erreicht habe, und versteht Homer als einen Schöpfer und Vermittler dieser abendländischen Werte: etwa der individuellen Persönlichkeit, der geistigen Freiheit und der aufgeklärten Vernünftigkeit. Diese Position, die auf den Philosophen Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770–1831) zurückgeht, ist längst nicht mehr Konsens unter den Kulturwissenschaftlern. Dagegen steht die Auffassung, dass ein einheitlicher, an der abendländischen Klassik orientierter Maßstab den Wert und damit auch die Eigenart fremder Sprachen und Literaturen nicht erschließen kann.

Auch über viele Einzelfragen zur homerischen Dichtung kann man unterschiedlicher Auffassung sein; aber auf diese geht der Autor kaum ein.

Das erste Kapitel beschreibt knapp – und keinen Widerspruch duldend – die Geschichte der Überlieferung und gibt Erklärungen zur Datierung der Dichtung und zu ihrer Herkunft aus einer längeren mündlichen Erzähltradition, sowie zu Herkunft und Alter der Troja-Sage. Hier findet sich auch die erste Ver-



ANC IMAGES / BRICH LIESING (INGRES, J.A.D.; APOTHEOSE HOMERS, 1827; MUSÉE DU LOUVRE)

Der französische Maler Jean-Auguste-Dominique Ingres schuf 1827 das Gemälde »Apotheose Homers«. Es zeigt den Dichter vor einem altgriechischen Tempel sitzend, während ihm bedeutende Persönlichkeiten aus allen Zeiten huldigen.

teidigung Homers gegen seine Kritiker, deren früheste bereits aus der Antike stammen. Sie und ihre Nachfolger, so Szlezák, hätten den Text einfach nur nicht richtig und gründlich gelesen.

Diesem philologisch genauen Lesen sind die beiden umfangreichen Haupt-

»Mit seiner Darstellung gibt Szlezák den heutigen Lesern einen sehr hilfreichen Leitfaden. Jedoch ist man ständig mit den Werturteilen des Autors beschäftigt«

kapitel »Ilias« und »Odyssee« gewidmet. Beide beginnen mit einer Zusammenfassung der Handlung und behandeln dann die verschiedenen literarischen Formen, die für beide Epen charakteristisch sind. Darauf aufbauend interpretiert Szlezák einzelne ausgewählte Szenen. Zum Schluss gibt er einen Einblick in das »Weltbild« des jeweiligen Epos und bewertet seine Bedeutung sowie seinen »Anspruch«, das heißt den Maßstab, den es nachfolgenden Generationen setzte.

Nur die »Ilias« kann nach dieser Analyse von Form und Inhalt als im eigentlichen Sinn vollkommen gelten und damit »Homer« zugeschrieben werden.

Mit seiner Darstellung des vielschichtigen Aufbaus der Handlung gibt Szlezák den heutigen Lesern einen sehr hilfreichen Leitfaden. Aber auch hier ist man ständig mit den für dieses Buch charakteristischen Werturteilen beschäftigt.

Die Darstellung der »Odyssee« ist von wertenden Vergleichen geradezu durchdrungen. Den Autor der »Ilias« preist Szlezák als einen genialen Dichter, der sich aus einer älteren mündlichen Tradition, einer archaischen, gar primitiven Vorstufe der Heldendichtung emanzipiert habe. Zum ersten Mal habe er das menschliche Dasein in seiner Fülle, die individuelle Persönlichkeit in ihrer Entscheidungsfreiheit und der damit verbundenen Tragik dargestellt. Dagegen habe der Dichter der »Odyssee« lediglich versucht, »ein Großepos in der Manier und dem Anspruch der Ilias zu schaffen«; dieses Werk minderer Qualität könne nicht

vom selben Autor stammen. Solche Wertungen unterstützen den Leser nicht unbedingt dabei, »Homer mit Genuß zu lesen und zu verstehen«, wie der Text auf dem Rückendeckel verspricht!

Ähnliches gilt für den oberflächlichen Exkurs in die altorientalische Literaturgeschichte, den das letzte Kapitel bietet. Das ältere mesopotamische »Gilgamesch-Epos« sei zwar für sich betrachtet in Teilen »großartig«, verkörpere aber nur eine geistesgeschichtliche Vorstufe, die nicht zum Verständnis der homerischen Dichtung beitrage.

