

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

FEBRUAR 2013

EXOPLANETEN

Das Klima
fremder Welten

STUDIEN-DILEMMA

Viele publizierte Ergebnisse
lassen sich nicht reproduzieren

MODELLIERUNG

Wie simuliert man das
Schicksal der Menschheit?

TRANSMUTATION

Nukleare Alchemie

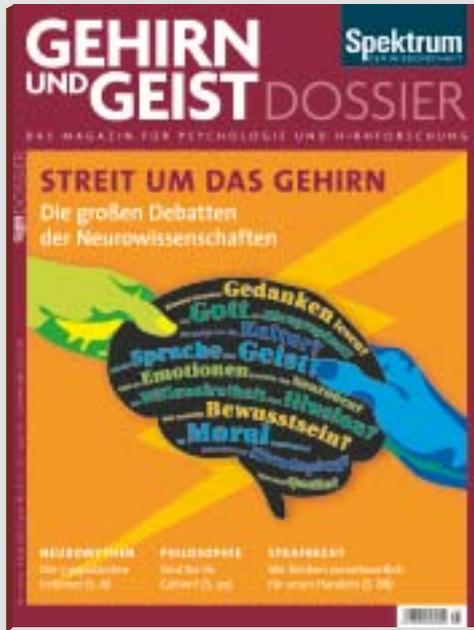
Atommüll strahlt hunderttausende Jahre.
Eine umstrittene Technologie
soll diese Zeit drastisch verkürzen



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



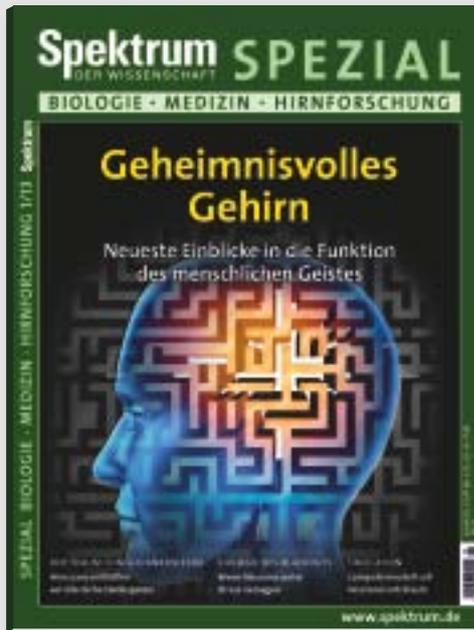
UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Die 7 größten Neuromythen • Der Traum vom Gedankenlesen • Was vom freien Willen übrig blieb • Was es heißt zu fühlen • Schlau auf Rezept? • € 8,90



So lernen Kinder Fairness • Wie Eltern Trotzphasen meistern • Wann Ergotherapie wirklich sinnvoll ist • Die Stufen des Spracherwerbs • € 8,90; Nachdruck



Komplexitätstheorie: Das Gehirn als Netzwerk • Springende Gene: Was jedes Gehirn einzigartig macht • Biologie des Blackouts • Schizophrenie: Vorboten des Ich-Verlusts • € 8,90



Ernährung: Gesund und lecker • Altern ist was für Mutige • Unsere Knochen und Muskeln – so bleiben sie in Form • Warum schlafen und träumen wir? • € 6,50

AUSGEWÄHLTE
SONDERHEFTE ALS
PDF ODER APP
ERHÄLTlich

www.spektrum.de/lesershop



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

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Heikle Materie

Am 28. November 2012 trat die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) mit einer bemerkenswerten Nachricht an die Öffentlichkeit: Durch eine neue Technologie könne man das Problem der Endlagerung von Atommüll drastisch schmälern. Das noch zu entwickelnde Verfahren heißt Transmutation, die nuklearchemische Verwandlung von Elementen. Konkret sollen bestimmte, zuvor abgetrennte Anteile verbrauchter Brennstäbe, die normalerweise für mehrere hunderttausend Jahre endgelagert werden müssten, durch Neutronenbeschuss in harmlosere, erheblich kürzerlebige radioaktive Stoffe umgewandelt werden. Deren Strahlung unterschreite bereits nach wenigen Jahrhunderten jene von natürlich vorkommendem Uran. Dank der neuen Technik würden Endlager zwar nicht überflüssig. Doch deren Raumbedarf dürfte immerhin um 90 Prozent oder mehr schrumpfen. »Transmutation hat großes Potenzial, die Probleme bei der Endlagerung von radioaktivem Abfall zu vermindern, denen sich die Gesellschaft auch nach dem Atomausstieg stellen muss«, zitiert die DPG ihre Präsidentin, die Teilchenphysikerin Johanna Stachel von der Universität Heidelberg.

Was ist dran an der Transmutation, fragt »Spektrum der Wissenschaft« in diesem Heft. Verspricht sie wirklich wesentliche Antworten auf die brennende Frage, wie wir den wachsenden Berg an nuklearem Abfall abbauen können? Anders als Deutschland, Belgien und die Schweiz, die den Atomausstieg beschlossen haben, planen mehrere Staaten derzeit neue Reaktoren – dort braucht es in jedem Fall eine langfristige Strategie, wie man des Müllproblems Herr werden will. Aber auch wir werden nach Abschalten des letzten Meilers im Jahr 2022 auf knapp 30 000 Kubikmetern hochtoxischen Schrotts sitzen, schätzt das Bundesamt für Strahlenschutz. Und ein Endlagerstandort ist noch nicht gefunden.

Vier Nuklearchemiker um Joachim Knebel vom Karlsruher Institut für Technologie erklären ab S. 34, wie die nukleare Alchemie konkret funktionieren könnte. Außerdem fragten die »Spektrum«-Redakteure Reinhard Breuer und Thilo Körkel den Atomexperten Christoph Pistner vom Darmstädter Öko-Institut nach den Risiken des äußerst komplexen Verfahrens, welches auch den Bau neuer Reaktoren erfordern würde. Wir hoffen, Ihnen, liebe Leserinnen und Leser, mit diesem Heft die eigene Meinungsbildung zu einer nicht nur wissenschaftlich interessanten, sondern auch politisch brisanten Frage zu erleichtern. Weitere Kommentare pro und kontra Transmutation finden Sie auf spektrum.de/transmutation.

Eine aufschlussreiche Lektüre wünscht
Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Karlsruher Nuklearforscher **Joachim Knebel** zählt zu den Vordenkern der Transmutation. Gemeinsam mit drei Kollegen stellt er die Technologie ab S. 34 vor.



Brian Hayes, langjähriger Kolumnist des »American Scientist«, hat beunruhigende Neuigkeiten zu einem alten Gegenstand: dem Computerprogramm hinter dem Weltbestseller »Die Grenzen des Wachstums« (S. 76).



Auf dem Weg zu einer extrasolaren Meteorologie: Der Astrophysiker **Kevin Heng** von der ETH Zürich betreibt Klimaforschung für Exoplaneten (S. 46).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Zwergplanet Makemake praktisch ohne Atmosphäre • Geschichte der Roma • Miniplastiken aus DNA • Grünalge frisst Zellulose • Wasserstoff für Minibrennstoffzellen • Stechmücken bei Nebel

11 Bild des Monats

Fuß statt Flosse

12 Forschung aktuell

Gene und Hirnevolution
Wie der Mensch zu seinem großen Gehirn kam

Kosmisches Netz
Erstmals Dunkle-Materie-Filamente nachgewiesen

Neuroprothese für Querschnittsgelähmte
Reha mit Lauftraining

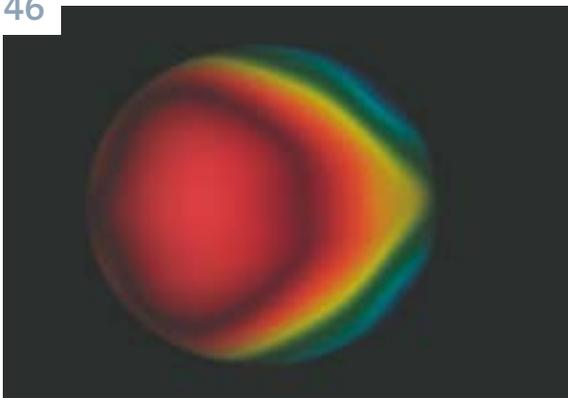
Vielfalt statt Fichten
Um dem Klimawandel zu begegnen, müssen die deutschen Wälder neu gemischt werden

SPRINGER'S EINWÜRFE
Wie weiblich ist die Wissenschaft?
Diskriminierung wird subtiler

22



46



58



BIOLOGIE & MEDIZIN

SERIE ALLERGIE TEIL 3

22 Impfen gegen Allergien

Lauren Gravit

Viel versprechende Ansätze zur Vorbeugung.

28 Der Mensch im Zentrum

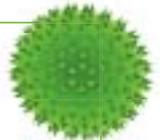
Stephen Holgate

Ausrichtung der Therapie am persönlichen Genprofil.

30 Frischer Wind in der Asthmaforschung

Amy Maxmen

Molekulare Signalwege des Immunsystems im Fokus.



PHYSIK & ASTRONOMIE

► **46 Das Klima auf fremden Welten**

Kevin Heng

Heiße Gase oder erdähnliche Verhältnisse? Astronomen untersuchen erstmals die Atmosphären von Exoplaneten.

SCHLICHTING!

54 Wie vergitterte Fenster die Welt einfärben

H. Joachim Schlichting

Interferenzerscheinungen, wo niemand sie erwartet hätte.

MENSCH & KULTUR

► **58 Jede Menge Murks**

Ed Yong

Viele wissenschaftliche Studien lassen sich nicht reproduzieren. Was läuft da schief?

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

64 Tierische Pflasterungen

Christoph Pöppe

Peter Raedschelders findet nichtperiodische Flächenfüllungen mit Entchen, Täubchen und Dinosauriern.



► TITELTHEMA

Nukleare Alchemie

34 Was tun mit dem nuklearen Abfall?

Joachim Knebel, Concetta Fazio,

Werner Maschek und Walter Tromm

Abgebrannter Brennstoff aus Kernkraftwerken bleibt Hunderttausende von Jahren radioaktiv. Eine Technik namens »Partitioning und Transmutation« könnte das Problem zumindest teilweise entschärfen.

INTERVIEW

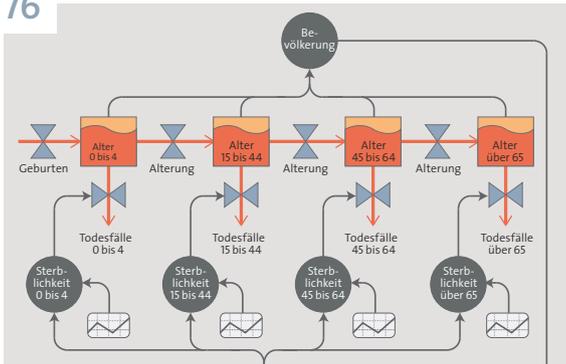
42 Alchemie oder Alternative?

Welche Zukunft hat die Transmutation? »Spektrum« hat mit dem Nuklearexperten Christoph Pistner gesprochen.

70



76



ERDE & UMWELT



► 70 Herren über Leben und Tod

Michelle Nijhuis

Bewertungsschemata sollen den Artenschutz optimieren.

TECHNIK & COMPUTER

► 76 Computersimulationen und das Schicksal der Menschheit

Brian Hayes

Der Bestseller »Die Grenzen des Wachstums« von 1972 war überaus einflussreich, aber wissenschaftlich unhaltbar.

SONDERTEIL NACH SEITE 82

»Biotechnologie im Umbruch«

- Krebsstammzellen: Die Wurzel des Übels
- Grüne Gentechnik: Pflanzen nach Maß
- Synthetische Biologie: Leben aus dem Baukasten



83 Rezensionen

Bernd-Olaf Küppers: Die Berechenbarkeit der Welt • Hanns Hatt, Regine Dee: Das kleine Buch vom Riechen und Schmecken • David Stuttard, Sam Moorhead: 31 v. Chr. • Kari Herbert, Huw Lewis-Jones: 77° Süd • Karin Kneissl: Testosteron macht Politik u. a.

92 Wissenschaft im Rückblick

Vom Dinosauriersterben zur Parkinsontherapie

94 Vorschau

Titelmotiv: dreamstime / Markus Gann [M]
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

Nahrungsmittelunverträglichkeit und -allergie

Indem man Allergiker behutsam an die Allergene gewöhnt, versuchen Forscher potenziell tödliche Reaktionen zu vermeiden, berichtete Rebecca Kessler. (»Wenn im Essen der Tod lauert«, Dezember 2012, S. 38)

Josef Peter Kosek, Rietberg: In dem Beitrag heißt es, dass Nahrungsmittelunverträglichkeiten zu den häufigsten Auslösern anaphylaktischer Reaktionen zählen. Dies ist nicht der Fall. Bei der Milchunverträglichkeit etwa fehlt dem Betroffenen das Enzym Laktase, wodurch der Milchzucker (Laktose) im Magen nicht in Traubenzucker (Glukose) und Schleimzucker (Galaktose) gespalten werden kann. Die Laktose löst im Darm Schmerzen, Blähungen und Durchfall aus, die so genannte Laktose-Unverträglichkeit. Der Beweis lässt sich durch einen Laktose-Toleranztest führen. Das ist aber keine anaphylaktische Reaktion.

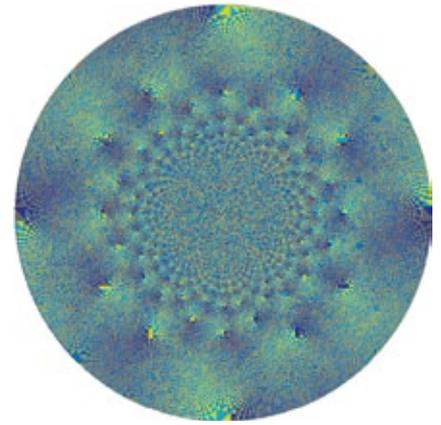
Die Milchallergie dagegen ist keine Nahrungsmittelunverträglichkeit. Hierbei handelt es sich um eine allergische

Reaktion auf das Milcheiweiß, nicht auf den Milchzucker. Die Folgen: Übelkeit, Neurodermitis, Asthma bronchiale bis hin zur Anaphylaxie.

Auf der Ebene des Objekts oder der des Beobachters?

Anhand eines Beispiels versuchte Michael Springer den schwierigen Gebrauch der beiden Begriffe zu erläutern. (»Komplexität und Emergenz«, September 2012, S. 48)

Arno Ros, Magdeburg: Für den Beitrag über Komplexität und Emergenz scheint mir eine öfter zu beobachtende Doppeldeutigkeit im Gebrauch des Wortes Emergenz kennzeichnend zu sein. Emergenz wird ja üblicherweise für das Entstehen eines bestimmten Phänomens verwendet, und damit also für ein bestimmtes, in der Zeit ablaufendes Geschehen. Beim verwendeten Beispiel der Emergenz eines makrophysikalischen Systems aus einer immensen Menge kleiner physikalischer Teilchen aber handelt es sich natürlich



MIT FOLGEN VON JAMES PROPP UND ED PEGG, JR. (WATHPUZZLE.COM)

»Emergenz« ist das spontane Entstehen neuer Strukturen oder Eigenschaften beim Zusammenspiel von Elementen.

nicht um ein in der Zeit ablaufendes, durch bestimmte Faktoren beeinflusstes Geschehen. Das, was hier geschieht, spielt sich gar nicht auf der Objekt-ebene ab, sondern auf der Ebene des Beobachters: dadurch, dass dieser von einem Beschreibungssystem (dem der Mikrophysik) zu einem anderen (dem der Makrophysik) übergeht.

Der mal objekt- und mal beobachterbezogene Gebrauch von »Emergenz« kann mit unterschiedlichen Erklärungs-

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Prof. Dr. 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 Heinzelmann,

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

Redaktionsassistent: Erika Eschwei

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 33814

Verlagsleiter: Richard Zinken

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

E-Mail: service@spektrum.com

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit:

Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Claudia Krystofiak,

Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser,

Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SDW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67,

40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01.2012.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co.

KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung,

Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der 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 Inchcombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



wünschen verknüpft werden: Objektbezüglich gebraucht ist beispielsweise die Frage danach, wie sich die Emergenz von Lebewesen aus Anhäufungen chemischer Stoffe erklären lässt, eine Frage der Evolutionsbiologie. Dieselbe Frage beobachterbezüglich verstanden läuft hingegen darauf hinaus, ob es möglich ist, methodisch nachvollziehbare Schritte zu benennen, die es uns erlauben, von einer Beschreibung eines bestimmten Phänomens als eine Anhäufung chemischer Stoffe zu einer anderen Beschreibung zu wechseln, der zufolge es sich hier um ein mehr oder weniger komplexes Lebewesen handelt.

Mathematik hält jung

Marc Dressler würdigte die Verdienste des russischen Mathematikers Andrej Nikolajewitsch Kolmogorow. (»Von der Schipiste in den abstrakten Wahrscheinlichkeitsraum«, November 2012, S. 82)

Ursula Friedl, Bad Kötzing: In dem Artikel erwähnen Sie, dass Kolmogorow 1941 die Manuskripte seiner Studenten rettete, und fügen an: »Die danken es ihm noch heute.« Glauben Sie wirklich, dass von diesen Studenten heute noch welche leben beziehungsweise danken? Sie müssten inzwischen alle mindestens 90 Jahre alt sein! Aber vielleicht hält die Mathematik ja auch jung.

Antwort des Autors: Derjenige, der von der Rettung seines Manuskripts berichtete, war zwar schon 107 Jahre alt, aber noch am Leben, als das »Spektrum«-Heft erschien. Leider ist Sergei Michailowitsch Nikolski am 9. November 2012 gestorben. Da Nikolski einer der älteren Studenten Kolmogorows war, scheint es mir nicht unwahrscheinlich, dass noch andere am Leben sind und weiter aus dem Jungbrunnen der Mathematik schöpfen.

Möglichkeiten mit Fakten verwechselt

Markus Aspelmeier und Markus Arndt diskutierten, ob quantenmechanische Phänomene auch bei großen Massen

auftreten. (»Schrödingers Katze auf dem Prüfstand«, Oktober 2012, S. 44)

Gunter Berauer, München: In dem Beitrag und auch im Leitartikel dazu finden sich Aussagen, die mit der Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik nicht in Einklang sind. Nach dieser allgemein anerkannten Interpretation beschreibt die quantenmechanische Wellenfunktion die zeitliche Entwicklung der Wahrscheinlichkeiten, mit denen sich verschiedene Eigenschaften an einem Objekt bei einer Wechselwirkung mit seiner Umwelt zeigen können. Dabei ist in der Wellenfunktion die Art der in Betracht gezogenen Wechselwirkung bereits erfasst. Die Wellenfunktion beschreibt also erstens keine Fakten, sondern nur Möglichkeiten, und zweitens nicht das Objekt an sich, das es in der Mikrophysik auch gar nicht gibt, sondern immer auch die in Betracht gezogene Wechselwirkung desselben mit einer »beobachtenden« Umwelt.

Findet dann eine solche, in der Wellenfunktion bereits implizierte Wechselwirkung statt, kollabiert die Wellenfunktion auf einen der vorher in ihr repräsentierten möglichen Eigenschaftswerte, welcher damit zum Faktum beziehungsweise zur Wirklichkeit wird. Die Wellenfunktion beschreibt deshalb die Wahrscheinlichkeitsentwicklung von Ereignissen auch nur zwischen zwei Wechselwirkungen, genauer gesagt, solange nicht eine Wechselwirkung der in der Wellenfunktion in Betracht gezogenen Art stattfindet.

Da in der Wellenfunktion sich also nur Möglichkeiten und keine Fakten überlagern – bei der Katze die beiden Möglichkeiten, sie beim Nachschauen tot oder lebendig vorzufinden –, ist es unsinnig, davon zu sprechen, die Katze sei vor dem Nachschauen gleichzeitig tot und lebendig, wie das behauptet wird. Genauso unsinnig wäre es, von einem Lottospieler zu behaupten, er habe, bevor die Zahlen gezogen wurden, gleichzeitig gewonnen und verloren.

Deshalb ist auch Reinhard Breuers Behauptung auf S. 46 nicht korrekt, das

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

studivz

www.spektrum.de/studivz

twitter

www.spektrum.de/twitter

Betragsquadrat der Wellenfunktion gebe an, »mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein bestimmtes Objekt in einem bestimmten Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort befindet«. Falsch an dem Satz ist zwar nur das letzte Wort. Allerdings ist dieser Fehler gravierend, weil damit Möglichkeiten als Fakten hingestellt werden. Richtig müsste es statt »befindet« etwa heißen: »bei einer Wechselwirkung manifestieren würde«.