Wer über eine klassische Bildung und entsprechendes Vorwissen verfügt, wird dieses Buch mit Gewinn lesen können. Für alle anderen empfiehlt sich die vorherige und begleitende Lektüre der »Ilias«, vorzugsweise in der modernen Übersetzung von Wolfgang Schadewaldt (1900–1974), die in dessen Todesjahr erschienen ist. Auf ihn geht auch Szlezáks Darstellung zurück. Die von Schadewaldt in den »Iliasstudien« von 1943 veröffentlichte Analyse der »Bauformen« der »Ilias« hat bis heute Bestand.

Schadewaldt hat jedoch auch das moderne humanistische Menschenbild in den Text hineininterpretiert, und Szlezák folgt ihm darin. Das ist keineswegs zwingend. Heute sind verschiedene Deutungen zulässig, auch solche, die an frühere und »primitivere« Traditionen anknüpfen.

Diese sind dem heutigen Leser auch ohne philologische Vorbildung zugänglich. Homers Sprache ist gegenständlich, reich an Bildern und von einer emotionalen Wucht, der jeder folgen kann. Die Übersetzung des Archäologen Roland Hampe (1979) bietet eine Interpretation mit eigenwilliger Wortwahl. Noch kreativer und noch poetischer ist Raoul Schrotts Iliasübertragung von 2008. Sie gibt ungewöhnlich direkt und bildhaft konkret wieder, wie der archaische Dichter mit großer emotionaler Intelligenz die menschlichen Dinge ganz einfach zum Ausdruck gebracht hat.

Barbara Patzek

Die Rezensentin ist Professorin für Alte Geschichte an der Universität Duisburg-Essen.

1913

Halbstarre Zigarre

»In der Umgegend von Düsseldorf finden Probefahrten eines Luftschiffs neuartiger Bauart statt. Das Luftschiff ist eine halbstarre Konstruktion aus Mannesmannstahlrohr. Teilglieder, Versteifungsträger und Gondel werden als Kiel angegliedert. Der Tragkörper wird durch die Verbindung mit dem sich selbst haltenden Kiel ver-

steift. Alle Zugkräfte werden weitgehend verteilt. Der Innendruck des Gases wird auf geringerer Höhe als gewöhnlich gehalten, der Stoff infolgedessen geschont. Das stabile Gerüst erlaubt die Anbringung aller Antriebsmechanismen, Steuerorgane und Beruhigungsflächen, so daß sie zwingend auf das Schiffsganze wirken. Das Luftschiff besitzt zwei Paar Holzpropeller von je 4,5 Meter Durchmesser, die durch zwei Daimlermotoren von je 130 P.S. vermittelt Kegelradgetriebe angetrieben werden.« Technische Monatshefte 9, S. 282, 1913



Die »V1« der Deutschen Luftschiffwerft in Düsseldorf.

Der rasende Reporter

»Die Reise um die Welt in 35 Tagen 21 Stunden 35 Minuten dürfte das Neueste auf dem Gebiete der Rekordbrecherei sein. Der Reisende, der sich den Anstrengungen einer solchen Jagd unterzogen hat, ist ein Vertreter der Newyorker Zeitung Evening Sun, er hat die Leistung von A. Jaeger-Schmidt aus dem Jahre 1911 um volle vier Tage unterboten. Die Vollendung der Leistung wurde dadurch ermöglicht, daß die verschiedenen in Frage kommenden Transportgesellschaften durch Bereitstellung von Extrazügen, Dampfzügen usw. für den Fortfall auch der kleinsten Unterbrechung bei Schiffs- bzw. Bahnwechsel sorgten.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 38, S. 797, 1913

Kind ohne Großhirn

»Ein Kind von 3¼ Jahren, bei dem die Sektion das völlige Fehlen des Großhirns ergab. Diesen noch niemals zuvor beobachteten Fall beschrieben L. Edinger und B. Fischer. In der physiologischen Literatur spielt seit langem der berühmte Hund eine Rolle, dem Goltz das Großhirn entfernt hatte, und der in diesem Zustande noch 3 Jahre lebte. Es ist nun erstaunlich, wie viel weniger dieser Mensch zu leisten vermochte als der erwähnte Hund. Das Kind hat in dauerndem Schlaf gelegen, die Arme zusammengezogen und fast bewegungslos. Nie wurden die Hände zum Greifen oder Halten benutzt. Es war nicht möglich, irgend eine seelische Reaktion zu finden.«