Erratum

»Feinstaub im Blick«, Bild des Monats, Januar 2013, S. 13

Die Quellenangabe PNAS 109, S. 17490–17494, 2012 gehört hier nicht hin. Es gibt keine wissenschaftliche Publikation zu diesem Bild.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf
www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe / Sigrid Spies
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

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

ASTRONOMIE

Zwergplanet Makemake praktisch ohne Atmosphäre

Forscher haben neue Erkenntnisse über den Zwergplaneten Makemake gewonnen. Er ist nach Eris und Pluto der drittgrößte Zwergplanet, der die Sonne jenseits der Neptunbahn umrundet. Sein mittlerer Abstand zur Sonne ist 46-mal so groß wie jener der Erde; für einen Umlauf benötigt er rund 309 Jahre.

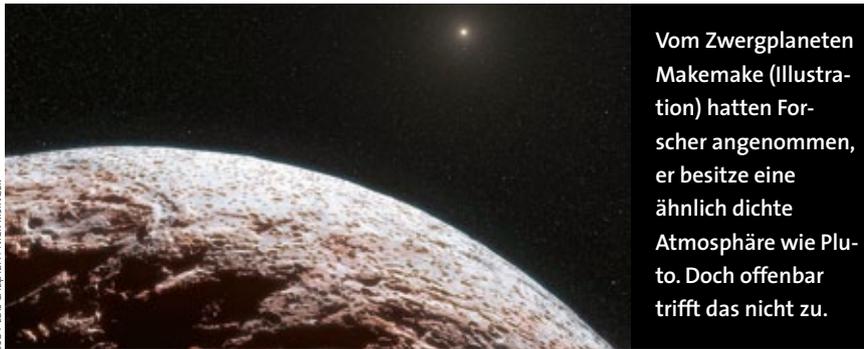
Am 23. April 2011 zog Makemake vor einem Hintergrundstern vorbei

und bedeckte diesen etwa eine Minute lang. Mehrere Teleskope registrierten das Ereignis. Astronomen um José Ortiz vom Instituto de Astrofísica de Andalucía (Spanien) haben aus den dabei beobachteten Lichtkurven abgeleitet, dass Makemake leicht elliptisch ist: Seine längere Achse misst zirka 1500 Kilometer, die kürzere rund 1430 Kilometer. Mit vermutlich 1,7 Gramm pro Kubikzentimeter ist seine

mittlere Dichte ähnlich wie die des Pluto. Zudem stellten die Astronomen fest, dass der Zwergplanet drei Viertel des einfallenden Sonnenlichts reflektiert. Seine Oberfläche ist damit heller als die von Pluto, aber dunkler als jene des Zwergplaneten Eris.

Als Makemake sich vor den Hintergrundstern schob, ließ er diesen abrupt verschwinden. Ebenso plötzlich kam der Stern später auf der anderen Seite des Zwergplaneten wieder zum Vorschein. Somit kann Makemake, entgegen den Erwartungen der Astronomen, nur eine sehr dünne Atmosphäre besitzen: Ihr Druck an der Oberfläche des Planeten beträgt laut Modellrechnungen höchstens einige Milliardstel des irdischen Luftdrucks. Möglicherweise gibt es in wärmeren Regionen des Himmelskörpers Gebiete mit höherem Atmosphärendruck.

Nature 491, S. 566–569, 2012



Vom Zwergplaneten Makemake (Illustration) hatten Forscher angenommen, er besitze eine ähnlich dichte Atmosphäre wie Pluto. Doch offenbar trifft das nicht zu.

ESO / LUIS CALÇADA / NICK RISINGER

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Studien und Analysen lesen Sie jeden Donnerstag in

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

- **Pharmakologie:**
Fluor auf dem Vormarsch
- **Traumaforschung:**
Die Wurzeln der Widerstandskraft
- **Klimatologie:**
Das antarktische Paradox

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

ETHNOLOGIE

Gene zeichnen Geschichte der Roma nach

Die Wanderwege der Roma begannen auf dem indischen Subkontinent. Das bestätigen nun Forscher um Manfred Kayser von der Erasmus-Universität in Rotterdam. Sie analysierten das Erbgut von 152 Roma aus 13 europäischen Ländern und verglichen es mit dem von Indern.

Demzufolge stammen die Roma von einer Gruppe ab, die vor etwa 1500 Jahren von Nordindien nach Westen auswanderte. Anfangs schrumpfte sie auf weniger als die Hälfte der ursprünglichen Größe und passierte damit einen »genetischen Flaschenhals«. In den folgenden Jahrhunderten führten die Wege der Roma-Migranten durch den Mittleren Osten, den Kaukasus und Zentralasien. Dabei vermischten sie sich nur wenig mit einheimischen Gruppen, übernahmen aber teils deren Sprachen und Kulturen. Etwa im

11. Jahrhundert begannen sie über den Balkan nach Europa einzuwandern. Hier teilten sie sich in einen westlichen Zweig, der die Iberische Halbinsel erreichte, und einen östlichen, der nach Mitteleuropa vordrang. Den Analysen zufolge sind die bulgarischen Roma die ursprünglichste europäische Population: Sie ähneln genetisch noch am stärksten jenen Ethnien, die heute im indischen Rajasthan und in Kaschmir leben.

Die beiden europäischen Zweige nahmen recht unterschiedliche Entwicklungen, wie die Untersuchungen ergaben. Während die westlichen Roma sich zunächst häufig mit anderen Europäern vermischten, blieben die Roma in Mitteleuropa und im Balkangebiet eher unter sich. Dies scheint sich in jüngerer Zeit aber umzukehren.

Current Biology 22, S. 2342–2349, 2012

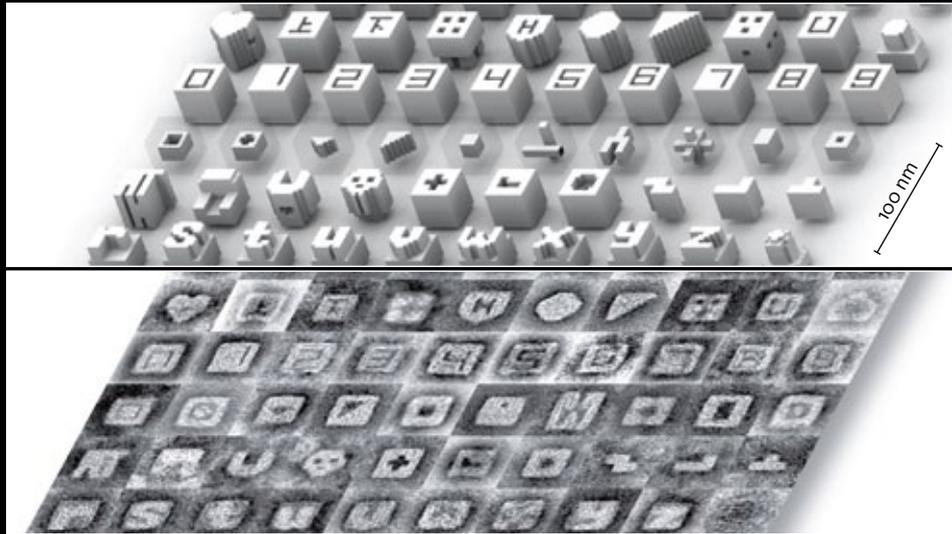
Miniplastiken aus DNA

DNA-Stränge mit zueinander passenden Sequenzen binden von selbst aneinander. Dies nutzen Forscher um Peng Yin von der Harvard University (USA), um winzige Skulpturen herzustellen. Das Team verwendet künstliche DNA-Einzelstränge mit einer Länge von 32 Nukleotiden. Sie haben unterschiedliche Sequenzen, passen aber in einzelnen Abschnitten zueinander, so dass sie sich dort zusammenlagern. Jeder Strang bindet an vier Nachbarn und bildet mit ihnen eine räumliche Struktur. Bei geschickt vorgegebenen Sequenzen entsteht aus solchen Strukturen ein nanometergroßer Würfel. Indem man darin einzelne DNA-Stränge weglässt, kann man Formen mit Löchern, Kanälen und modellierten Oberflächen erzeugen.

Die Forscher entwerfen die gewünschte Form am Bildschirm. Ein Computer wählt dann aus einem Satz standardisierter DNA-Stränge die erforderlichen aus; ein Roboter mischt diese im Reagenzglas zusammen. Mögliche Anwendungen liegen etwa in maßgeschneiderten Gerüsten für den Transport von Arzneistoffen zu bestimmten Zielorten.

Science 338, S. 1177–1183, 2012

Am Computer entworfene Formen (oben) lassen sich im Reagenzglas herstellen (unten, Aufsicht-Elektronenmikroskopbilder).



YONGGANG KE, WYSS INSTITUTE, HARVARD UNIVERSITY

Grünalge frisst Zellulose

Die Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* kann Zellulose verdauen. Sie ist damit der erste fotosynthetisch aktive Organismus, bei dem diese Eigenschaft nachgewiesen wurde.

Bisher war nur von bestimmten Bakterien, Pilzen und Tieren bekannt, dass sie sich von der schwer zersetzbaren Zellulose ernähren können.

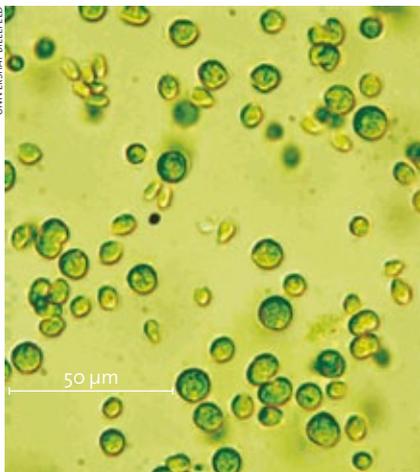
C. reinhardtii gewinnt den Kohlenstoff für ihren Stoffwechsel normalerweise, indem sie Fotosynthese betreibt – also Lichtenergie nutzt, um Kohlendioxid (CO₂) und Wasser in Zucker umzuwandeln. Forscher um Olaf Kruse von der Universität Bielefeld haben nun festgestellt, dass die Alge auch in CO₂-armen Nährmedien gedeiht, wenn das Medium Zel-

lulose enthält. Selbst Algen, die auf Grund genetischer Defekte nicht zur Fotosynthese in der Lage sind, vermehren sich in Anwesenheit von Zellulose stark.

Die Wissenschaftler fanden heraus, dass *C. reinhardtii* Enzyme ausschüttet, mit denen sie Zellulosemoleküle in ihrer Umgebung zerlegt. Dabei entstehen kleinere Zuckerverbindungen, die die Alge aufnimmt und verarbeitet. Bisher ist keine andere Alge oder Pflanze bekannt, die Zellulose aufschließen kann. Möglicherweise lässt sich *C. reinhardtii* für biotechnologische Verfahren nutzen, etwa um Holz, Stroh oder Papier kostengünstig in Substanzen zu zerlegen, aus denen sich Biotreibstoffe herstellen lassen.

Nature Communications 3, 1214, 2012

Die Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* ist weltweit verbreitet und lebt in Süßwasser. Sie dient häufig als Untersuchungsobjekt für die Grundlagenforschung.



UNIVERSITÄT BIELEFELD

CHEMIE

Wasserstoff für Minibrennstoffzellen

Ein chinesisch-englisches Forscherteam hat einen Katalysator entwickelt, der bei erstaunlich niedrigen Temperaturen Methanol-Wasser-Gemische zu Kohlendioxid und Wasserstoff umsetzt – ein als »Methanol-Reforming« bekanntes Verfahren. Er arbeitet bereits bei 150 Grad Celsius, während bisherige Katalysatoren Temperaturen von 250 bis 280 Grad Celsius benötigen. Möglicherweise könnte er Wasserstoff für kleine Brennstoffzellen liefern, schreiben die Wissenschaftler um Edman Tsang von der University of Oxford (England). Die Technik ließe sich etwa dazu einsetzen, tragbare Computer mit Strom zu versorgen – und zwar wesentlich länger, als das mit Batterien möglich ist.

Der Katalysator ist eine Keramik vom so genannten Spinelltyp – von dem sich auch die Hochtemperatursupraleiter ableiten – aus Kupfer, Gallium, Zink und Sauerstoff. Im Zuge des Fertigungsprozesses scheiden sich auf seiner Oberfläche nanometergroße Kupferpartikel ab, aber auch unzählige winzige Ansammlungen von Kupferatomen, so genannte Cluster, deren Größe bei Bruchteilen eines Nanometers liegt. Diese haben gemeinsam eine riesige katalytisch aktive Oberfläche, was den Stoffumsatz erhöht. Zwar reicht die Leistung des Katalysators nicht aus, um mit großtechnischen Anwendungen zu konkurrieren oder Wasserstoff zum Betreiben eines Autos zu liefern, genügt aber für Brennstoffzellen im Taschenformat.



Elektronenmikroskopaufnahmen zeigen: Auf der Oberfläche des neuen Katalysators sitzen nanometergroße Kupferpartikel neben zehnmal kleineren Kupferclustern (Pfeile).

YU, KAIKAI ET AL., NATURE COMMUNICATIONS 3, 1230 (2012)

Ob der Katalysator in absehbarer Zeit in der Praxis eingesetzt wird, ist noch offen. Zunächst müsse das Material seine Langlebigkeit unter Beweis stellen, schreiben die Forscher.

Nature Communications 3, 1230, 2012

BIOLOGIE

Warum Stechmücken bei Nebel am Boden bleiben

Bei Nebel legen Stechmücken eine Flugpause ein. Das erstaunt zunächst, denn mit Regen haben die Plagegeister kaum ein Problem. Wenn die Tiere im Flug mit fallenden Tropfen zusammenstoßen, taumeln sie zwar vorübergehend, werden sonst aber kaum beeinträchtigt, obwohl sie dabei enorme Beschleunigungen

erfahren. Wissenschaftler um Andrew Dickerson vom Georgia Institute of Technology (USA) haben jetzt gezeigt, warum Nebel mit seinen viel feineren Tröpfchen – sie sind etwa 100-mal kleiner als Regentropfen – die Tiere dazu zwingt, am Boden zu bleiben.

Mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitskameras fand das Team heraus,

dass die Mücken zwar kaum aus der Bahn geworfen werden, wenn sie mit Nebeltröpfchen kollidieren. Jedoch funktionieren in dem Dunst ihre so genannten Schwingkölbchen (Halteren) nicht mehr richtig: Gleichgewichtsorgane, die für die Flugsteuerung wichtig sind. Dieses umgebildete zweite Flügelpaar schlägt im Gegenteil zu den eigentlichen Flügeln und hilft der Mücke, ihre Orientierung im Raum zu bestimmen. Dabei schwingt es rund 400-mal pro Sekunde auf und ab. Bei Nebel prallen die empfindlichen Schwingkölbchen in jeder Sekunde auf mehrere tausend Tröpfchen, was sie schon nach kurzer Zeit ausfallen lässt. Das Insekt ist dann nicht mehr in der Lage, seine Flugbewegungen adäquat zu steuern.

Tagungsbeitrag zur 65. Jahresversammlung der »American Physical Society Division of Fluid Dynamics«, San Diego, 18.–20. November 2012



PINZO / PUBLIC DOMAIN

Die Schwingkölbchen sind bei dieser Schnake klar zu sehen (rote Kreise). Sie bewegen sich rasch hin und her und knicken ab, wenn das Insekt die Flugrichtung ändert. Ihr Funktionsprinzip entspricht dem eines Vibrationskreisels zum Messen von Drehbewegungen.

FUSS STATT FLOSSE



Eine kleine Veränderung in einem so genannten *Hox*-Gen, und schon entwickelt ein Zebrafischembryo beinartige Gliedmaßen statt Flossen. Womöglich führte ein solcher DNA-Umbau zu den ersten landtauglichen Extremitäten.

Developmental Cell 23,
S. 1219–1229, 2012

Genvariante erklärt Besonderheit unseres Gehirns

In der Evolutionsgeschichte des Menschen haben sich mehrere Gene verdoppelt. In einem Fall entstand dadurch anscheinend eine Variante, die dazu beitrug, dass sich unser Gehirn drastisch vergrößerte und durch eine verzögerte Entwicklung die Fähigkeit erlangte, sich besser und flexibler an Umgebungseinflüsse anzupassen.

VON DANIEL H. GESCHWIND UND GENEVIEVE KONOPKA

Die Entzifferung der Genome von Mensch und Schimpanse verspreche unter anderem auch Aufschluss darüber, welchen Veränderungen im Erbgut wir unsere geistigen Fähigkeiten verdanken – so hieß es vor über einem Jahrzehnt. Trotz einer Fülle detektivischer Kleinarbeit seither ist jedoch bis auf wenige Ausnahmen unklar geblieben, wie Unterschiede zwischen unserem Genom und dem der Menschenaffen die kognitive Überlegenheit von *Homo* erklären könnten.

Kürzlich haben nun Teams um Megan Y. Dennis von der University of Washington in Seattle und Cécile Charrier vom Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien) eine heiße Spur entdeckt. Als sie die Evolutionsgeschichte und Funktion eines menschlichen Gens namens *SRGAP2* untersuchten, stießen sie auf molekulare und zelluläre Mechanismen, die eine Brücke zur Entwicklung unseres Gehirns schlagen könnten.

Dass dieses Gen eine Rolle bei der Hirnreifung spielt, ist schon länger bekannt – desgleichen die Tatsache, dass es beim Menschen in mindestens drei Versionen vorkommt, während nicht-menschliche Primaten über nur eine verfügen. Genauer ließ sich aber nicht sagen. Der Nachweis von verdoppelten oder sehr ähnlichen Genen wird nämlich dadurch erschwert, dass die meisten menschlichen Zellen zwei Exemplare von jedem Chromosom enthalten, je eines vom Vater und von der Mutter. Das macht es schwierig, zwischen den beiden elterlichen Versionen und zusätzlichen Kopien zu unterschei-

den. Um diese Klippe zu umschiffen, suchten Dennis und ihre Kollegen nach Exemplaren von *SRGAP2* im Erbgut eines Blasenmols – eines abnormen, nicht lebensfähigen Embryos. Er entsteht bei der Verschmelzung eines Spermiums mit einer Eizelle, die ihr genetisches Material verloren hat, und enthält deshalb nur Chromosomen vom Vater.

Auf diese Weise konnten die Forscher zeigen, dass der Mensch an separaten Positionen auf Chromosom 1 vier leicht unterschiedliche Versionen von *SRGAP2* trägt. Zur Kennzeichnung erhielten sie die Buchstaben A bis D. Das Team um Dennis verglich die Nukleotidsequenz dieser Varianten – die Abfolge von Bausteinen der Erbsubstanz, in der die genetische Information steckt – mit der des entsprechenden Gens bei Schimpanse und Orang-Utan. Die Abweichungen deuteten darauf hin, dass sich das Ur-*SRGAP2* in der menschlichen Abstammungslinie vor 3,4 Millionen Jahren verdoppelte. Dabei entstand zusätzlich zur Variante A, die wir mit den Menschenaffen gemeinsam haben, die B-Form. Bei dieser kam es zu weiteren Verdopplungen, durch die sich vor etwa 2,4 Millionen Jahren *SRGAP2C* und vor rund einer Jahrmillion *SRGAP2D* bildete.

Wie sich zeigte, produziert der Mensch die in den Varianten B und D verschlüsselten Proteine in weit geringeren Mengen als die von A und C. Außerdem bestehen bei B und D größere Unterschiede zwischen einzelnen Individuen, was darauf hindeutet, dass sie keine wichtige Funktion haben und sich deshalb schadlos verändern kön-

nen. Anders die C-Form. Sie könnte nach Ansicht ihrer Entdecker eine wichtige Rolle bei der Abspaltung der *Homo*-Linie vor zwei bis drei Millionen Jahren gespielt haben, als das menschliche Gehirn damit begann, seine besonderen Fähigkeiten herauszubilden, die zur Entwicklung von Sprache, komplexem Sozialverhalten und analytischem Verstand führten.

Ausnehmend viele Verknüpfungen

Parallel zu den Arbeiten von Dennis untersuchten Charrier und ihre Kollegen die Bedeutung der *SRGAP2*-Genvarianten für die Entwicklung dendritischer Dornen. Das sind kleine, knopfförmige Ausstülpungen auf der Außenmembran von Neuronen, die eine wichtige Rolle bei der Übermittlung von Nervensignalen spielen: An ihnen docken die Fortsätze (Axone) anderer Nervenzellen an. Wie frühere Studien ergeben hatten, kommen sie im menschlichen Gehirn in größerer Zahl und Dichte vor als bei den übrigen Primaten und den Nagetieren. Der Grund dafür war bisher unbekannt.

Wie Genomvergleiche ergaben, hat sich das Gen *SRGAP2* während der Evolution des Menschen gleich dreimal verdoppelt (a). Während die ursprüngliche Form *SRGAP2A* die Reifung von Dornfortsätzen auf der Oberfläche von Dendriten fördert, lässt die Variante C mehr solche Fortsätze sprießen. Diese sind deshalb beim Menschen zahlreicher – möglicherweise mit ein Grund für seine höhere Intelligenz (b).

Indem die Gruppe um Charrier Nervenzellen von genetisch veränderten Mäusen und von menschlichem Hirngewebe analysierte, konnte sie zeigen, dass das ursprüngliche *SRGAP2A* die Reifung bereits existierender dendritischer Dornen fördert und die Wanderung von Nervenzellen im sich entwickelnden Gehirn hemmt. Die für den Menschen spezifische Variante C hat dagegen genau den gegenteiligen Effekt. Dadurch begünstigt sie die Bildung neuer Dornen (siehe Grafik). Ihr Auftreten könnte somit dazu beigetragen ha-

ben, dass sich bei unseren Vorfahren die Hirnrinde (der Kortex) vergrößerte und die Zahl der dendritischen Dornen zunahm. Damit leistete *SRGAP2C* zugleich einen Beitrag zur Leistungssteigerung und Plastizität des Gehirns – also seiner Fähigkeit, als Reaktion auf neue Erfahrungen die Verschaltung der Nervenzellen abzuwandeln.

Dennis und ihre Kollegen untersuchten auch einige tausend junge Patienten mit Entwicklungsstörungen und fanden bei einigen darunter DNA-Verdopplungen oder Deletionen, von

denen *SRGAP2A* oder *SRGAP2C* betroffen waren. Obwohl die kleine Zahl keine statistisch abgesicherten Schlüsse erlaubt, liefert der Befund doch ein Indiz dafür, dass Mutationen dieser beiden Gene für psychiatrische Erkrankungen verantwortlich sein könnten. Diese Hypothese passt zu anderen Hinweisen, wonach die Entwicklung eines größeren und komplexeren Gehirns mit einer höheren Anfälligkeit für neurologische Störungen einherging.

Zusammengenommen zeigen die Ergebnisse von Dennis und Charrier einen plausiblen Weg auf, wie für den Menschen spezifische Genverdopplungen einst dessen kognitive Leistungsfähigkeit steigern konnten. Womöglich helfen sie auch zu erklären, warum unser Denkkorgan so ungewöhnlich lange braucht, bis es seine volle Funktionsfähigkeit erlangt – ein als Neotenie bezeichnetes Phänomen. Indem *SRGAP2C* die Reifung der dendritischen Dornen verlangsamt und die Wanderung der Nervenzellen fördert, könnte es die Zeit verlängern, in der Umwelteindrücke die Entwicklung des Gehirns prägen.

Außerdem liefern die Befunde von Charrier und ihren Kollegen ein gutes Beispiel dafür, wie sich Hypothesen, die auf Erbgutvergleichen zwischen dem Menschen und anderen Primaten beruhen, mit Untersuchungen an Zellkulturen und Tiermodellen überprüfen lassen. Damit weisen sie den Weg zu einem genaueren mechanistischen Verständnis der Rolle, die nur beim Menschen vorkommende Genverdopplungen für die Gehirnreifung spielen, sowie des Beitrags, den sie zur Evolution unseres Denkkorgans leisten – aber auch zur Entstehung von Erkrankungen, die von einer gestörten Entwicklung des Nervensystems herrühren.

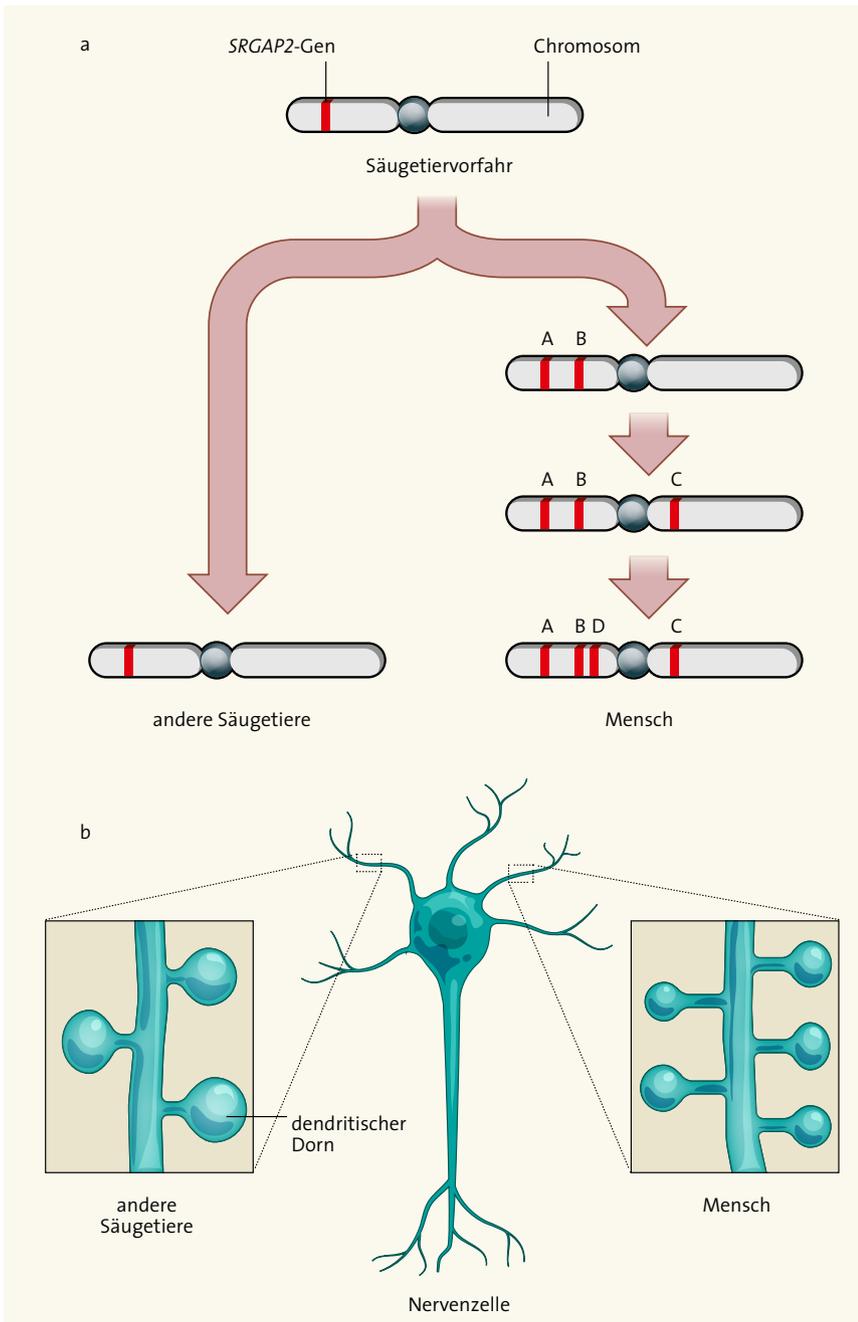
Daniel H. Geschwind forscht in der neurologischen Abteilung der University of California in Los Angeles und **Genevieve Konopka** im neurowissenschaftlichen Department der University of Texas in Dallas.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 486, S. 481–492, 2012

GESCHWIND, D.H., KONOPKA, G.: GENES AND HUMAN BRAIN EVOLUTION. IN NATURE 486, S. 481–492, 2012, FIG. 1



Die ersten Blicke auf das dunkle kosmische Netz

Dunkle Materie durchzieht das Universum wie ein gewaltiges Netzwerk und diktiert der sichtbaren Materie, wo sie sich ansammeln soll. Mit Gravitationslinsen konnten Astronomen diese Vermutung nun erstmals testen.

VON JAN HATTENBACH

Mit dem Universum, meint Ludovic Van Waerbeke, ist es etwa so wie mit der Nachtseite der Erde: »Wenn Sie glauben, die meisten Menschen leben dort, wo auch die meisten Lichter leuchten, liegen Sie falsch.« Zwar sind Europa und Nordamerika nachts die hellsten Kontinente: Die Siedlungsräume ihrer Bewohner, ihre Fernstraßen und Städte sind vom Weltraum aus problemlos zu erkennen. Doch die Mehrzahl der Menschen nennt die Länder Asiens und Afrikas ihr Zuhause – nur machen diese die Nacht nicht mit künstlicher Beleuchtung zum Tag. »Bei der Suche nach der Dunklen Materie haben wir ein ähnliches Problem«, fährt der Astronom von der University of British Columbia im kanadischen Vancouver fort. »Wenn Sie denken, die Dunkle Materie befindet sich hauptsächlich in den Galaxien, also dort, wo Sterne leuchten, liegen Sie möglicherweise ziemlich daneben.«

Immerhin haben die Forscher eine Ahnung, wo sich die Dunkle Materie – jener rätselhafte unsichtbare Stoff, der sich nur durch seine Schwerkraft verrät – wohl aufhält. »Computersimulationen zeigen uns, wie das Universum aussähe, wenn wir die Dunkle Materie wahrnehmen könnten«, erklärt Van Waerbekes Kollegin Catherine Heymans von der schottischen University of Edinburgh. Wie ein gewaltiges Netz erfüllt sie demzufolge den Kosmos. Die Maschen dieses Netzes werden durch Dunkle-Materie-Filamente mit vielen Millionen Lichtjahren Länge gebildet, zwischen denen große Leere herrscht.

Tatsächlich haben Astronomen bei systematischen Kartierungen von Galaxienhaufen bereits zahlreiche solcher riesigen Regionen gefunden, die praktisch keine Materie enthalten. An den

Schnittpunkten der Filamente, den Knoten des Netzes, gibt es jedoch große Masseanhäufungen – genau dort sammelt sich die Dunkle Materie und in Form von Galaxienhaufen darüber hinaus auch die sichtbare Materie an. »Die Dunkle Materie diktiert mit ihrer Schwerkraft, wo und wann sich die Galaxien, die wir sehen, einst bilden konnten«, so Heymans.

Das dunkle Skelett des Kosmos

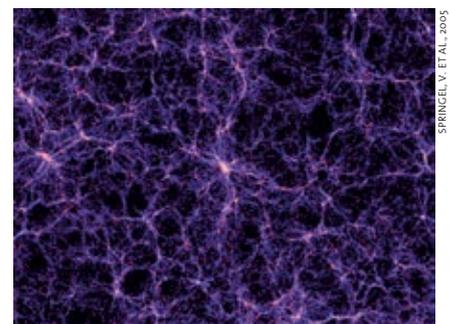
Bislang war all dies Theorie. Nun aber ist es einigen Forschergruppen gelungen, erste verschwommene Blicke auf das dunkle Skelett des Kosmos zu werfen. Auf einer Konferenz der American Astronomical Society präsentierten Heymans und Van Waerbeke schon im Januar 2012 Himmelskarten, die sie mit Hilfe des so genannten Gravitationslinseneffekts gewonnen hatten. Diese Karten zeigen die gemessene Verteilung der gravitativ anziehenden Masse und sehen den Computersimulationen verblüffend ähnlich. Neu war die Skala, auf der die Materieverteilung kartiert wurde, meint Matthias Bartelmann von der Universität Heidelberg: Das untersuchte Raumvolumen durchmisst mindestens einige hundert Millionen Lichtjahre. Am irdischen Himmel überdecken die Karten mehr als 20 Vollmonddurchmesser.

Allerdings bilden sie nicht die gesamte Dunkle Materie ab, schränkt der theoretische Astrophysiker ein: »Die Bilder zeigen vor allem die Verteilung der Maxima in der messbaren Dichteverteilung, die wiederum untereinander korreliert sind, weil sie Knoten desselben kosmischen Netzes sind. Insofern stellen sie das kosmische Netz nicht direkt anhand seiner Maschen dar, sondern angedeutet durch seine Knoten.« Um in Van Waerbekes Bild zu bleiben: Die Kar-

ten zeigen, dass in den hell erleuchteten Städten sehr viele Menschen leben, verzeichnen aber nicht jenen Teil der Bevölkerung, der entlang der Verbindungswege zwischen ihnen lebt.

Wie könnte man auch diese Verbindungen, also die Kanten des Netzes, nachweisen? Glaubt man den Computermodellen, dann bestehen die spinnwebartigen Filamente in ihrer Mehrzahl fast ausschließlich aus Dunkler Materie. Doch Dunkle Materie ist nicht nur dunkel, sondern unsichtbar. Die Forscher vermuten, dass sie sich aus bislang unentdeckten Teilchen zusammensetzt, die weder Licht noch irgendeine andere Form elektromagnetischer Strahlung aussenden oder absorbieren. Den Teilchenphysikern zufolge könnten pro Stunde mehrere Dutzend oder sogar einige hundert von ihnen durch uns hindurchfliegen, ohne dass wir davon Notiz nehmen. Nur über ihre Gravitation teilen sie sich der Außenwelt mit.

Da aber kommt Albert Einstein zu Hilfe, erklärt Jörg Dietrich, Astronom an



SPRINGERL ET AL., 2005

So stellen sich Kosmologen das Universum vor: durchzogen von einem Netzwerk aus Dunkler Materie. Die aus einer Simulation hervorgegangene Darstellung der unsichtbaren Strukturen ist mittlerweile berühmt geworden. Jetzt endlich konnten Astronomen einige der feinen Filamente durch Messungen nachweisen.

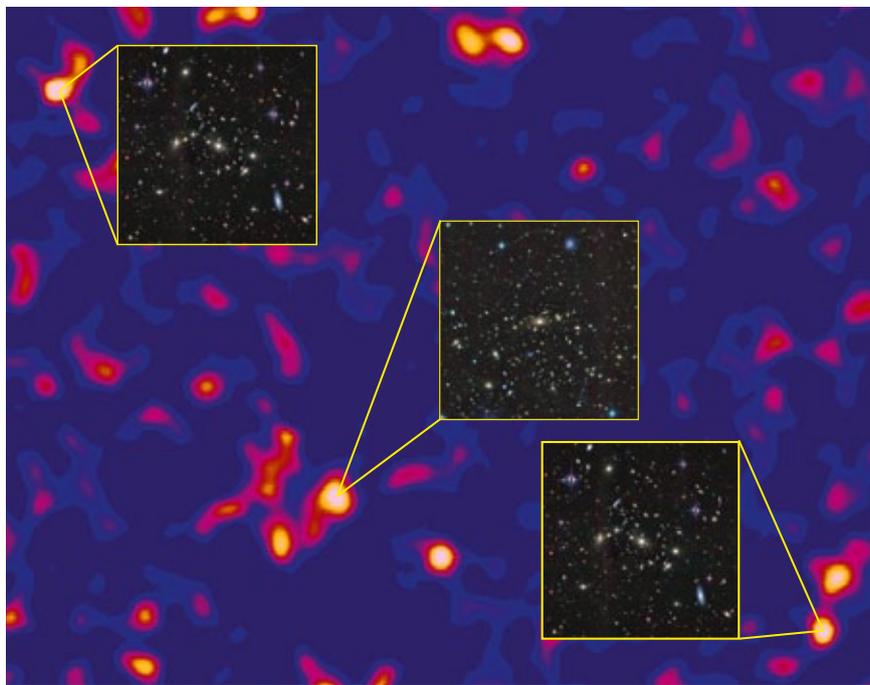
der Universitätssternwarte München: »Das Licht jeder Galaxie im tiefen Universum, die wir beobachten, erscheint in irgendeiner Art und Weise durch die großräumige kosmische Struktur verzerrt.« Denn Masse – egal ob in Form sichtbarer oder Dunkler Materie – verbiegt der allgemeinen Relativitätstheorie gehorchend das Raumzeitgefüge und kann Licht daher wie eine Linse sammeln und es zur Erde lenken. Die »Brechkraft« solcher Gravitationslinsen wächst dabei mit ihrer Masse.

Der durch dunkle Filamente verursachte Effekt ist hingegen kaum wahrnehmbar: »Wir beobachten Verzerrungen, die um Größenordnungen kleiner sind. Die elliptische Gestalt der auf dem Kamerachip nur wenige Pixel großen Hintergrundgalaxien wird durch die Gravitationslinse in eine etwas andere Form transformiert. Den Unterschied erkennt nur ein Computer.« Die ursprüngliche Elliptizität der Sternsysteme müssen die Forscher dabei aus statistischen Untersuchungen erschließen. Anders als Van Waerbeke und Heymans erstellten Dietrich und seine Kollegen keine Weitwinkelaufnahmen, auf denen sich das kosmische Netz nur andeutet, sondern zoomten in eine spezielle Himmelsregion hinein (*Nature* 487, S. 202, 2012).

»Materiebrücke« zwischen Galaxienhaufen

Über 40 000 Hintergrundgalaxien hat sein Team dazu untersucht. Deren Licht passiert auf dem Weg zu uns zwei Galaxienhaufen namens Abell 222 und Abell 223, die etwa 2,5 Milliarden Lichtjahre von unserer Milchstraße entfernt sind und in denen sich jeweils einige tausend Galaxien tummeln. Weil sie wie Gravitationslinsen wirkten, konnten die Forscher die Verteilung der Masse in und um sie herum bestimmen. Dabei entdeckten sie tatsächlich eine unsichtbare, rund 60 Millionen Lichtjahre lange Materiebrücke, die beide Haufen verbindet und deren Masse zu mindestens 80 Prozent aus Dunkler Materie besteht.

Die beiden Galaxienhaufen waren als Studienobjekte sorgfältig ausgewählt



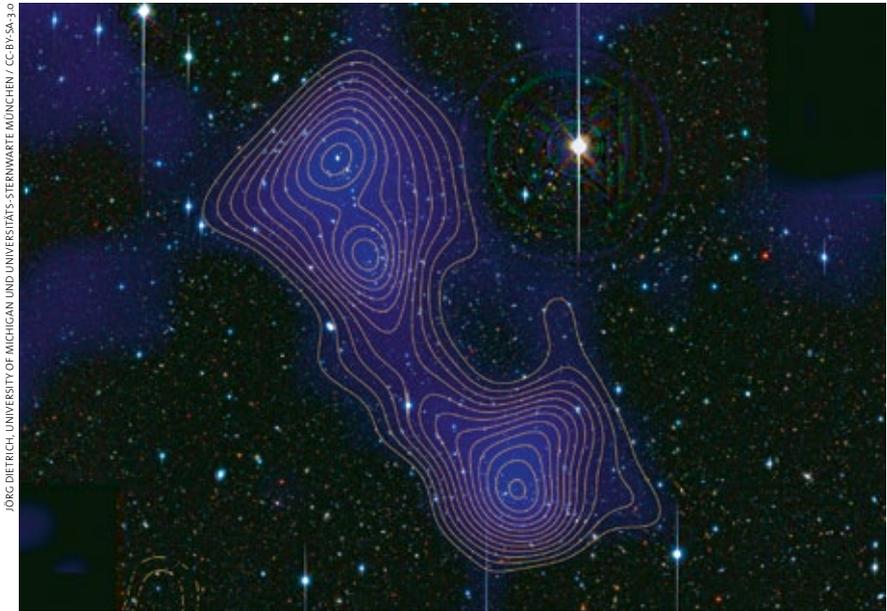
Diese Himmelskarte, die von einem Team um Ludovic Van Waerbeke und Catherine Heymans erstellt wurde, lässt die Knoten des kosmischen Netzes aus Dunkler Materie erahnen. Gelb steht für hohe Massekonzentration, blau für niedrige. Die Bilddiagonale entspricht einer Strecke von etwa einer Milliarde Lichtjahren. Wie die eingesetzten optischen Aufnahmen zeigen (nicht maßstabsgetreu), sind in den Regionen größter Dichte massereiche Galaxienhaufen zu finden.

worden, denn erst ihre spezielle Geometrie machte die Messungen überhaupt möglich: Von der Erde aus gesehen liegen Abell 222 und 223 leicht versetzt hintereinander. Deshalb sehen die Astronomen das sie verbindende Filament in einem sehr spitzen Winkel zu seiner Längsachse. Die in ihm enthaltene Masse summiert sich also auf, was seine Wirkung als Gravitationslinse verstärkt.

Ein einzelnes Filament macht zwar noch kein kosmisches Netz. Doch nur wenige Wochen nachdem die Gruppe um Dietrich ihre Entdeckung veröffentlicht hatte, vermeldete Mathilde Jauzac von der Université d'Aix-Marseille gemeinsam mit Kollegen einen weiteren Erfolg der Gravitationslinsenmethode (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 426, S. 3369–3384, 11. November 2012). Mit einer Vielzahl von Teleskopen konnten die Forscher um Jauzac die dreidimensionale Struktur eines weiteren Filaments ermitteln. Dabei stellten sie Erstaunliches fest: Zwar beginnt die ebenfalls etwa 60 Mil-

lionen Lichtjahre lange Struktur im Zentrum eines sehr massereichen Galaxienhaufens – aber sie endet nicht wie jene zwischen Abell 222 und 223 in einem zweiten. Ungewöhnlich, denn offene Maschen im Netz hatten die Computersimulationen bislang nicht vorhergesagt.