Die Umschau in Wissenschaft und Technik 40, S. 841, 1913

Ein Herz für Hunde

»K. Atsumi von der chirurg. Universitätsklinik Tokio teilte mit, daß es ihm und seinen Mitarbeitern gelungen ist, einen Hund sieben Stunden lang am Leben zu erhalten, dem ein Herz aus Polyäthylen eingesetzt worden war. Das künstliche Organ wog 320 Gramm und bestand aus zwei Ventrikeln, die durch einen Elektromotor von 150 g Gewicht mit einer Energiequelle von 12 V in Bewegung gesetzt wurden. Die Hauptschlagadern wurden über Polyäthylenschläuche mit dem Organ verbunden.« Naturwissenschaftliche Rundschau 9, S. 370, 1963

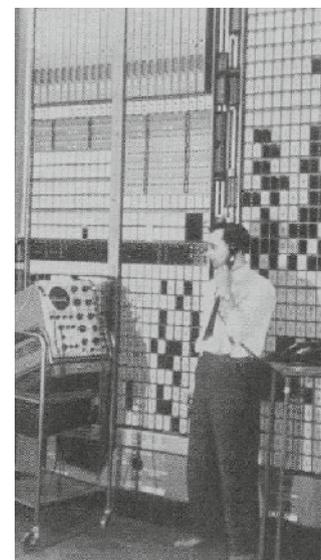
Schwarz oder Weiß?

»F. Wesley und F. D. Klopfer vom Portland State College, Portland (USA), prüften das visuelle Unterscheidungsvermögen von 18 Schweinen. Den Tieren wurden schwarze und weiße Flächen vorgelegt, von denen eine mit Futtergabe koordiniert war. Diese Dressur gelang! Nun wurde die Versuchsordnung geändert. Man verwendete drei verschiedene zeitliche Darbietungen und Beleuchtungsintensitäten. Dabei zeigten nur drei Schweine eindeutige Reaktionen auf Schwarz, während die anderen versagten. Insgesamt scheint das Hauschwein kein nennenswertes visuelles Lernvermögen zu besitzen.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 18, S. 577, 1963

Telefonieren im Mikrosekundentakt

»Zwischen den Städten London und Paris wurde die automatische Fernwahl eröffnet. An der sechsjährigen Entwicklungsarbeit sind sechs britische Hersteller und die Post beteiligt. Die Anlage arbeitet nach einem Zeit-Multiplex-Verfahren. Auf diese Weise können auf einer einzigen Verbindung gleichzeitig bis zu 100 Gespräche geführt werden. Die elektronische Umschaltung arbeitet mit 10 kHz, wobei je 100 µs nacheinander den einzelnen Verbindungen zugeteilt werden. Infolge dieser schnellen Umschaltung wird die Hörfrequenz des Gesprächsverkehrs nicht gestört.« Elektronik 9, S. 288, 1963