Das wirft eine wichtige Frage auf: Handelt es sich bei den entdeckten Strukturen wirklich um Teile eines größeren, alles umspannenden Netzwerks? Oder sind sie nur Anhängsel ihrer Galaxienhaufen, entstanden etwa bei der Verschmelzung zweier kleinerer Haufen zu einem größeren? Auch die Materiebrücke zwischen Abell 222 und 223 könnte im Prinzip Folge einer Begegnung und Durchdringung beider Galaxienhaufen vor Milliarden von Jahren sein. Überraschend wäre das nicht, denn schon Abell 223 besteht eigentlich aus zwei sich vereinigenden, kleineren Galaxienhaufen. Doch Dietrich ist sicher, dass sich die Haufen niemals begegnet sind – im Gegenteil: Die Beobachtungen



Die beiden Galaxienhaufen Abell 222 und Abell 223 – letzterer besteht aus zwei miteinander verschmelzenden Haufen – sind durch eine etwa 60 Millionen Lichtjahre lange Brücke aus Dunkler Materie (zu Illustrationszwecken blau schattiert) verbunden. Entlang der gelben »Höhenlinien« besitzt die Materiedichte jeweils denselben Wert.

zeigten, dass sie sich infolge der Expansion des Weltalls voneinander entfernen. Demnach handelte es sich also tatsächlich um ein primordiales, also zur Grundstruktur des Kosmos gehörendes Filament. »In ferner Zukunft wird es daher abreißen, auch deshalb, weil immer noch Materie an seinen Enden auf die Galaxienhaufen fällt.«

Dennoch ist Vorsicht geboten: Wann immer Theoretiker eine gute Vorstellung davon zu haben glauben, wie die Natur aussehen könnte, besteht Gefahr, dass Beobachtungen dann passend interpretiert werden. Zudem hat die Gravitationslinsenmethode ihre Grenzen, meint Jörg Dietrich, zumindest wenn man sie vom Erdboden aus anwendet.

Um auch schwächer ausgeprägte Filamente aufspüren zu können, werden neue Weltraumteleskope gebraucht, allen voran das geplante James-Webb-Teleskop, das zum Ende des Jahrzehnts ins All gestartet werden soll. Auch die Frage, was die Wissenschaftler da eigentlich genau erforschen, könnte so allmählich eine Antwort finden: »Zu wissen, wie sich die Dunkle Materie im Universum verteilt, ist eine Voraussetzung zum Verständnis ihrer Natur«, meint Van Waerbeke.

Allerdings stellt sie nicht das einzige große Rätsel dar. Über die Schwester der Dunklen Materie, die den Kosmos erfüllende Dunkle Energie, wissen die Forscher sogar noch weniger. »Wir beobachten im Universum einen gewaltigen, kosmischen Zweikampf: Dunkle Materie gegen Dunkle Energie«, meint Catherine Heymans. »Die eine will sich zu immer größeren Strukturen zusammensetzen, die andere treibt diese Strukturen und den Kosmos als Ganzes immer schneller auseinander.« Immerhin können die Forscher allmählich ein wenig Licht ins dunkle Universum bringen.

Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist in Aachen. Auf seinem Blog »Himmelslichter« unter Scilogs.de schreibt er über alles, was am Himmel passiert.

MEDIZIN

Elektrochemische Neuroprothese für Querschnittsgelähmte

Eine spezielle Form von Lauftraining lässt rückenmarksverletzte Ratten wieder rennen.

VON GERLINDE FELIX

Zumindest für manche querschnittsgelähmte Patienten könnte der Traum, wieder gehen zu können, in einigen Jahren wahr werden – sofern sich die Ergebnisse einer Studie von Wissenschaftlern der ETH Lausanne und der Universität Zürich unter Leitung des

Neurowissenschaftlers Grégoire Courtine auf den Menschen übertragen lassen. Dank seines neuen therapeutischen Ansatzes konnten gelähmte Ratten nach einigen Wochen wieder laufen, Stufen hochklettern und Hindernissen ausweichen. Die bei den Tieren erprobte

Neurorehabilitation besteht aus einer Kombination von elektrochemischer Stimulation und speziellem Lauftraining unter Einsatz eines robotergesteuerten Laufgeschirrs.

Nach kleineren Verletzungen erholen sich Gehirn und Rückenmark oft

wieder. Sind jedoch zu viele Nervenleitungen im Rückenmark durchtrennt oder gequetscht, kann das Gehirn keine Signale mehr zur Region unterhalb der Verletzungsstelle schicken. Normalerweise werden die beschädigten Nervenverbindungen auch nicht repariert. Eine dauerhafte Lähmung ist die Folge. Die Studie der Schweizer Forscher zeigt aber, dass doch Hoffnung besteht – zwar nicht unbedingt auf vollständige Heilung, aber immerhin auf Wiederherstellung der Funktionen (*Science* 335, S. 1182, 2012).

Für ihre Untersuchungen durchtrennten die Wissenschaftler bei zehn Ratten die Hauptleitungsbahnen des Rückenmarks weit gehend. Damit ähnelte die anatomische Situation der von etwa 90 Prozent der gelähmten Patienten. »Innerhalb der Verletzung sind Gewebsbrücken vorhanden, die als Plattform für die neuronale Reorganisation dienen können«, erklärt Courtines Kollegin Janine Heutschi von der

ETH Lausanne. Funktionell liegt allerdings eine komplette Lähmung vor.

Die Rehabilitation der querschnittsgelähmten Ratten erfolgte stufenweise. Normalerweise aktiviert der Hirnstamm über Botenstoffe (Neurotransmitter wie Dopamin und Serotonin) die motorischen Nervenzellen im Rückenmark. Das soll sie in die Lage versetzen, zum richtigen Zeitpunkt Bewegungen des Unterkörpers zu koordinieren. Da bei den Patienten diese Signale vom Gehirn ausbleiben, schläft das Rückenmark sozusagen ein und muss daher erst reaktiviert werden.

Chemischer Cocktail als Wecker

Courtine und sein Team simulierten dafür die Ausschüttung der Botenstoffe, indem sie ihren querschnittsgelähmten Ratten wenige Tage nach der Verletzung einen chemischen Cocktail aus so genannten Monoamin-Agonisten injizierten. Diese Stoffe docken an die Dopamin- und Serotoninrezeptoren der Neu-

rone an – und für das Rückenmark klingelt der Wecker. Etwa fünf bis zehn Minuten später erhöht dann eine elektrische Stimulation die Erregbarkeit des Rückenmarks zusätzlich. Sie erfolgt unterhalb der Verletzungsstellen mittels Elektroden, die in die äußerste Schicht des Rückenmarkkanals implantiert sind. Zusammengenommen liefert diese elektrochemische Aktivierung die Basis für die eigentliche Neurorehabilitation der Ratten. Die findet zunächst auf dem Laufband statt.

Bereits vor drei Jahren, während seiner Zeit an der Universität Zürich, gelang es Grégoire Courtine, bei querschnittsgelähmten Ratten auf einem Laufband Gehbewegungen hervorzurufen. Bei der aktuellen Studie begann das Laufbandtraining eine Woche nach der Rückenmarksverletzung. »Mit dem Training konnten wir die Schaltkreise im Rückenmark unterhalb der Verletzungsstelle intakt halten«, so Janine Heutschi. Da das Rückenmark die

WISSEN, WAS WICHTIG IST – IMMER UND ÜBERALL!

Mit dem Digitalabo von **Spektrum der Wissenschaft**



Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Archiv!

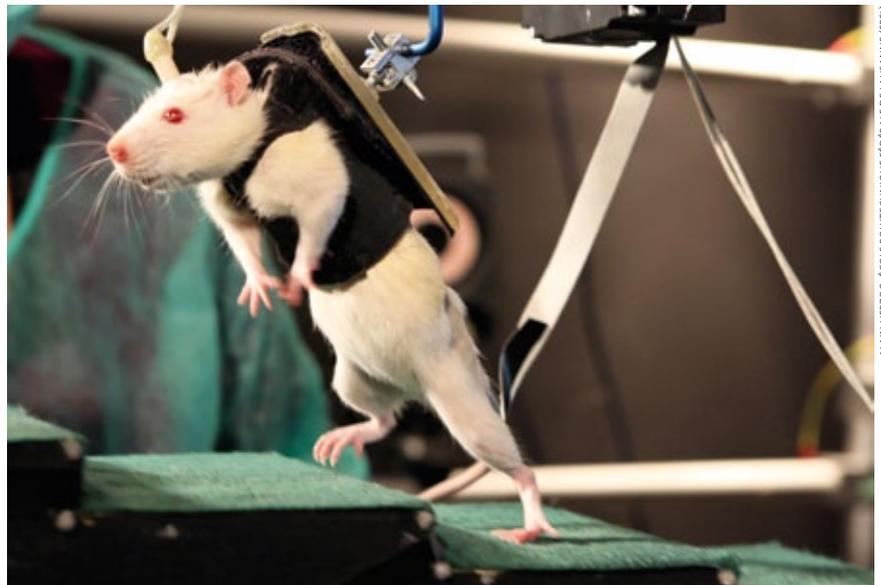
www.spektrum.de/digitalabo

Bewegungen der Beine größtenteils autonom steuern kann, funktioniert Gehen grundsätzlich auch ohne Verbindung zum Gehirn.

Schon nach sieben Tagen Therapie führten die Ratten auf dem Laufband erste unwillkürliche Schrittbewegungen mit ihren Hinterbeinen aus. »Die Beinbewegungen waren jedoch völlig ziellos. Wurde das Laufband abgestellt, konnten sich die Ratten nicht mehr bewegen«, erzählt Courtine. Das Laufband trainiert die autonomen motorischen Schaltkreise im Rückenmark passiv. Offenbar liefert es dabei eine wichtige sensorische Rückmeldung für das koordinierte Bewegen der gelähmten Beine.

Anfangs mussten die Ratten täglich 20 Minuten auf dem Laufband und im Anschluss daran noch zehn Minuten spezielles Training auf festem Untergrund mit einem robotergesteuerten Laufgeschirr absolvieren. Ersteres Training wurde dann nach und nach durch letzteres ersetzt, da das Laufvermögen der Ratten von Tag zu Tag besser wurde und erste willentliche Bewegungen auftraten. »Das Laufgeschirr übt keine Kraft auf die Ratten aus«, erklärt Heutschi. »Aber es ermöglicht den Tieren das Laufen auf den Hinterbeinen, indem es den größten Teil ihres Körpergewichts trägt. Damit wollten wir ausschließen, dass die Vorderbeine Einfluss auf die Bewegung nehmen.«

Nach zwei bis drei Wochen machten die Ratten die ersten selbstständigen Schritte. Eine kleine Sensation – offenbar hatten sich neue Nervenfasern gebildet, die in der Lage waren, die Rückenmarksverletzung zu überbrücken. Deshalb gelangten nun ausreichend starke Signale vom Gehirn zum elektrochemisch angeregten Rückenmark. Aus den ziellosen Bewegungen wurden nach und nach bewusste und willent-



ALAIN HERZOG, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL)

Ratten, deren Hinterbeine auf Grund einer Rückenmarksverletzung gelähmt waren, können nach Training mit Hilfe eines speziellen Laufgeschirrs sogar Treppen steigen.

lich gesteuerte. Fünf bis sechs Wochen nach der Verletzung trugen die Versuchstiere bereits längere Zeit ihr eigenes Körpergewicht: In drei Minuten schafften sie bis zu 21 Meter! Nach zwei bis drei weiteren Trainingswochen, also etwa neun Wochen nach der Verletzung, konnten die Nager mit Hilfe der elektrochemischen Neuroprothese gehen, rennen sowie Stufen und Hürden überwinden.

Schokolade zieht immer

Ganz wesentlich für den Erfolg war die Belohnung. Diese wartete auf die Ratten in Form eines Stückchens Schokolade am Ende der Plattform, die es in den Experimenten zu überwinden galt. Den Tieren lieferte das einen großen Anreiz, sich aktiv zu bewegen.

Ein weiterer Versuch stützte die Annahme, dass eine funktionierende Gewebsbrücke zwischen dem Rückenmark oberhalb der Verletzung und jenem unterhalb für willentlich koordinierte Bewegungen nötig ist und sich infolge des speziellen Lauftrainings gebildet hat. Deshalb zerstörten die Forscher die neu entstandenen Nervenfasern bei den erfolgreich trainierten Ratten mit einem Toxin. Resultat: Eine willentliche Bewegung war nicht mehr möglich, weil dann keine Signale vom Gehirn durchkamen.

Geheilt sind die Ratten zwar nicht, und sie bleiben von der äußeren Stimulation abhängig, aber sie haben eine erstaunliche Bewegungsfähigkeit zurück-erlangt. »Im Unterschied zu den Resultaten anderer Forschungsgruppen sind unserer Tiere in der Lage, anhaltende Bewegungen auszuführen und dabei ihr volles Körpergewicht zu tragen«, sagt Courtine. Er und sein Team hoffen, dass sich die Ergebnisse ihrer Studie auf den Menschen übertragen lassen und ähnliche Rehabilitationstechniken bei ihnen denselben Erfolg erzielen können. »Ich bin zuversichtlich, dass wir bis in zwei Jahren mit Phase-II-Tests an Menschen im Rahmen des europäischen ›NEUWalk‹-Projekts beginnen können«, meint der Forscher. Teilnehmen sollen Personen, die nicht komplett gelähmt sind, also beispielsweise die Zehen noch spüren können. Zuvor gibt es aber eine Reihe Probleme zu bewältigen: »Es wäre wünschenswert, bei der Behandlung querschnittsgelähmter Menschen ganz ohne Botenstoffcocktail auszukommen. Deshalb arbeiten wir daran, die elektrische Stimulation weiter zu verbessern«, erzählt Heutschi.

So denken auch andere Forscher. In den USA stellten vor etwa einem Jahr Reggie Edgerton und sein Team von der

MEHR WISSEN
BEI **Spektrum.de**

Video zu den hier beschriebenen Experimenten:
www.spektrum.de/neurorehabilitation

University of California in Los Angeles einen querschnittsgelähmten Mann tatsächlich für ein paar Minuten auf die Beine – ganz ohne chemischen Cocktail, nur mit elektrischer Stimulation. Das

gibt Anlass zu Optimismus. Selbst nach schweren Verletzungen des Zentralnervensystems liegt offensichtlich ein enormes Potenzial zur Neubildung von Nervenverbindungen vor. Jetzt geht es

darum herauszufinden, wie man es richtig nutzen kann.

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

WALDÖKOLOGIE

Vielfalt statt Fichten

Um dem Klimawandel zu begegnen, müssen die deutschen Wälder neu gemischt werden.

VON KERSTIN VIERING

Brütende Sommerhitze, die man früher allenfalls aus den Regionen rund ums Mittelmeer kannte. Rekordverdächtige Trockenperioden, in denen wochenlang kein Tropfen Regen fällt. Dann wieder tobende Stürme. Und nicht zuletzt gefräßige Insekten, die sich in der Wärme kräftig vermehren. Was die Modelle der Klimaforscher für die Zukunft Mitteleuropas vorhersagen, beunruhigt auch Forstwissenschaftler und Ökonomen.

Jede Baumart hat ihre ganz speziellen Ansprüche beispielsweise an Temperatur und Niederschlag, was sich in ihren heutigen Verbreitungsgebieten widerspiegelt. Anhand von Computersimulationen lässt sich abschätzen, welche Regionen künftig ähnliche Verhält-

nisse bieten könnten. Allerdings hat die Sache einen Haken. Denn noch bergen die Klimamodelle vor allem auf regionaler Ebene große Unsicherheiten. »Kaum jemand zweifelt noch daran, dass es in Mitteleuropa wärmer wird«, versichert Andreas Bolte vom Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei. Der Wissenschaftler, der das Institut für Waldökologie und Waldinventuren in Eberswalde leitet, sieht aber Probleme bei der Einschätzung der künftigen Regenmengen. Generell gehen Klimaforscher zwar davon aus, dass es im Osten Deutschlands im Mittel eher trockener, im Westen dagegen feuchter werden könnte – wobei extreme Trockenphasen in ganz Deutschland zunehmen werden. Doch

mit wie viel Wasser einzelne Regionen genau zu rechnen haben, ist schwer einzuschätzen. »Das ist aber für das Schicksal der einzelnen Baumarten entscheidend«, erklärt Bolte.

Einige Trends zeichnen sich seiner Ansicht nach jedoch trotz aller Unsicherheiten schon ab. Etwa dass die Fichte zu den Verlierern des Klimawandels gehören wird. Denn diesem Nadelbaum dürfte es vielerorts nicht nur zu warm und zu trocken werden: Wegen ihrer flachen Wurzeln ist die Fichte auch anfällig gegenüber Stürmen. Und zu allem Überfluss hat sie auch noch mit dem Borkenkäfer zu kämpfen, der von der Erwärmung profitiert.

Allerdings ist der früher sehr häufig gepflanzte Nadelbaum in Deutschland

ANZEIGE

GEHEIMNISSE VON
**RAUM
& ZEIT**
ENTSCHLÜSSELT!

**JETZT AUF DVD
UND BLU-RAY!**

polyband

www.polyband.de



Nach „Das elegante Universum“ jetzt die neue Serie von **BRIAN GREENE**



Die Dokumentation zum Bestseller von **STEPHEN HAWKING**

Wie weiblich ist die Wissenschaft?

Diskriminierung wird subtiler.

Als Lise Meitner (1878–1968) im Jahr 1907 in Berlin mit dem jungen Chemiker Otto Hahn die Radioaktivität zu erforschen begann, war Frauen das Studieren in Preußen noch generell verboten. Die angehende Physikerin schlich durch den Hintereingang ins Institutsgebäude, durfte die Vorlesungsräume nicht betreten und musste zum Verrichten der Notdurft ein nahe gelegenes Kaffeehaus aufsuchen. Für die Entdeckung der Kernspaltung erhielt Otto Hahn (1879–1968) im Jahr 1944 den Nobelpreis; auch seine langjährige Mitarbeiterin hätte diese Auszeichnung gewiss verdient.

Ein Jahrhundert später haben Frauen, zumindest in den Industrieländern, selbstverständlich freien Zugang zu einer naturwissenschaftlichen Laufbahn – was aber nicht ausschließt, dass Forscherinnen benachteiligt werden. Ob es auch heute noch Diskriminierung gibt, hat kürzlich ein interdisziplinäres Psychologenteam an der Yale University in New Haven (Connecticut) mit einem aufwändigen Experiment untersucht (*Proceedings of the National Academy of Science* 109, S. 16474, 2012).

Insgesamt 127 amerikanische Physik-, Chemie- und Biologieprofessoren erhielten fingierte Bewerbungsunterlagen für eine Stelle als Laborleiter – mit dem einzigen Unterschied, dass die Vornamen der Bewerber entweder »John« oder »Jennifer« lauteten. Wie sich herausstellte, wurde »John« für kompetenter gehalten und bereitwilliger eingestellt als »Jennifer«. Zudem bot man ihm ein im Schnitt um 4000 Dollar höheres Jahresgehalt. Bemerkenswert fanden die Yale-Psychologen, dass Professorinnen sich nicht anders verhielten als ihre männlichen Kollegen: Auch sie bevorzugten »John«.

Zumindest bei der Fachzeitschrift »Nature« zeigte die Studie Wirkung. Deren Redaktion musste sich von Johanna Stadmark und Danile Conley von der Universität Lund (Schweden) obendrein vorrechnen lassen, dass in der »Nature«-Rubrik »News & Views« weibliche Wissenschaftler auffallend selten zu Wort kommen. »News & Views« kommentiert und erklärt die Bedeutung wichtiger Fachartikel im Heft; wer dazu eingeladen wird, erhält gleichsam den Ritterschlag als Koryphäe auf dem betreffenden Gebiet. Unter dem Eindruck der Yale-Studie und der Vorwürfe aus Lund bezichtigte sich die »Nature«-Redaktion selbst des unbewussten »Sexismus« und gelobte, sich künftig jedes Mal zu fragen: »Wo sind die fünf Frauen, die wir einladen könnten?« (*Nature* 491, S. 495, 2012)

Es ist schon erstaunlich, wie hartnäckig sich das Vorurteil hält, Naturwissenschaft sei eine Männerdomäne. Mir ist die Bemerkung eines Physikers unvergesslich, als er mir »seinen« Teilchenbeschleuniger zeigte. Während wir auf einer Empore über dem elliptischen Großgerät standen, wies er mit großer Geste in die Halle und sagte: »Ist das nicht ein tolles Spielzeug für erwachsene Jungen?«

Zwar spielen Physikerinnen kaum weniger gern mit Beschleunigern, nur drängen sich die Männer vor, wenn es um die öffentliche Präsentation der Ergebnisse geht. Den empirischen Beweis dafür trat schon vor einigen Jahren Sherry Towers von der Purdue University in West Lafayette an. Sie untersuchte die Karrieren von promovierten wissenschaftlichen Mitarbeitern – Postdocs – am Fermi National Accelerator Laboratory bei Chicago. Wie Towers herausfand, leisteten die Frauen unter ihnen zwischen 2000 und 2005 zwar wesentlich mehr Wartungsarbeiten und publizierten institutsintern eifriger als ihre männlichen Kollegen, durften aber nur vergleichsweise selten auf öffentlichen Fachtagungen vortragen (*Nature* 452, S. 918, 2008).



Michael Springer

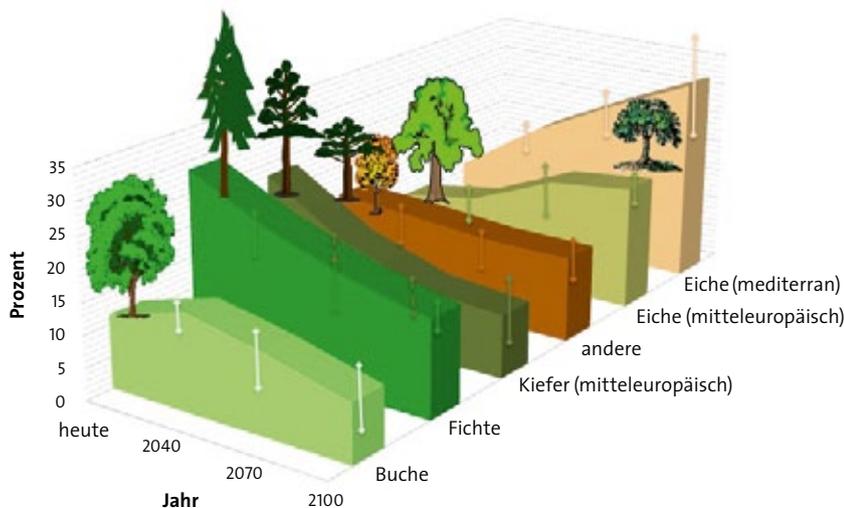
ohnehin längst auf dem Rückzug. Eine bundesweite Waldinventur verzeichnete 2008 noch 2,68 Millionen Hektar mit Fichten bewachsene Flächen. Das war zwar immer noch mehr als bei jeder anderen Baumgattung, doch 200000 Hektar weniger als noch sechs Jahre zuvor. »Man hat Fichtenbestände vielerorts wieder in naturnähere Buchen- und Buchenmischwälder verwandelt«, erklärt Andreas Bolte. Er hält es für wahrscheinlich, dass sich der Trend fortsetzen wird. Sei es, weil die Art das Klima nicht mehr verträgt, sei es, weil Forstwirte es gar nicht erst darauf ankommen lassen und den Anteil weiter reduzieren.

Rückzug in die kalten Gipfelregionen

Auch in anderen Regionen Europas ist diese Entwicklung erkennbar. Ein internationales Forscherteam unter der Leitung von Marc Hanewinkel von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft im schweizerischen Birmensdorf hat kürzlich ausgerechnet, dass die Art bis zum Jahr 2100 einen großen Teil ihrer Verbreitungsgebiete in West-, Mittel- und Osteuropa verloren haben wird. Die Fichte dürfte sich langfristig in den Norden des Kontinents und die höheren Lagen der Alpen zurückziehen.

Zu den Gewinnern des Klimawandels werden derselben Studie zufolge an Trockenheit angepasste Eichenarten wie die Korkeiche und die Steineiche gehören. Diese gedeihen derzeit vor allem im Mittelmeerraum, werden sich aber laut den Modellrechnungen künftig stark nach Norden ausbreiten. Die Forscher haben diese Entwicklung für drei Szenarien des Weltklimarats IPCC durchgerechnet, die von einem unterschiedlich starken Temperaturanstieg ausgehen. Je nach Szenario eignen sich im Jahr 2100 zwischen 21 und 60 Prozent der europäischen Waldfläche nur noch für mediterrane Eichenwälder (siehe Grafik).

Während Naturschützer das Verschwinden monotoner Nadelwälder begrüßen dürften, ist das aus wirtschaftlicher Sicht keine gute Nachricht. Die Nachfrage der Holzindustrie ist nach wie vor hoch, die Fichte wirft Gewinne



Bis zum Ende des Jahrhunderts dürften Eichen, so eine Studie unter Leitung Schweizer Forscher, die dominierende Baumgattung in Mitteleuropa geworden sein.

ab. Je nach Klimaszenario und Zinsniveau könnten die künftigen Waldflächen Europas laut den eidgenössischen Simulationsrechnungen zwischen 14 und 50 Prozent weniger wert sein als heute, das sind bis zu 680 Milliarden Euro. Anders als Landwirte können Förster ihre Wirtschaftsweise nicht Jahr für Jahr neu an die Herausforderungen des Klimawandels anpassen: Die Bäume, die sie heute pflanzen, werden künftige Generationen ernten. Da ist langfristiges Denken gefragt.

Welche Arten werden also in einer wärmeren Zukunft die besten Chancen haben? Vielleicht Exoten, die mit den neuen Bedingungen eher zurechtkommen? Die Douglasie und die Küstentanne etwa, die beide aus Nordamerika stammen, vertragen Trockenheit besser als die Fichte. Erstere wird in Deutschland schon seit den 1830er Jahren angepflanzt und wächst mittlerweile auf etwa zwei Prozent der deutschen Waldfläche. Damit ist die Douglasie sogar die häufigste nicht einheimische Baumart. Sie wächst schnell und liefert auch vielseitig verwendbares Holz beispielsweise für Dachbalken.

Naturschützer sehen den Import von Pflanzen aus anderen Erdteilen allerdings kritisch. Denn solche Neophyten können heimische Arten verdrängen. Auch einige aus Nordamerika stammende Baumarten haben sich in der Hinsicht unbeliebt gemacht. So überwuchert die Robinie die empfindliche

Vegetation von Trockenrasen, die Spätblühende Traubenkirsche bildet in Kiefernwäldern ein so dichtes Unterholz, dass darunter nichts mehr wächst. »Über negative Auswirkungen von Douglasien ist bisher wenig bekannt«, versichert Bolte. Trotzdem plädiert er dafür, den Nadelbaum in ökologisch empfindlichen Regionen gar nicht und sonst nur in Mischkulturen anzupflanzen.

Buchen speisen das Grundwasser

Reine Nadelwälder sind auch aus hydrologischen Gründen für eine wärmere Zukunft nicht empfehlenswert. In Britz bei Eberswalde betreibt das Institut für Waldökologie und Waldinventuren eine Anlage, um den Wasserhaushalt von Waldböden zu untersuchen. Sie besteht aus großen Behältern, in denen Bäume wachsen. So lässt sich messen, wie viel Wasser verschiedene Arten verdunsten und wie viel sie im Boden versickern lassen. Kiefern im Alter von 20 bis 50 Jahren verdunsten demnach fast den gesamten Niederschlag, während Buchenwälder mehr als 20 Prozent des Jahresniederschlags im Boden versickern lassen und so das Grundwasser auffüllen.

Obwohl dieser mitteleuropäische Laubbaum nicht ganz so trockenheitsempfindlich ist wie die Fichte, befürchten Experten, dass der Klimawandel auch ihm zusetzen könnte. »Vielleicht können wir ja Buchen aus heute schon trockeneren Regionen nach Mitteleuro-

pa holen«, meint Bolte. In einem Freilandlabor lassen er und seine Kollegen junge Buchen unterschiedlicher Herkunft mal unter trockeneren und mal unter feuchteren Bedingungen heranwachsen. »So wollen wir herausfinden, ob Bäume etwa aus regenärmeren Gebieten Zentralpolens besser mit einer Dürre zurechtkommen als solche, die aus der Nähe von Hamburg stammen.«

Welche Erbanlagen machen einen Baum fit für den Klimawandel? Unter anderem damit beschäftigt sich ein internationales Projekt namens »Evol-tree«, an dem 23 Forschungsgruppen aus 13 europäischen Ländern mitarbeiten. Beteiligt sind auch Wissenschaftler des Thünen-Instituts für Forstgenetik in Großhansdorf bei Hamburg. »Wichtig wird es zum Beispiel sein, dass ein Baum die Vegetationsperiode möglichst gut nutzen kann«, erklärt Institutsleiter Bernd Degen. Wenn das Frühjahr immer früher beginnt und der Winter dafür länger auf sich warten lässt, sollte die Pflanze ihre Blätter möglichst zeitig austreiben und spät wieder verlieren. Andererseits darf das Laub auch nicht so früh erscheinen, dass es eventuellen Spätfrösten zum Opfer fällt. Auch beim Blühen ist das richtige Timing wichtig. Jeder Baum hat ein genetisches Programm, das ihm sagt, bei welcher Tageslänge er damit beginnen muss. Kommt er aus mediterranen Regionen nach Deutschland, mag er Wassermangel und Sommerhitze vertragen, blüht aber möglicherweise zur Unzeit.

»Den perfekten Baum für alle Ansprüche wird es wohl nie geben«, glaubt Bolte. Er plädiert daher dafür, den Wald der Zukunft möglichst abwechslungsreich zu gestalten. Denn eine bunte Mischung von verschiedenen Arten und von Bäumen unterschiedlicher Herkunft bietet die besten Chancen dafür, dass sich zumindest einige der Gehölze an die neuen Bedingungen anpassen können. Wenn Andreas Bolte sich den deutschen Wald in 100 Jahren vorstellt, sieht er daher nicht nur weniger Fichten, sondern auch mehr Vielfalt.

Kerstin Viering ist freie Journalistin in Lehnin (Brandenburg).

Impfen gegen Allergien

Viele Therapien lindern die Symptome einer Allergie, können sie aber nicht heilen. Nun wollen Forscher durch vorbeugende Impfungen erreichen, dass sich das Leiden erst gar nicht entwickelt.

Von Lauren Gravitz

Anno 1911 versuchte ein britischer Forscher namens Leonard Noon, Heuschnupfen so zu behandeln wie Pocken oder Tollwut. Er fabrizierte aus kleinen Mengen von Graspollen einen »Pollenimpfstoff«, den er Allergikern in sukzessive gesteigerten Dosen injizierte, um Toleranz gegen die Pollen aufzubauen. Seither hat sich aus Noons Impftherapie eine Standardmethode entwickelt, die auf dutzende eingeatmete Reizstoffe zugeschnitten werden kann.

Solche Allergene erzeugen meist die lästigen Symptome des Heuschnupfens: Niesen, laufende Nase, Nebenhöhlenbeschwerden. Wer gegen Pollen, Schimmel oder Hausstaubmilben allergisch ist, hat heute immerhin etwas bessere Chancen als zu Noons Zeiten. In leichteren Fällen verschaffen rezeptfrei erhältliche Antihistaminika Linderung, während bei stärkerer Allergie verschreibungspflichtige Kortikosteroide die entzündeten und geschwollenen Schleimhäute beruhigen. Die schwersten Fälle werden auch heute noch mit Allergeninjektionen oder einer Kombination aller genannten Mittel behandelt. Dabei muss bis zu zweimal pro Woche geimpft werden, und das über drei bis fünf Jahre hinweg, damit die

Wirkung anhält. Doch selbst diese aufwändige Therapie bleibt bei bis zu 25 Prozent der Patienten unwirksam.

Die Allergene können außer Heuschnupfen aber auch eine ernstere Erkrankung hervorrufen: das allergische Asthma. Der Zusammenhang ist noch unklar; man weiß nur, dass aus starken Allergien manchmal akutes Asthma entsteht, das im Krankenhaus behandelt werden muss und in seltenen Fällen sogar zum Tod führt. Wie Heuschnupfen lässt sich auch Asthma oft mit heutigen Medikamenten behandeln – doch jedem vierten Allergiker bleibt nichts anderes, als zu hoffen, dass bald ein Mittel auf den Markt kommt, das auch ihm hilft.

Bedrohliche Atemwegsverengung

Eigentlich sind Pollen und andere inhalierbare Allergene harmlos, aber bei gut 20 Prozent der Weltbevölkerung lösen sie im Immunsystem Alarm aus. Es kommt zur Aktivierung und Vermehrung einer Gruppe weißer Blutkörperchen namens Typ-2-Helferzellen. Diese Th2-Zellen setzen eine Signalkaskade in Gang, die schließlich zur Überproduktion von Antikörpern der Immunglobulinklasse E (IgE) führt – und das wiederum zu Reizungs- und Entzündungsprozessen. Im günstigeren Fall entwickeln sich daraus die typischen Symptome des Heuschnupfens. Bei Asthma verändern sich durch die Entzündung und andere unbekannte Faktoren – möglicherweise genetische Veranlagung – die Atemwege, die sich dann bei Kontakt mit einem Allergen bedrohlich verengen.

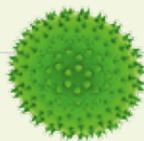
Die meisten Heuschnupfentherapien variieren den von Noon vor 100 Jahren erprobten Weg zur Immuntoleranz. Die Methode setzt dort an, wo Allergien entstehen: am adaptiven Immunsystem, das sich entwickelt hat, um fremde Antigene wiederzuerkennen und anzugreifen. Bei Allergien der Atemwege überreagiert das adaptive Immunsystem, sobald ein Antigen auftaucht, für das es sensibilisiert ist – etwa Schimmelpilze, Katzenhaare oder Blütenpollen. Eine jahrelange Serie von Injektionen mit wachsenden Mengen von Allergenextrakt kann das Immunsystem allmählich zur Toleranz erziehen und ihm abgewöhnen, auf jeden Kontakt offensiv zu reagieren.

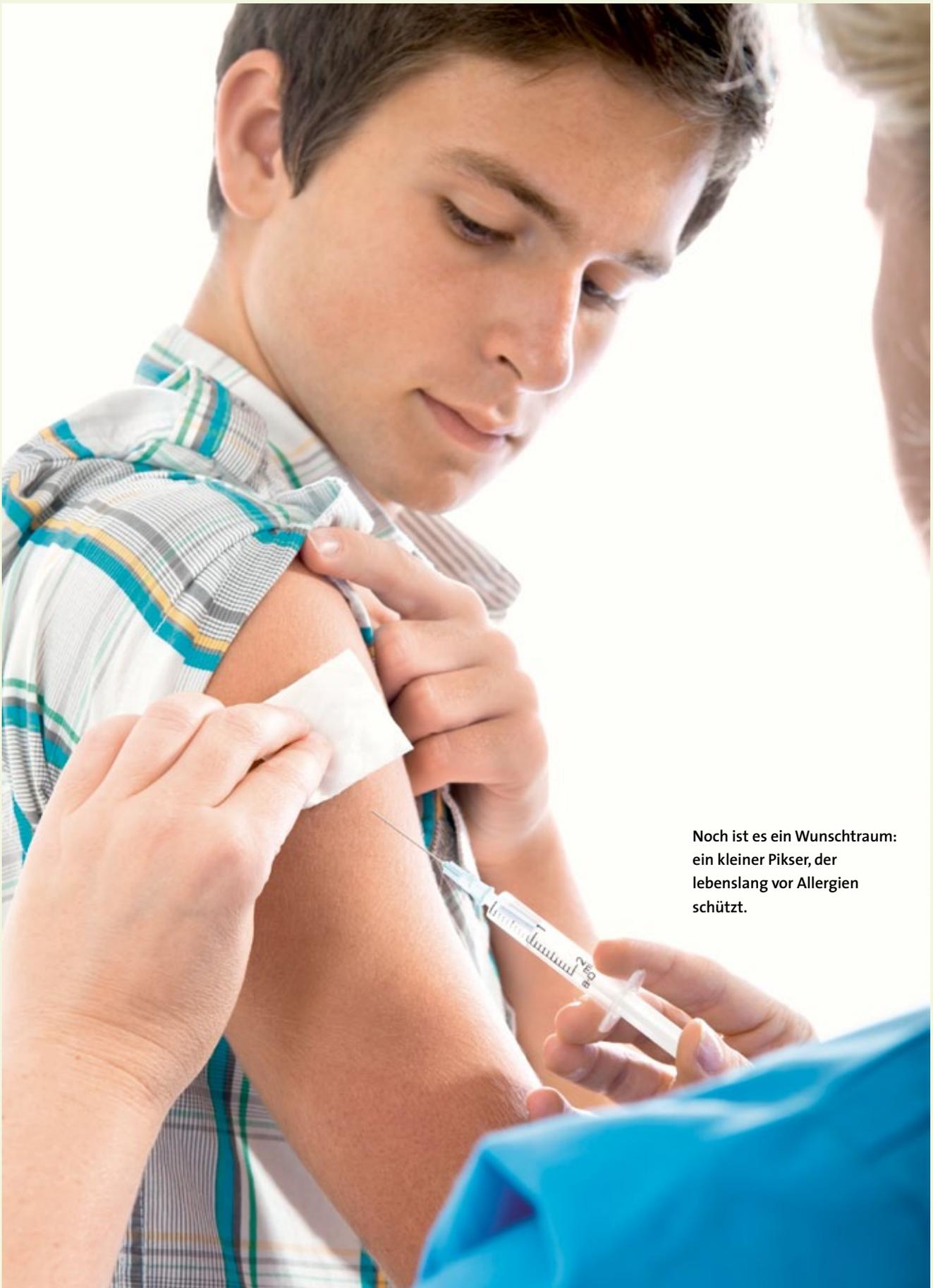
Dieses Verfahren hat jedoch viele Nachteile. Die Spritzen wirken nicht immer und erst nach längerer Zeit, und sie bergen ein gewisses Risiko – immerhin wird dem Patienten just

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

ALLERGIEN – GEISSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

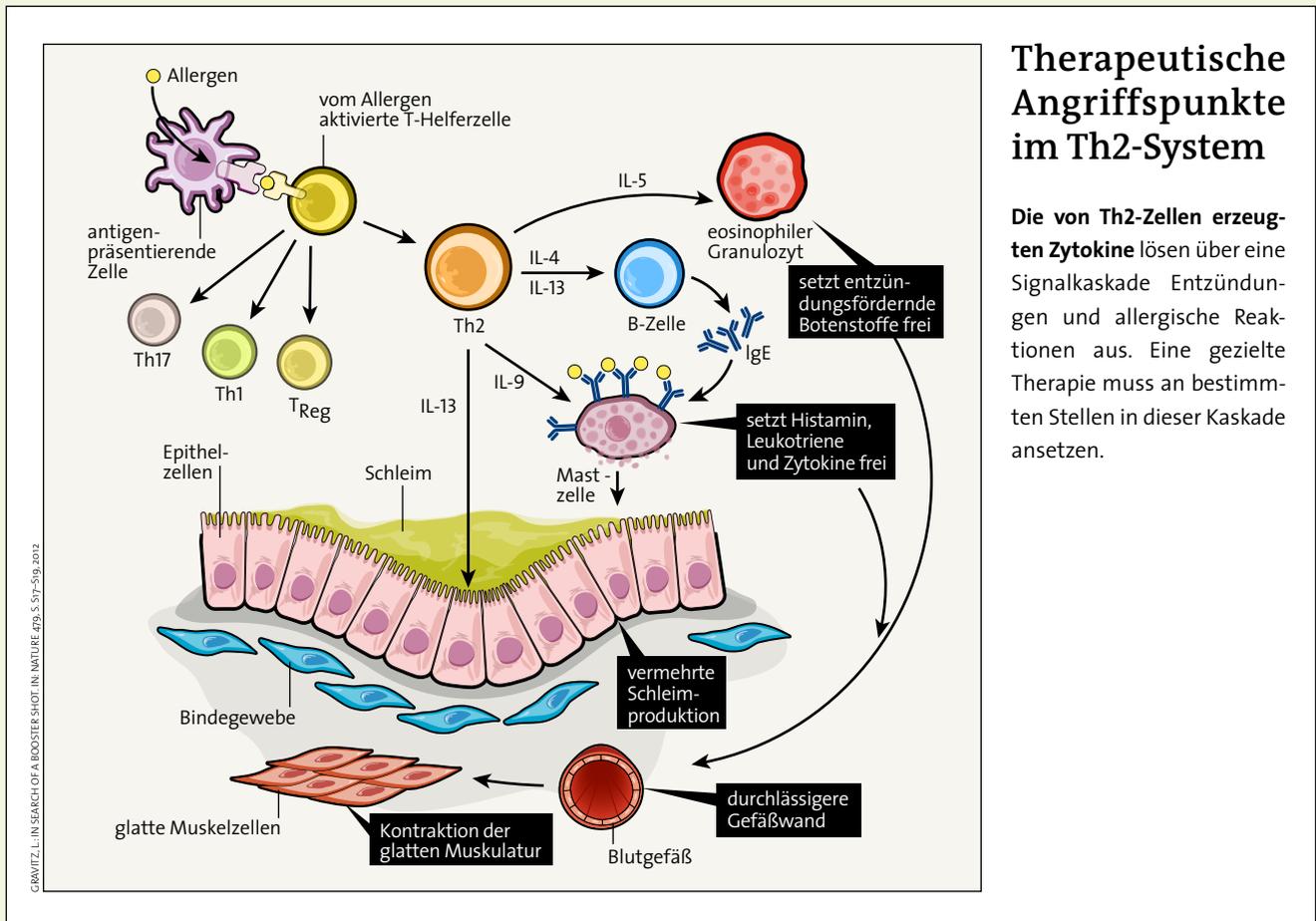
- | | | |
|--------|--|---------------|
| Teil 1 | ▶ Eine Allergikerkarriere
▶ Allergien auf dem Vormarsch
▶ Wenn im Essen der Tod lauert
▶ Was tun gegen Neurodermitis? | Dezember 2012 |
| Teil 2 | ▶ Aus dem Bauch heraus
▶ Blick ins Erbgut
▶ Risse in der Mauer | Januar 2013 |
| Teil 3 | ▶ Impfen gegen Allergien
▶ Der Mensch im Zentrum
▶ Frischer Wind in der Asthmaforschung | Februar 2013 |
| Teil 4 | ▶ Der Sinn allergischer Reaktionen
▶ Wohin geht die Forschung? | März 2013 |





Noch ist es ein Wunschtraum:
ein kleiner Pikser, der
lebenslang vor Allergien
schützt.