1963

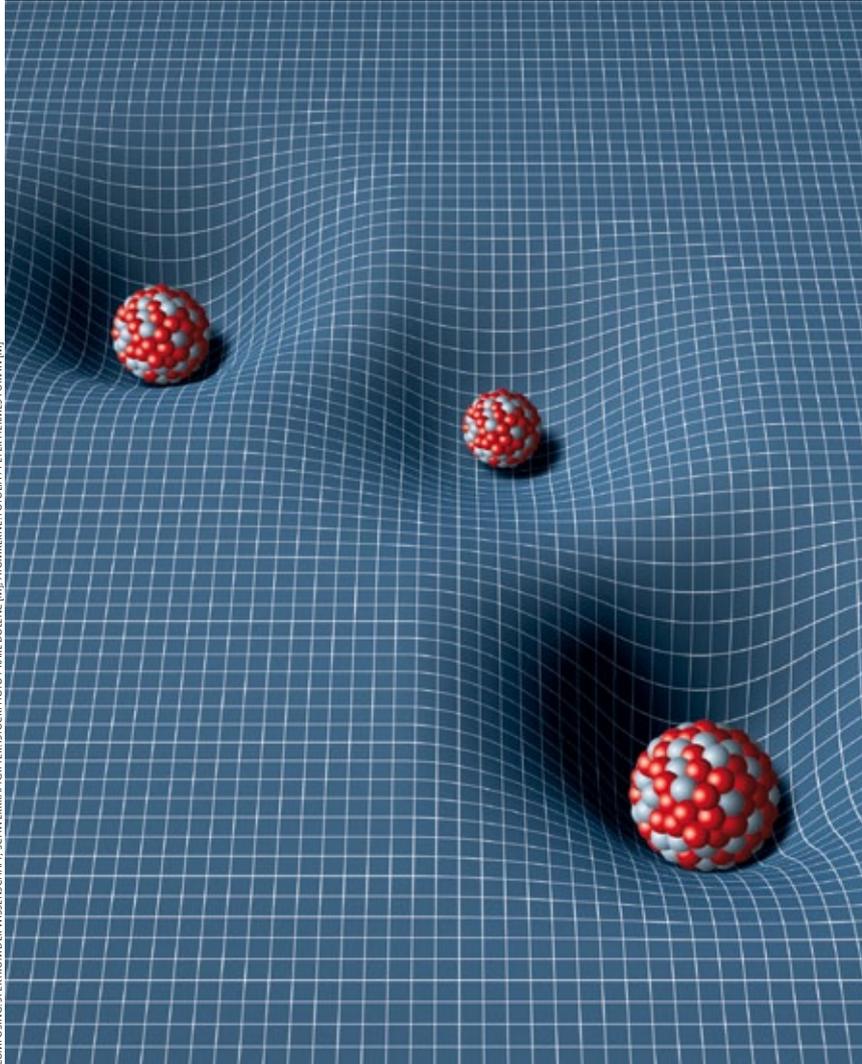


Elektronische Wählvermittlung im Fernsprechamt Highgate in London.

Einstein im Quantentest

Mit ausgefeilten quantenphysikalischen Experimenten wollen Physiker ein zentrales Element der Relativitätstheorie überprüfen, das einsteinsche Äquivalenzprinzip. Der Streit darüber, wie sich die bisherigen Ergebnisse interpretieren lassen, berührt fundamentale Fragen: Wie funktionieren Zeit und Gravitation auf atomarer Ebene?

COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; SCHWIERKRAFTGITTER: ISTOCKPHOTO / KARL DOLENEK [M]; ATOMKERN: FOTODIA / PETER HERMES FURBAN [M]



Mehr als Ratten und Fliegen

Forscher stützen sich heute auf zu wenige Tiermodelle – Hausmaus, Taufleie, Fadenwurm –, um Krankheiten, genetische Mechanismen, Molekularbiologie und Physiologie des Menschen zu ergründen. Kritiker mahnen daher breitere Studien an, die den komplexen Sachverhalten besser gerecht werden.

Rüstzeug gegen Vorurteile

Anspielungen auf Geschlecht, Rasse oder Religion können Leistungen in der Schule, am Arbeitsplatz oder beim Sport beeinträchtigen. Psychologen haben neue Wege gefunden, wie sich dieser Effekt verhindern und sogar ins Gegenteil verkehren lässt.



DREAMSTIME / ALIPIREH

Der Herr über die Turbulenz

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts experimentierte Ludwig Prandtl in Göttingen mit Wasser- und Windkanälen und machte die Erforschung turbulenter Strömungen zu seinem Lebenswerk. Er schuf dafür die bis heute gültige Grenzschichttheorie.



FOTODIA / FLASHPIX

Entzauberte Antioxidantien

Viele Menschen meinen, Antioxidantien förderten die Gesundheit und wirkten Alterungsprozessen entgegen. Neue Studien an Mäusen und Fadenwürmern legen jedoch das Gegenteil nahe: Die Einnahme von »Radikalfängern« könnte mehr schaden als nützen!

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

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



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!

So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo
Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin



Jeden Donnerstag neu!

- mehr als 40 Seiten News, Hintergründe, Kommentare und Bilder aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar
- mit exklusivem Artikel aus **nature** in deutscher Übersetzung



Infos und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum.de/testwoche