DREAMSTIME / ALEXANDER KATHIS



die Substanz injiziert, gegen die er allergisch ist. »Eigentlich ist das eine mittelalterliche Methode«, meint Mark Larché, Allergologe an der McMaster University in Hamilton (kanadische Provinz Ontario). »Wir mixen noch immer Cocktails von Extrakten zusammen und spritzen sie den Patienten. Auf der einen Seite versuchen wir, mit einer Art Hexengebräu die Krankheit zu lindern, auf der anderen Seite leiden die Menschen unter schrecklichen allergischen Reaktionen.«

Mitunter versagen die Cocktails, weil bestimmte Antigene fehlen. »Die Menschen sind nicht nur gegen ein einziges Allergen von Hausstaubmilben allergisch; oft sind bis zu 20 im Spiel«, sagt Larché. Zwar versuchen die Hersteller, ihre Extrakte zu standardisieren, doch das ist ein schwieriges Unterfangen. »Studien haben gezeigt, dass manchmal die wichtigsten Antigene fehlen«, erläutert der Forscher. Er hat 2006 die britische Biotechnologiefirma Circassia mitgegründet, um die Trefferquote zu erhöhen.

Circassia arbeitet bereits an einer zweiten Generation von Allergieimpfstoffen und nähert sich der Zulassung ihrer Produkte. Man versucht spezifische Teile des Antigens, auf welche die T-Zellen reagieren, so genannte Epitope, zu identifizieren. Statt das gesamte Allergen aus Pollen oder Milbenkot zu extrahieren, fabriziert die Firma synthetische Versionen der Epitope, die sich zu einem Präparat mit genau reproduzierbarer Zusammensetzung kombinieren lassen. »Wir können garantieren, dass jede Charge die gleiche Menge synthe-

tischer Epitope enthält«, betont Rod Hafner, stellvertretender Leiter der Forschung und Entwicklung bei Circassia. »Und weil wir Epitope verwenden, die nicht mit IgE-Antikörpern wechselwirken, lösen sie auch keine Überreaktion des Immunsystems aus. Zudem tritt die Wirkung schneller ein und hält viel länger an.«

Circassia entwickelt Präparate für vier besonders häufige Reizstoffe: Katzenhaare, Beifuß-Traubenkraut, Hausstaubmilben und Graspollen. Anscheinend genügen bei Katzenallergien vier Injektionen im Monatsabstand, damit mindestens ein Jahr lang keine Symptome auftreten. Das Unternehmen beginnt beim Präparat gegen Katzenallergie mit den klinischen Tests der Phase III und möchte 2015 die Marktzulassung erreichen. Ein Jahr später sollen die Tests des Traubenkrautpräparats folgen.

Rudolf Valenta, Allergologe an der Medizinischen Universität Wien, verfolgt einen anderen Ansatz. Auch er möchte genau definierte synthetische Impfstoffe herstellen, doch lässt er sich dabei von der individuellen Diagnose leiten. Valentas Team hat eine Allergenbibliothek mit DNA-Fragmenten verschiedener Antigene entwickelt, die auf einen Proteinchip platziert werden. Anhand eines einzigen Tropfens Blut kann der Chip sofort feststellen, gegen welche Moleküle der Patient allergisch ist. »Das Schöne ist: Binnen weniger Minuten lässt sich das gesamte Reaktionsprofil eines Patienten für hundert Allergiekomponenten bestimmen«, erklärt Valenta.

Er und seine Kollegen verwenden diese Daten, um so genannte rekombinante Hypoallergene herzustellen. Dazu schneiden sie aus einem allergenen Protein diejenigen Peptide aus, die keine Immunreaktion provozieren, und heften sie an Trägermoleküle, die vom Hepatitis-B-Virus stammen. Wenn diese Hypoallergene injiziert werden, lösen sie nicht die Produktion von IgE aus, sondern die eines anderen Antikörpers namens IgG. Der hindert IgE daran, sich an Mastzellen zu binden, und bewahrt dadurch den Patienten vor einer allergischen Reaktion. »Im Versuch haben wir die Komponenten des Impfstoffs auf die Haut von Patienten aufgetragen und keinerlei Reaktion beobachtet«, berichtet Valenta. Damit besteht Aussicht auf nebenwirkungsfreie Impfstoffe.

Letztlich schwebt Valenta ein ganzes System vor, in dem ein Proteinchip das gesamte Allergieprofil des jeweiligen Patienten bestimmt, worauf eine Serie von Impfstoffen auf dessen spezielle Sensibilität zugeschnitten wird. Vorläufig arbeitet das Team noch an einzelnen Allergien. Zusammen mit der in Wien ansässigen Biotechnikfirma Biomay plant Valenta eine dreijährige klinische Studie der Phase II, um ein Präparat zu testen, das aus vier verschiedenen Graspollenantigenen besteht.

Vorbeugen gegen Asthma

Immer mehr Studien zeigen, dass Kinder, die an Heuschnupfen leiden, ein erhöhtes Risiko haben, auch an allergischem Asthma zu erkranken. Warum, ist unklar. Einer plausiblen Hypothese zufolge schädigen überaktive, von inhalierten Allergenen stimulierte Immunzellen die Schleimhaut und die glatten Muskelzellen in den Bronchien. Diese regenerieren sich nicht mehr normal, wodurch die Atemwege zu Entzündung und Verengung neigen – vor allem, wenn das Immunsystem erneut den ursprünglichen Allergenen ausgesetzt wird.

Darum fragen sich manche Wissenschaftler, ob es nicht möglich wäre, die Entstehung des Asthmas von vornherein

AUF EINEN BLICK

MASSGESCHNEIDERTE THERAPIE

1 Die **Ursachen von Allergien** sind so vielfältig wie der komplizierte Aufbau des **Immunsystems**, das bei Allergikern auf an sich unschädliche **Umweltreize** überreagiert.

2 Bislang versuchen Mediziner, die Symptome durch Medikamente wie **Antihistaminika** oder **Kortikosteroide** zu lindern. Alternativ zielen sie darauf ab, Patienten durch Gabe geringer Mengen allergener Substanzen weniger empfindlich zu machen (**Desensibilisierung**). Einige Patienten profitieren jedoch nicht von solchen Therapien.

3 **Moderne Therapieansätze** versuchen, bereits vor Ausbruch der Allergie dagegen zu **impfen**. Dabei zielen sie auf bestimmte Punkte in der **Signalkaskade** des Immunsystems, um insbesondere schwerem Asthma vorzubeugen oder den Erkrankten zumindest besser zu helfen.

zu verhindern. Man müsste die besonders gefährdeten Kinder herausfinden und eingreifen, bevor der Vorgang irreversibel wird. Christian Möller von der Universität Umeå (Schweden) leitete eine Langzeitstudie, an der 117 Kinder mit Pollenallergie im Alter von sechs bis 14 Jahren teilnahmen. Die Hälfte wurde drei Jahre lang gegen Gras- und Birkenpollenallergie geimpft; die übrigen erhielten ein Placebo. Nach sieben Jahren stellten die Forscher fest, dass die Kinder der desensibilisierten Gruppe nur etwa halb so häufig Asthma entwickelten wie die der Kontrollgruppe. Das bestätigt die Hypothese, dass eine frühe Heuschnupfentherapie dem Asthma vorbeugen kann.

Eine ähnliche vierjährige Untersuchung, die Ende 2011 abgeschlossen wurde, sollte klären, ob die Vorsorge noch früher beginnen kann. Der Immunologe Patrick Holt von der University of Western Australia in Perth beobachtete Kleinkinder im Alter von 18 bis 30 Monaten, die erste Anzeichen allergischer Erkrankungen zeigten. Sie bekamen ein Jahr lang täglich we-

ANGRIFFSPUNKT	WIRKMECHANISMUS	BEISPIEL
IMMUNGLOBULIN E	IgE steigert die Aufnahme von Allergenmolekülen in antigenpräsentierende Zellen und veranlasst das Immunsystem zum Angriff gegen das Allergen. Gegen IgE gerichtete Therapien verhindern die Bindung von IgE an antigenpräsentierende Zellen.	Omalizumab (Novartis) Lumiliximab (Biogen Idec) Impfstoff gegen IgE (Pfizer, United Biomedical)
MASTZELLEN	Mastzellen setzen Histamin, Zytokine und andere Immunmediatoren frei, welche die Gefäße und glatten Muskelzellen der Bronchien verändern, die Schleimproduktion steigern und weitere entzündungsaktive Zellen heranlocken. Die Blockade der Mastzellfunktion soll das verhindern.	R343 (Rigel)
TH2-ZYTOKINE (ETWA IL-4, IL-5, IL-13)	Von Th2-Zellen produzierte Zytokine verursachen allergische Entzündungsprozesse. Mehrere Therapieansätze zielen auf spezifische Interleukine, um den Th1-Spiegel auf Kosten von Th2 zu steigern.	Mepolizumab (GlaxoSmithKline) MEDI-528 (Medimmune) IL-13 MAB (GlaxoSmithKline)
TOLL-ÄHNLICHE REZEPTOREN (TLR9 UND ANDERE)	TLRs regulieren unterschiedliche Aspekte der Immunantwort. Die Stimulation des geeigneten TLR soll zu einem günstigeren Verhältnis von Th1- zu Th2-Zellen führen.	CYT003-QbG10 (Cytos Vaccine) IMO-2134 (Idera Pharmaceuticals)

nige Tropfen einer Mischung von Milben-, Katzenhaar- und Graspollenextrakten unter die Zunge geträufelt. »Das ist keine Immuntherapie, denn die Kinder waren noch nicht sensibilisiert«, erläutert Holt, der die Abteilung für Zellbiologie am Telethon Institute for Child Health Research seiner Universität leitet. »Wir wollten ihre Schleimhäute gängigen Allergenen aussetzen, um die Toleranz gegenüber solchen Umweltreizen zu fördern. Das ist ein natürlicher Vorgang, durch den das Immunsystem der Sensibilisierung entgeht.«

Die Signalkaskade unterbrechen

Hat sich allergisches Asthma erst einmal entwickelt, ist es schwer zu bändigen. Wenn die Behandlung mit Kortikosteroiden wie in einem Viertel aller Fälle versagt, gibt es nur wenige Alternativen. Das liegt zum Teil daran, dass Ursache und Symptomatik der Krankheit noch immer nicht genau bekannt sind. Offenbar stellt Asthma kein einheitliches Leiden dar, sondern besteht aus einer Gruppe ähnlicher Symptome, hinter denen sich ganz unterschiedliche Ursachen verbergen. »Asthma ist ein Sammelsurium«, betont Sally Wenzel, Leiterin des Asthmainstituts am University of Pittsburgh Medical Center. »Die Definition ist unglaublich vage gefasst.«

Während die Therapie bei Heuschnupfen auf Immuntoleranz abzielt, folgt die Behandlung des allergischen Asthmas eher dem Prinzip der Immunmodulation: Es gilt, die Signalkaskade zu unterbrechen, die zu einem Überschuss an IgE-Antikörpern führt. »Allmählich gewinnen wir ein viel umfassenderes Bild der immunologischen Vorgänge. Die Hoffnung mag trügen, aber jedenfalls erleben wir eine aufregende Phase in diesem Forschungszweig«, kommentiert Roberto Solari, Leiter der Abteilung für Biologie der Atemwege bei der Firma GlaxoSmithKline (GSK) in London.

Je besser die Forscher die Immunkaskaden und die daran beteiligten Zellen verstehen, desto präziser können sie eingreifen. Einige Ansätze zielen auf die Spitze der Kaskade: Sie verändern den Anteil der verschiedenen T-Helferzellen an den weißen Blutkörperchen, da diese unterschiedliche Arten von Immunreaktionen anstoßen. Durch Fördern der Th1-Immunantwort hofft man die für Allergien verantwortliche Th2-Aktivität zu hemmen. Dieser Ansatz hat jedoch Nachteile, erläutert Thomas Casale, Leiter der Abteilung für Allergie und Immunologie an der Creighton University in Omaha (Nebraska): »Wenn man so weit oben in der Kaskade ansetzt, beeinflusst man wahrscheinlich auch andere lebenswichtige Prozesse, erhöht die Infektionsanfälligkeit und senkt die Widerstandskraft.« Daher haben andere Forscher tiefere Punkte der Kaskade im Blick: Sie versuchen Th2-Produkte wie die Interleukine IL-4, IL-5 und IL-13 zu eliminieren, die Entzündungen auslösen. Manche wollen sogar das Kaskadenende treffen und spezielle weiße Blutkörperchen wie die eosinophilen Granulozyten ausschalten – oder die IgE-Antikörper selbst.

Das einzige Medikament auf dem Markt, das direkt an IgE angreift, ist ein monoklonaler Antikörper namens Omalizumab, der 2003 in den USA zugelassen wurde. Allerdings hilft er nur in rund einem Drittel der hartnäckigen Asthma-

fälle, bei denen der IgE-Spiegel in einem schmalen Bereich liegt. Zwar wirkt er offenbar auch gegen Heuschnupfen, doch dafür sind die Behandlungskosten mit mehr als 20 000 Dollar pro Jahr viel zu hoch. »Heuschnupfen ist zwar weit verbreitet, bringt einen aber nicht um«, bemerkt Casale.

Auf Omalizumab werden wohl noch viele Medikamente folgen, die auf bestimmte Subtypen des allergischen Asthmas zugeschnitten sind. Kombipräparate, die mehrere Moleküle der Th2-Kaskade ansprechen, durchlaufen derzeit verschiedene Phasen klinischer Prüfung. Die von Th2-Zellen freigesetzten Interleukine fördern unterschiedliche Komponenten des Entzündungsprozesses, und insbesondere zwei davon, IL-5 und IL-13, erweisen sich als viel versprechende Angriffspunkte. Die Firma GSK hat 2010 eine Phase-III-Studie mit dem gegen IL-5 gerichteten Wirkstoff Mepolizumab abgeschlossen. Doch all das wird nur einer kleinen Untergruppe von Asthmakranken helfen. Patienten, deren Lunge mit eosinophilen Granulozyten verschleimt ist, profitieren offenbar von einer Therapie, die an IL-5 ansetzt, während bei Kranken mit hoher Konzentration des Proteins Periostin im Blut eher eine gegen IL-13 gerichtete Behandlung greift.

»Früher haben wir jedes Asthma mit traditionellen Medikamenten behandelt. Doch künftig müssen wir die Erkrankung besser definieren, die Patienten genauer unterscheiden und ihnen gezielte Therapien anbieten«, meint Roberto Solari von GSK. »Das ist die Aufgabe der Medizin im 21. Jahrhundert.« ~

DIE AUTORIN



Lauren Gravitz ist freie Wissenschaftsjournalistin. Sie lebt in Los Angeles (Kalifornien).

QUELLEN

- Casale, T.B., Stokes, J.R.:** Future Forms of Immunotherapy. In: The Journal of Allergy and Clinical Immunology 127, S. 8–15, 2010
- Holgate, S.T., Polosa, R.:** Treatment Strategies for Allergy and Asthma. In: Nature Reviews Immunology 8, S. 218–230, 2008
- Holt, P. et al.:** Drug Development Strategies for Asthma: In Search of a New Paradigm. In: Nature Immunology 5, S. 695–698, 2004
- Jacobsen, L. et al.:** Specific Immunotherapy Has Long-Term Preventive Effect of Seasonal and Perennial Asthma: 10-Year Follow-up on the PAT Study. In: Allergy 62, S. 943–948, 2007
- Niespodziana, K. et al.:** A Hypoallergenic Cat Vaccine Based on Fel d 1-Derived Peptides Fused to Hepatitis B PreS. In: The Journal of Allergy and Clinical Immunology 127, S. 1562–1570, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178924

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 479, S. 517–519

NICHTS BRINGT SIE SO NAH HERAN WIE IHRE GANZ PERSÖNLICHE EXPEDITION

Begegnen Sie den schönsten Arten der Schöpfung auf spektakulären Routen im kleinen Kreis von Entdeckern. Auf echten Expeditionsschiffen mit höchstem Komfort.

MS HANSEATIC · MS BREMEN
EXPEDITIONSKREUZFAHRTEN

Antarktisfilm
starten:



Hapag-Lloyd
Kreuzfahrten

Große Momente. Ganz exklusiv.

Mehr im Reisebüro • oder 0800 2255556 (gebührenfrei) • www.hlkf.de/expedition

Der Mensch im Zentrum

Neue Medikamente gegen Asthma und Allergien enttäuschen allzu oft. Forschung und Behandlungsschemata müssten sich stärker an den unterschiedlichen genetischen Profilen von Patienten ausrichten.

Von Stephen Holgate

Seit der Antikörper Immunoglobulin E (IgE) vor bald 50 Jahren entdeckt wurde, konnten Forscher eine Menge über das Verhalten und die Funktionen dieses komplexen Moleküls herausfinden. IgE spricht auf unzählige zelluläre und molekulare Strukturen an und löst daraufhin Entzündungen aus. Bei Allergien spielt es eine tragende Rolle. Man sollte erwarten, die vielen wissenschaftlichen Erkenntnisse über dieses wichtige Immunglobulin würden sich in neuen medizinischen Behandlungs- und Vorbeugekonzepten für Allergien und Asthma niederschlagen. Doch leider ist das nicht der Fall – die Fokussierung auf IgE erzielte nicht den erhofften Durchbruch. Dabei bräuchten wir gerade angesichts der weltweit dramatisch steigenden Erkrankungen in diesem Bereich dringend bessere Medikamente.

Ein Grund für die unbefriedigende Situation ist, dass Arzneimittelforscher, die für diese Leiden neue Wirksubstanzen entwickeln und erproben, sich bisher weitgehend auf Tiermodelle stützen. Im Übrigen hat die Pharmaindustrie bei der Suche nach besseren Allergiewirkstoffen bislang hauptsächlich Asthma im Blick. Das Gros aller neuen Asthmamittel, die gegen allergiebedingte Entzündungen der Lungen helfen sollen, wird an Mäusen getestet, in geringerem Maß auch an Affen. Bei diesen Tiermodellen für akutes oder chronisches Asthma tritt in den Lungen zwar eine starke Immunantwort durch die so genannten T-Helferzellen Typ 2 (Th2) auf. Nur –

ihnen fehlen die vielen anderen inzwischen erkannten Hintergründe für Asthma beim Menschen, darunter genetische Veranlagung, Virusinfekte, Luftschadstoffe oder auch Medikamente wie Azetylsalicylsäure (der Wirkstoff von Aspirin) und Paracetamol.

Um Nagetiere für Asthma zu sensibilisieren, verwendet man üblicherweise Ovalbumin. Dieses Protein aus Eiklar ist jedoch kein natürliches Allergen der Atemluft. Es stimuliert die so genannten dendritischen Immunzellen, die dem Immunsystem Allergene zeigen, nicht auf die gleiche Weise wie etwa Hausstaubmilben oder Pollen, die beim Menschen Asthma auslösen.

Konventionell behandeln Ärzte bei Allergien hauptsächlich die Symptome. So verschreiben sie bei Heuschnupfen, Nahrungsmittelallergien und Hautreizungen H1-Antihistaminika, bei Kreislaufschock Adrenalin und bei Asthma β_2 -Sympathomimetika. Entzündungen unterdrückt man mit Kortikosteroiden. Zwar werden auch diese Medikamente immer noch verbessert, aber an neuen Wirkansätzen für Asthmamittel gibt es nur zwei: Leukotrieninhibitoren (etwa Montelukast/Singulair) und bei bestimmten Voraussetzungen Antikörper gegen IgE (Omalizumab/Xolair). Deren molekulare Angriffspunkte wurden allerdings schon vor über 40 Jahren identifiziert.

Enttäuschend verliefen hingegen therapeutische Studien an Patienten mit vielen anderen speziell gegen Asthma entwickelten oder hergestellten Substanzen, die auf T-Zellrezeptoren, Zytokine, Chemokine, Adhäsionsmoleküle oder Entzündungsmediatoren abzielten. Dabei hatten diese Substanzen in Zellkulturen und auch im Tierversuch ganz gut funktioniert, ebenso anscheinend in gewissem Grad bei leichtem allergiebedingtem Asthma. Doch gerade von den Patienten mit schwererem Asthma sprachen nur kleinere Teilgruppen überhaupt darauf an.

Die meisten Ansätze für neue Wirkstoffe richten sich gegen das Th2-System. Jedoch zeigte die Genexpression von Zellen des Lungenepithels, dass dieser Typ von Immunzellen wohl nur bei der Hälfte der Patienten eine wichtige Rolle spielt. Tatsächlich ist inzwischen sogar fraglich, ob Asthma

AUF EINEN BLICK

WUNSCH NACH MEHR STUDIEN AM MENSCHEN

1 Neue Allergie- und Asthmawirkstoffe werden an hergebrachten **Tiermodellen** getestet. Die sind in mancher Hinsicht unzureichend, weil sie die **Krankheitsprozesse** bei Patienten nur begrenzt widerspiegeln.

2 Die **Entwicklung neuer Medikamente** sollte stärker auf den Menschen ausgerichtet sein. Vor allem brauchen die Kranken **individuell auf sie abgestimmte Wirkstoffe**.



Damit neue Medikamente helfen, müssten Therapien zukünftig viel stärker an die individuellen Voraussetzungen des Einzelnen angepasst werden. Molekulare Tests an Patienten auf bestimmte Biomarker könnten dafür eine Grundlage sein.

wirklich primär eine Allergie ist. Möglicherweise stehen oft Störungen der angeborenen Immunität dahinter, die für Allergien anfällig machen.

Zukünftig wäre wichtig, Asthma nicht als eine einzige Erkrankung zu begreifen, sondern vielmehr Subtypen mit verschiedenen Hintergründen zu unterscheiden. Damit das gelingt, sind entsprechende diagnostische Biomarker erforderlich. So ließe sich feststellen, welcher Patient voraussichtlich auf einen bestimmten neuen, hoch spezifischen Wirkstoff anspricht, etwa auf Mepolizumab oder Lebrikizumab (die sich gegen die Immunbotenstoffe Interleukin 5 beziehungsweise 13 richten). Denn solche Mittel können nur bei Asthmaformen angreifen, bei denen diese Botenstoffe an krankheitsverursachenden molekularen Signalwegen mitwirken.

Dringend erforderlich: Biomarker für individualisierte Therapien

Mit Allergien, die andere Organe als die Lungen angreifen, hat sich die therapeutische Forschung bisher nur in zweiter Linie befasst – trotz der unzureichenden medizinischen Hilfsmittel und obwohl der Bedarf danach groß ist und weiter wächst. Immerhin erweisen sich aber einige der neuen Substanzen gegen Asthma als hilfreich bei anderen Immunerkrankungen. So kann Omalizumab bei einer Reihe von Leiden Verbesserung erzielen: etwa bei bestimmten Formen von Nesselsucht (Urtikaria) und Dermatitis; bei allergischer Aspergillose der Atemwege, also einer Reaktion auf Pilze; sowie wenn so genannte Mastzellen, die bei Allergien unter anderem Histamin ausstoßen, generell aktiviert sind und der Zustand sich mit bisherigen Mitteln nicht verbessern ließ. Omalizumab kann auch Immuntherapien gegen Nahrungsmittelallergien unterstützen, genauer gesagt gegen die gefürchteten Schockreaktionen bei einer Desensibilisierung schützen. Mepolizumab wiederum hilft unter Umständen bei verschiedenen Überempfindlichkeitsreaktionen durch weiße Blutzellen von Schleimhäuten oder Blutgefäßen auf Allergene oder Parasiten.

Die World Allergy Organization betont in ihrem Weißbuch, dass Allergien und Asthma nicht nur Besorgnis erre-

gend zunehmen, sondern auch immer schwerer und komplexer verlaufen – und entsprechend mehr Kosten verursachen. Umso dringlicher sollte sich die medizinische und Medikamentenforschung stärker als bisher den Phänomenen beim Menschen selbst zuwenden. Mit einem tieferen Verständnis der Zusammenhänge bei verschiedenen Patienten ließe sich im Einzelfall abschätzen, was jedem Erkrankten wahrscheinlich am besten hilft. Solche Ansätze müssten neben den Allergenen auch andere Stressoren im Zusammenhang mit der Erkrankung erfassen, etwa Viren und Schadstoffe.

Wünschenswert wäre auch, dass akademische und industrielle Forschung offener und vertrauensvoller zusammenarbeiten als oft üblich, gerade in noch nicht unmittelbar wettbewerbsrelevanten Bereichen. Das gegenwärtige Modell, nach »Blockbustern« zu suchen, nach Medikamenten, die einer großen Patientenzahl helfen und Milliardenumsätze bringen, ist jedenfalls auf Dauer nicht tragfähig. ~

DER AUTOR



Stephen Holgate ist an der University of Southampton klinischer Professor des britischen Medical Research Council. Am Klinikum der Universität ist er auch ehrenamtlicher Konsiliararzt im NHS Trust, und er hat den Vorsitz der britischen Respiratory Research Collaborative inne.

QUELLE

Holgate, S.T.: Pathophysiology of Asthma: What has our Current Understanding Taught us about New Therapeutic Approaches? In: Journal of Allergy and Clinical Immunology 128, S. 495–505, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178932

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature 479, S. 522

Frischer Wind in der Asthmaforschung

Lange galt Asthma als einheitliche Erkrankung, die ein einziger Immunzelltyp auslöst. Doch nun entdecken Forscher, wie komplex die Ursachen des Leidens sind, und hoffen, bald neue Medikamente für jene schweren Formen zu finden, die nicht auf Kortison ansprechen.

Von Amy Maxmen

Den Lehrbüchern zufolge hängt Asthma mit einer Untergruppe der weißen Blutkörperchen namens Typ-2-Helfer-Lymphozyten – kurz Th2-Zellen – zusammen. Demnach tritt ein Anfall auf, wenn solche Zellen bestimmte Proteine freisetzen, die ihrerseits Immunreaktionen auslösen. Diese so genannten Zytokine verursachen Entzündungen in den Bronchien; der Patient ringt nach Luft mit dem für das Asthma typischen Giemen, einem pfeifenden Atemgeräusch. Doch kürzlich haben Forscher in Lungengewebe, Auswurf und Blut von Asthma-patienten ein weiteres Zytokin namens Interleukin-17 (IL-17) nachgewiesen, das nicht von Th2-Zellen stammt. »Wir glaubten, wir wüssten über Asthma Bescheid, doch jetzt erweist es sich als viel komplizierter«, meint der Immunologe Manfred Kopf von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.

Die neuen Forschungsergebnisse erweitern das gängige Erklärungsmuster enorm. Die Vielzahl der molekularen Signalwege des Immunsystems bedingt verschiedene Erscheinungsformen des vormals einheitlichen Krankheitsbilds. Durch Kartierung dieser Netzwerke hofft man Angriffspunkte

für neue Medikamente zu finden, die gegen jede Art von Asthma wirken. Die Entdeckung von IL-17 in der Lunge mancher Asthmatiker lenkte die Aufmerksamkeit auf IL-17 produzierende Zellen, die zuvor niemand mit dem Leiden in Zusammenhang gebracht hatte. Wenn die Forscher herausfinden, was den abnormen und schädlichen Anstieg des IL-17-Spiegels verursacht, können sie vielleicht auch klären, weshalb Asthma und andere von diesem Zytokin verursachte Krankheiten – zum Beispiel entzündliche Darmerkrankungen und multiple Sklerose – in den Industrieländern fortwährend zunehmen.

Die unüblichen Verdächtigen

Der neue Ansatz bringt mehrere Rätsel der Lösung näher. Zum Beispiel sammeln sich in der Lunge vieler Asthma-patienten spezielle weiße Blutkörperchen, die eosinophile Leukozyten genannt werden. Bei besonders schweren Krankheitsformen treten hingegen gehäuft andere Immunzellen auf, so genannte neutrophile Granulozyten. Normalerweise umgeben diese Zellen, angelockt von IL-17, das Gebiet einer akuten Infektion oder Verletzung, um den Körper vor Krankheitserregern zu bewahren. Auch bei Asthma zieht IL-17 neutrophile Zellen in die Lunge – doch anstatt zu schützen, verschlimmern sie die Anfälle.

Außerdem tritt bei schwerem Asthma nicht nur auffallend viel IL-17 auf, sondern es finden sich zudem gehäuft die Th17-Zellen, die speziell dieses Zytokin freisetzen. Im Tierversuch zeigen Mäuse mit erhöhten Th17-Werten kaum Besserung, wenn man ihnen Steroide verabreicht. Auf diese Standardmedikamente sprechen auch schwer erkrankte Menschen schlecht an. »In die Notaufnahme kommen meist die Patienten mit schwerem Asthma, denen Kortisonpräparate nicht helfen«, erklärt Bart Lambrecht von der Universität Gent (Belgien). »Dass sich bei diesen Patienten Neutrophile im Schleim finden, wissen wir schon länger, aber der Zusammenhang mit Th17-Zellen wurde erst in letzter Zeit hergestellt.«

AUF EINEN BLICK

LEIDEN MIT VIELEN FASSETTEN

1 Asthma liegen offenbar mehr Faktoren zu Grunde als lange angenommen. So sind bei manchen Patienten Typen von **Immunzellen** und **Botenstoffen** beteiligt, die bisher nicht in diesem Zusammenhang bekannt waren.

2 Eine wichtige Rolle scheinen etwa **Interleukin-17 produzierende Helferzellen** und **natürliche Killerzellen** zu spielen.

3 Vor allem bei **schweren Krankheitsformen** versagt die übliche Behandlung mit **Kortison**. Entsprechend suchen Forscher nach neuen, **wirksameren Therapien**, die möglichst alle Asthmaformen gleichermaßen bekämpfen.

Indem die Th17-Zellen Zytokine absondern, verengen sie die Atemwege der Lunge. Unklar ist aber, was die Zellen veranlasst, die schädlichen Moleküle freizusetzen. Als mögliche Auslöser wurden Viren, Allergene, Zigarettenrauch und Luftschadstoffe verdächtigt. Beispielsweise fördert Zigarettenrauch die Vermehrung von Th17-Zellen, und Rauchen gilt als Risikofaktor für Asthma – doch der Zusammenhang zwischen beiden Beobachtungen ist noch nicht geklärt.

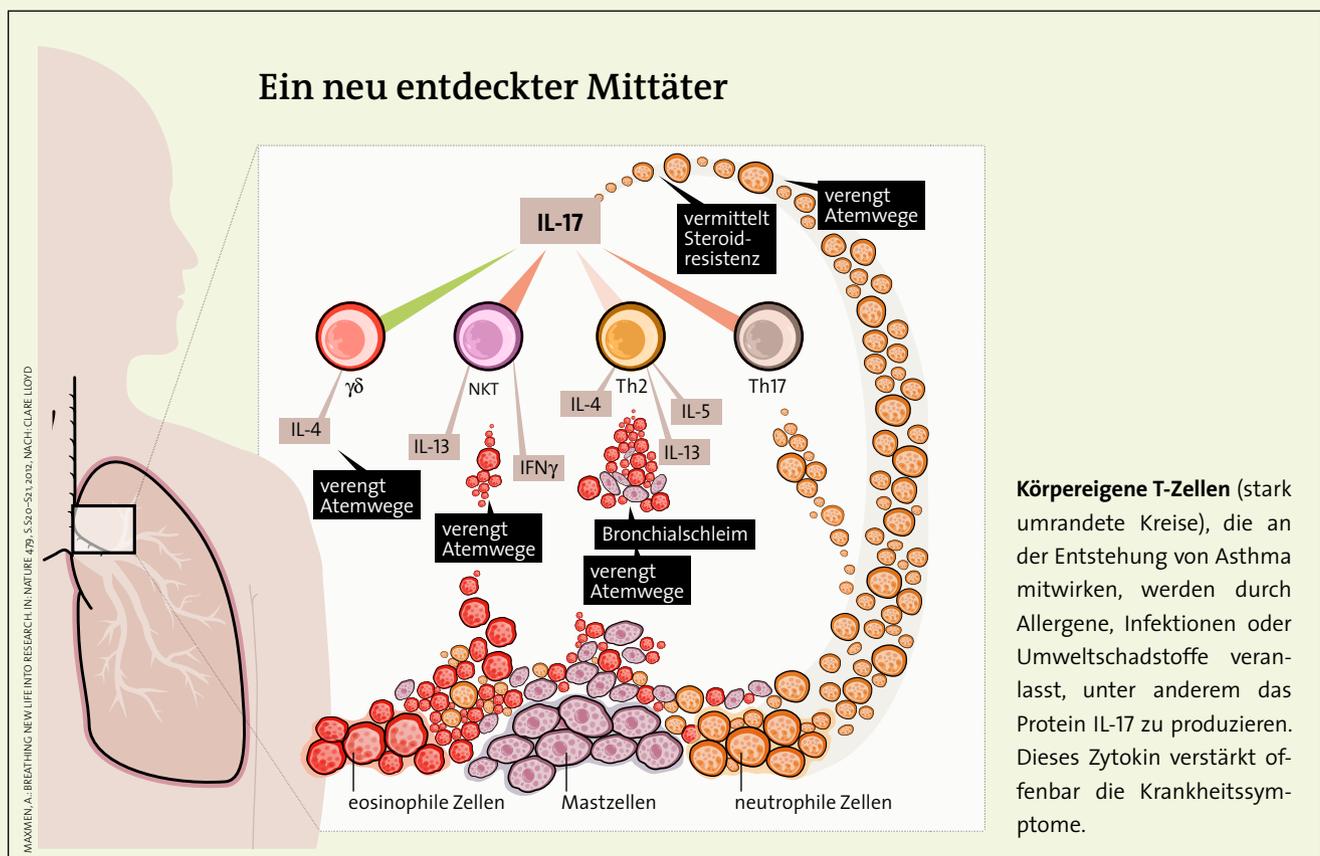
»Vielleicht besitzt man zuerst eine Veranlagung zu übermäßigen Th2-Reaktionen, und IL-17 kommt erst später ins Spiel«, meint Marsha Wills-Karp, Immunologin an der Cincinnati Children's Hospital Research Foundation in Ohio. »Das kann mit frühkindlichen Kontakten mit Infektionserregern, Zigarettenrauch oder Luftschadstoffen zusammenhängen.«

Im Jahr 2010 entdeckte Wills-Karp, wie Allergene eine Reaktion von Th17-Zellen provozieren und damit die Asthmasymptome verschärfen können. Eine Hauptrolle spielt dabei das so genannte Komplementsystem; es verbindet das angeborene Immunsystem mit T-Zellen, insbesondere mit Th17. Im Laborversuch aktivierte ein Extrakt aus den allergenen Bestandteilen von Hausstaubmilben einen bestimmten Teil des Komplements, die C3-Komponente, und setzte damit eine molekulare Kaskade in Gang, die schließlich die Anzahl der Th17-Zellen erhöhte. Ein von diesen Zellen produziertes Zytokin namens IL-17A reaktivierte wiederum die C3-Komponente und sorgte so für eine dauerhafte Immunreaktion auf den Milbenextrakt.

Wie Wills-Karp erklärt, könnte auch eine ungewöhnlich schwere Infektion mit dem häufigen Respiratory-Syncytial-Virus (RSV) über die C3-Komponente des Komplementsystems Asthma auslösen. »Fast jedes Kind infiziert sich in den ersten beiden Lebensjahren mit RSV und bekommt davon bloß eine Erkältung«, erläutert sie, »doch seltene kritische Fälle müssen im Krankenhaus behandelt werden. Die Überlebenden entwickeln fast alle schweres Asthma.« In einer früheren Autopsiestudie hatte Wills-Karp bei Kindern, die in den 1960er Jahren nach Verabreichung eines experimentellen RSV-Impfstoffs verstorben waren, Anzeichen der Komplementaktivierung gefunden. Die Kinder hatten vor ihrem Tod unter Atemnot gelitten. Wills-Karp vermutet nun, dass das RSV mit der Aktivierung des Komplementsystems eine Th17-Kaskade in Gang setzte, die schweres Asthma hervorrief: »Könnten wir die Lungen dieser Kinder noch einmal genauer untersuchen, fänden wir wahrscheinlich Th17-Zellen.«

Datenmaterial aus vielen Quellen

Ein möglicher Faktor ist zudem der Vitamin-D-Spiegel im Blut. Da das Vitamin anscheinend die Th17-Zellen daran hindert, Zytokine zu produzieren, dürfte Vitamin-D-Mangel die Zytokinfreisetzung anregen. Dadurch könnten auch an sich ungefährliche Erreger schweres Asthma auslösen. Dafür spricht eine Studie in Costa Rica: Asthmatische Kinder mit Vitamin-D-Mangel wurden ihr zufolge signifikant



häufiger mit schwerem Asthma ins Krankenhaus eingeliefert als andere.

Damit ist die Geschichte noch nicht zu Ende: Th17-Lymphozyten sind wohl nicht die einzigen Zellen, die bei Asthmapatienten IL-17 produzieren. Der Kinderarzt Dale Umetsu von der Harvard Medical School und dem Children's Hospital in Boston (Massachusetts) beobachtete an Labormäusen, dass auch natürliche Killer-T-Zellen – abgekürzt NKT-Zellen – das Zytokin IL-17 freisetzen und asthmaähnliche Symptome hervorrufen. Umetsus Mäuse litten unter Atemnot, nachdem sie ozonbelastete Luft eingeatmet hatten, wie sie regional an manchen Sommertagen auftritt. Doch stammten die erhöhten IL-17-Werte nicht von Th2- oder Th17-Zellen. »Auch Mäuse, die gar keine T-Helferzellen besitzen, entwickeln unter Ozonbelastung Atemnot, weil sie zahlreiche NKT-Zellen aufweisen«, erklärt Umetsu. »Das widerspricht der herrschenden Lehrmeinung; offenbar sind Th2-Zellen nicht die einzigen Verursacher.«

Ein weiterer höchst ungewöhnlicher Verdächtiger ist eine aus der Art geschlagene T-Helferzelle. Wie eine 2010 veröffentlichte Studie ergab, produzieren Th2-Zellen von Asthmapatienten gelegentlich das nicht zu ihnen passende Protein IL-17. Die Immunologen rätseln noch über die Ursache. Ebenso unklar ist, ob eine T-Zelle, die ein neuartiges Zytokin produziert, einer eigenen T-Zell-Untergruppe zugeordnet werden muss. »Langsam setzt sich die Erkenntnis durch, dass es mehr T-Zell-Subtypen gibt, als wir dachten«, meint der Immunologe Carsten Schmidt-Weber von der Technischen Universität München und dem dortigen Helmholtz-Zentrum. »Aber beim Entwickeln neuer Therapien gegen Asthma geht es um die Funktion der Zellen, nicht um ihren Namen.«

Personalisierte Therapie

Um auch den Asthmatikern zu helfen, bei denen die gängigen Kortisonpräparate nicht anschlagen, gilt es herauszufinden, welche Zellen auf bestimmte Reize mit der Produktion von IL-17 reagieren. Und beim Testen neuer Arzneistoffe müssen die Patienten möglichst deutlich nach ihrem Krankheitstyp unterschieden werden. Ein auf eine bestimmte Asthmaform zugeschnittenes Medikament könnte bei einem anderen Krankheitstyp versagen.

»Wir wissen noch nicht genug, um wirklich spezifische Therapien einzusetzen«, betont Schmidt-Weber. Das Klassifizieren von Asthmapatienten hat sich das Deutsche Zentrum für Lungenforschung vorgenommen – ein Verbund, der Wissenschaftler an fünf Standorten vernetzt. In den USA hat das Severe Asthma Research Program (SARP) mittlerweile rund 1600 Patienten untersucht und drei Haupttypen von schwerem Asthma unterschieden. Die SARP-Forscher analysieren Schleim- und Blutproben, um die Immunreaktion zu bestimmen, die zu den jeweiligen Symptomtypen gehört.

Doch Blut und Auswurf spiegeln nicht alles wider, was in der Lunge vorgeht. Tiefer gehende Lungenuntersuchungen sind freilich für die Testpersonen recht unangenehm. Clare Lloyd vom Imperial College London entnimmt den Atem-

wegen von Asthmapatienten – deren Einwilligung vorausgesetzt – winzige Gewebeprobe, um die Proteinproduktion der Immunzellen zu analysieren. Doch selbst dieses invasive Verfahren liefert nur eine Momentaufnahme. »Wir hoffen, dass die Probe wiedergibt, was sich in der Lunge abspielt, aber eigentlich sehen wir nur einen kleinen Ausschnitt«, erklärt sie. »Am liebsten würden wir in Echtzeit verfolgen, welche Zytokine in der Lunge des Patienten freigesetzt werden – doch wir sind weit davon entfernt, das auf sichere und ethisch vertretbare Weise zu erreichen.«

Darum bleiben die Asthmaforscher auf Versuche mit Mäusen angewiesen. Aber just die Abhängigkeit von einem einzigen Tiermodell verleitete einst zu der irrigen Hypothese, an allem seien die Th2-Zellen schuld. »Mit dem bisherigen Mausmodell lässt sich nicht erklären, wie eine Virusinfektion oder die Ozonbelastung Asthma verursachen kann«, sagt Umetsu. »Wir brauchen dringend neue Modelle, um unterschiedliche Asthmatypen zu erforschen.«

Die jüngsten Erkenntnisse über die Mittäterschaft von IL-17- und NKT-Zellen werfen wiederum neue Fragen auf, aber Clare Lloyd fühlt sich durch diese Herausforderung angespornt. »Wir möchten alle möglichen Arten von Asthma besser verstehen«, sagt sie. »Erst wenn wir die in jedem Fall beteiligten Zytokine identifiziert haben, können wir maßgeschneiderte Therapien entwickeln.«

DIE AUTORIN



Amy Maxmen ist freie Wissenschaftsjournalistin. Sie lebt in New York.

QUELLEN

Brehm, J. et al.: Serum Vitamin D Levels and Markers of Severity of Childhood Asthma in Costa Rica. In: American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 179, S. 765–771, 2009

Lajoie, S. et al.: Complement-Mediated Regulation of the IL-17A Axis is a Central Genetic Determinant of the Severity of Experimental Allergic Asthma. In: Nature Immunology 11, S. 928–935, 2010

Pichavant, M. et al.: Ozone Exposure in a Mouse Model Induces Airway Hyperreactivity that Requires the Presence of Natural Killer T Cells and IL-17. In: Journal of Experimental Medicine 205, S. 385–393, 2008

Wang, Y. et al.: A Novel Subset of CD4+ TH2 Memory/Effector Cells that Produce Inflammatory IL-17 Cytokine and Promote the Exacerbation of Chronic Allergic Asthma. In: Journal of Experimental Medicine 207, S. 2479–2491, 2010

WEBLINK

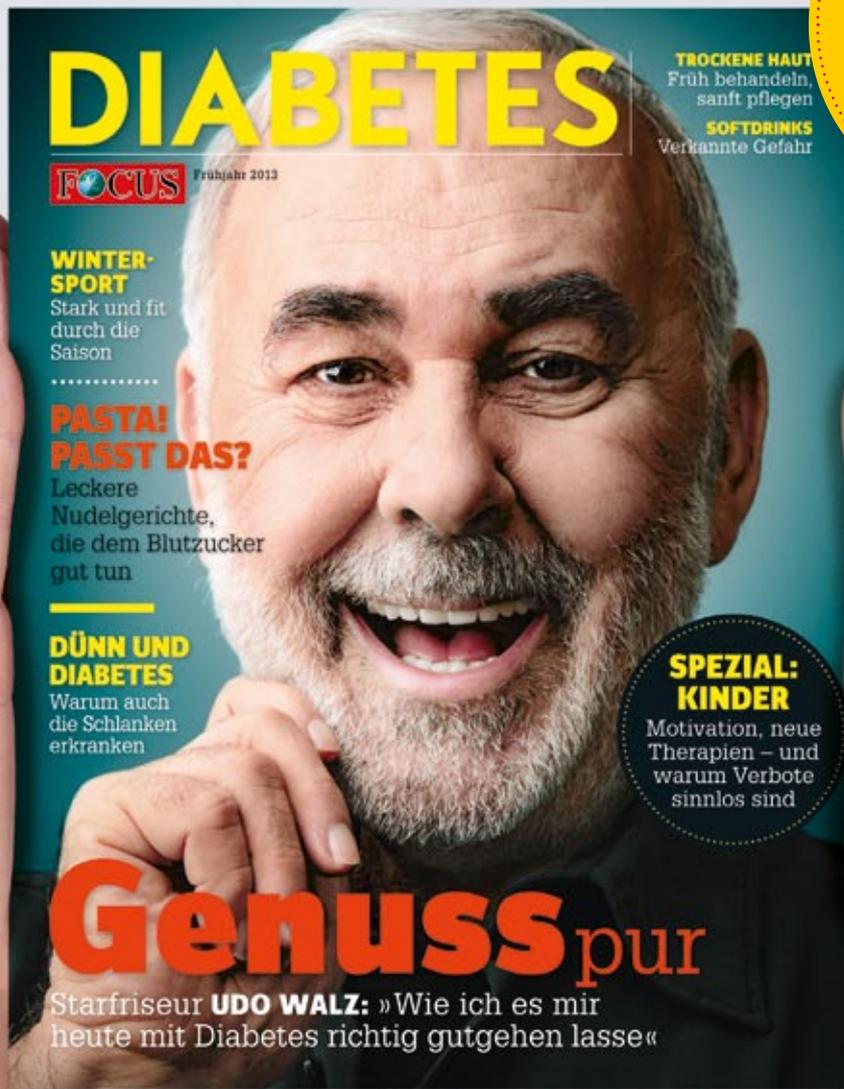
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178927

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 479, S. S20–S21

Für Udo Walz und für ca. 6 Mio. Menschen
in Deutschland ein Thema.

Und auch für mich.

**JETZT
NEU!**



In FOCUS-DIABETES bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.

Wenn Kinder Diabetes haben: Die große Kraft der Motivation.

Leichter leben mit Diabetes: Produkte, die im Alltag helfen.

Mit Diabetes durch die Kälte: Machen Sie Ihre Haut winterfit.

Mit Diabetes auf den Berg: Was man unbedingt dabei haben sollte.

FOCUS-DIABETES gibt es auch unter: Tel. 0180 5 480 1006*, Fax 0180 5 480 1001, www.focus-diabetes.de

*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz. Aus dem Mobilnetz max. 0,42 €/Min.

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

FOCUS

Was tun mit dem nuklearen Abfall?

Abgebrannter Brennstoff aus Kernkraftwerken bleibt Hunderttausende von Jahren radioaktiv. Eine Technik namens »Partitioning und Transmutation« könnte das Problem teilweise entschärfen. Das Verfahren wandelt langlebige Radionuklide durch Beschuss mit schnellen Neutronen in ungefährlichere Stoffe um.

Von Joachim Knebel, Concetta Fazio, Werner Maschek und Walter Tromm

Die Nutzung der Kernkraft zur Energiegewinnung ist mit sehr geringen Kohlenstoffdioxidemissionen verbunden und hilft, Strom unabhängig von fossilen Rohstoffen zu erzeugen. Eines ihrer zentralen Probleme, neben der Sicherheit der Reaktoren selbst, ist jedoch der in Kernreaktoren entstehende radioaktive Abfall: Die Strahlung der hoch radioaktiven langlebigen Radionuklide, die sich in den abgebrannten Brennstoffen befinden, sinkt erst im Verlauf von Jahrhunderttausenden wieder auf Werte ab, die mit jenen von natürlich vorkommendem Uran vergleichbar sind.

Die Endlagerung des Abfalls in tiefen geologischen Gesteinsformationen, in denen er auf lange Zeit sicher und abgeschlossen von der Biosphäre verbleiben könnte, betrachten Experten gegenwärtig als beste Option, an der sich andere Ansätze messen müssen. Eine mögliche Alternative zur Endlagerung langlebiger Radionuklide wäre ihre chemische Abtrennung (»Partitioning«) und anschließende Umwandlung (»Transmutation«) mit energiereichen, »schnel-

len« Neutronen. Durch P&T, so der Kurzname des Verfahrens, würde die Gesellschaft zwar nicht auf Endlager verzichten können, doch ließe sich die Menge solcher Nuklide deutlich verringern.

Der Brennstoff, mit dem gewöhnliche Leichtwasserreaktoren laufen, wird nie vollständig »verbraucht«. Weil die darin durch Kernreaktionen neu entstehenden Elemente immer mehr der zur nuklearen Kettenreaktion nötigen Neutronen einfangen, müssen die Brennelemente ausgetauscht werden, sobald sie einen bestimmten so genannten Abbrand erreicht haben.

Neben Uran und seinen Spaltprodukten enthalten abgebrannte Brennstäbe aus Leichtwasserreaktoren auch Transurane. Diese entstehen aus Uran (Ordnungszahl 92), das im Reaktor zusätzliche Neutronen einfängt und sich dadurch in Elemente mit höherer Ordnungszahl umwandelt. Zu ihnen zählen Plutonium sowie die so genannten minoren Aktiniden, hauptsächlich Neptunium, Americium und Curium. Der Plutoniumanteil in einem abgebrannten Brennstab liegt bei rund einem Gewichtsprozent, minore Aktiniden machen etwa 0,1 Prozent aus.

In offenen Brennstoffkreisläufen, wie sie etwa in Deutschland, Schweden und den USA üblich sind, werden die abgebrannten Brennelemente als hoch radioaktiver Abfall betrachtet, der vollständig endgelagert werden muss. Länder wie Frankreich, England und Japan arbeiten Brennelemente hingegen auf. Dabei trennt man das Uran, das im Reaktor nicht gespalten wurde, sowie das neu entstandene Plutonium aus den Brennstäben ab und verwendet es in Form von Mischoxidbrennelementen, die sowohl Uran- als auch Plutoniumoxid enthalten, erneut als Brennstoff für Leichtwasserreaktoren. Diese Wiederaufarbeitung erlaubt es, den Brennstoff besser auszunutzen und die Menge an Plutonium im Abfall zu reduzieren. Bis vor einigen Jahren nutzte auch Deutschland diese Möglichkeit und ließ die abgebrannten

AUF EINEN BLICK

UNTER BESCHUSS

1 Bei der Nutzung von Kernenergie entstehen hoch radioaktive nukleare Abfälle. Ein noch zu entwickelndes Verfahren namens **Partitioning und Transmutation**, kurz P&T, könnte die von ihnen ausgehende Gefahr verringern.

2 Bei P&T werden die in abgebrannten Kernstäben enthaltenen Elemente chemisch voneinander abgetrennt und anschließend in speziellen Transmutationsanlagen **mit schnellen Neutronen beschossen**. **Dadurch sinkt ihre Radiotoxizität.**

3 Dieses Verfahren würde das Volumen der hoch radioaktiven Abfälle verringern. **Endlager könnten dann kleiner ausfallen.** In industriellem Maßstab ließe sich P&T aber erst in einigen Jahrzehnten realisieren.

Brennelemente zur Wiederaufarbeitung nach La Hague in Frankreich und nach Sellafield in Großbritannien bringen. 2005 wurden die Transporte aber gesetzlich untersagt.

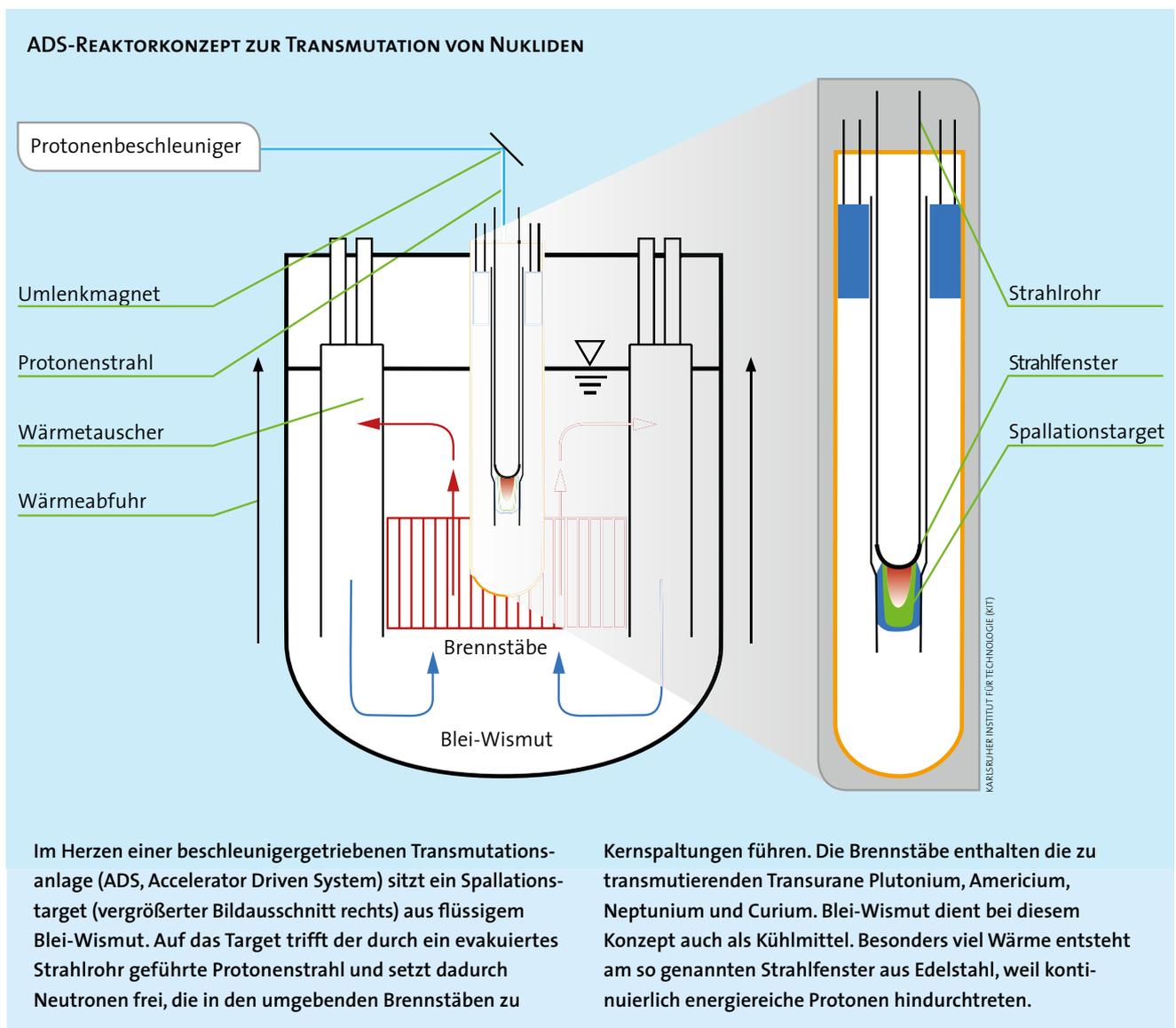
Eine Option für die Zukunft, bei der auch P&T eine Rolle spielen könnte, besteht in so genannten erweiterten geschlossenen Brennstoffkreisläufen. Diese basieren auf dem mehrfachen Rezyklieren der Transurane Plutonium, Americium, Curium und Neptunium sowie auf der Entwicklung neuartiger Brennstoffe, Abtrennungsprozesse und Reaktor-konzepte.

Ein Maß für die Gefahr, die von Radionukliden ausgeht, ist deren Radiotoxizität. Sie hängt ab von der Strahlenart, der Strahlenenergie sowie der Aufnahme und der Verweildauer der entsprechenden Elemente im menschlichen Organismus. Berechnen kann man sie anhand des effektiven Dosisfaktors und der Aktivität der Radionuklide. Der Dosisfaktor berücksichtigt die Strahlenart – Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung – und deren Auswirkung auf den Körper. Betrachtet

man längere Zeiträume, bestimmen nur wenige Elemente die Radiotoxizität abgebrannter Kernbrennstoffe (siehe Grafiken auf S. 36). Diese sind im Wesentlichen Plutonium, Americium und Neptunium und in geringerem Maß Curium sowie einige langlebige Spaltprodukte wie Jod und Technetium. Das P&T-Verfahren zielt auf die Transurane: Sie werden chemisch von den anderen Elementen abgetrennt und anschließend in speziellen Transmutationsanlagen in stabile oder kurzlebige Isotope umgewandelt.

Drastisch reduzierte Radiotoxizität

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass sich die Radiotoxizität des Abfalls um den Faktor zehn senken lässt, wenn das Plutonium aus einem abgebrannten Brennstab abgetrennt und transmutiert wird. Könnte man zusätzlich die minoren Aktiniden vollständig spalten, ließe sich die Radiotoxizität im Prinzip sogar um den Faktor 100 reduzieren. Da aber in einem Zyklus zwischen zwei Wiederaufarbeitungen voraus-



sichtlich nicht mehr als 20 Prozent der Aktiniden durch Transmutation effizient umgewandelt werden können, bedarf es in jedem Fall der mehrfachen Abtrennung und Recyklierung.

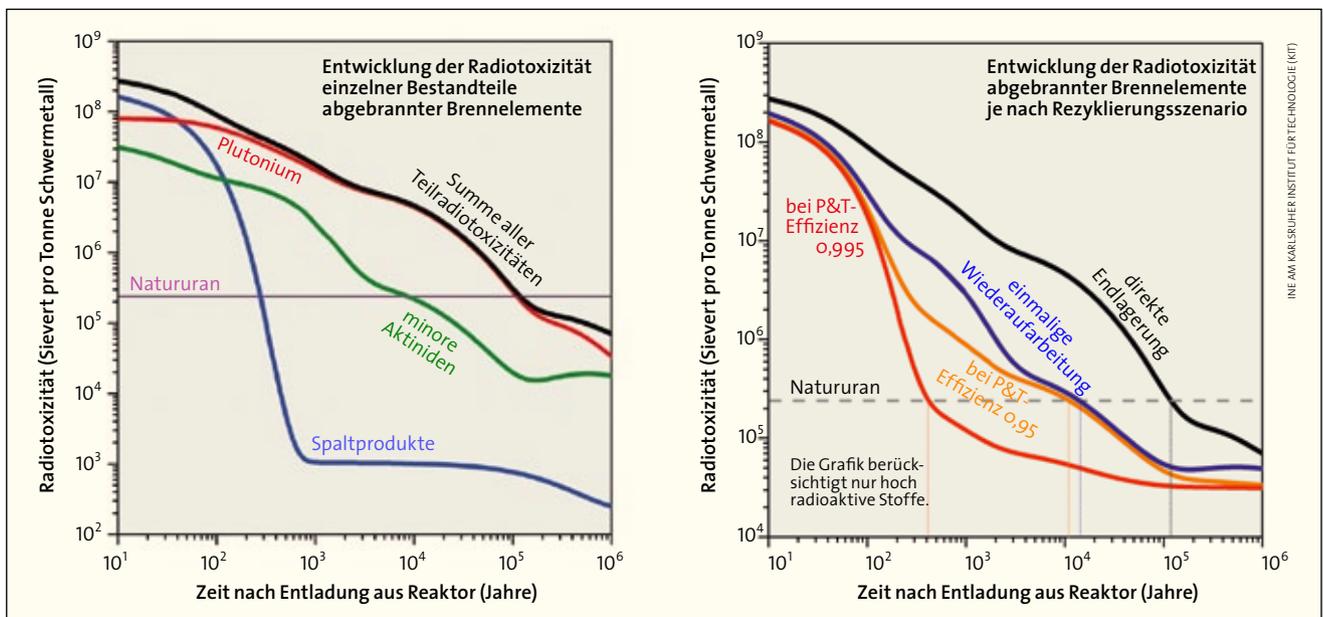
Wie sich die Radiotoxizität dadurch verringert, zeigen die Grafiken unten. Auf Grund der nicht vollständigen Transmutation in einem Abbrandzyklus und der so genannten Prozessverluste, die aber deutlich unter einem Prozent der Materialmenge liegen sollen, wird man die ideale Kurve (rote Linie in der rechten Grafik unten) in der Realität nicht ganz erreichen. Hat man jedoch das Verfahren erst einmal industriell etabliert, gewährleistet es, dass die Radiotoxizität des abgebrannten und dann transmutierten Kernbrennstoffs bereits nach einigen hundert oder tausend Jahren auf diejenige von Natururan abgefallen ist. Ein weiterer Vorteil von P&T besteht darin, dass mit der Menge der endzulagernden langlebigen Radionuklide auch weniger Nachwärme entsteht. In einem Endlager ließe sich also mehr Abfall unterbringen, oder aber es könnte kleiner ausfallen.

Nun stellen sich zwei zentrale Fragen. Wollen wir als Gesellschaft die prinzipielle Machbarkeit von P&T genauer untersuchen? Und wollen wir prüfen, wie sich das Verfahren in einem internationalen Kontext realisieren ließe? In jedem Fall müssen wir zunächst eine Reihe grundsätzlicher wissenschaftlicher und technologischer Aufgaben in Angriff nehmen. Auf dem Gebiet der Trennchemie gilt es zu überprüfen, ob die gegenwärtig aussichtsreichsten Laborverfahren zur Abtrennung der Aktiniden auch im industriellen Maßstab

und zu akzeptablen Kosten realisierbar sind (siehe Kasten rechts). Des Weiteren bedarf es neuartiger Brennstoffe. Für P&T ist uranfreier Brennstoff mit einem hohen Anteil von Plutonium und minoren Aktiniden ideal. Die Abwesenheit von Uran vermeidet, dass aus Isotopen wie Uran-238 durch Neutroneneinfang neue Transurane entstehen, was die Transmutationseffizienz vermindern würde. Als Ersatz untersuchen Forscher gegenwärtig verschiedene reaktionsträge Materialien wie Magnesiumoxid oder Molybdän. Auch neue Herstellungsprozesse sind nötig, bei denen Plutonium und die minoren Aktiniden in diese Materialien eingebettet werden, so dass schließlich pulverförmiger Brennstoff entsteht, der in Tablettenform gepresst und in Hüllrohre geschoben werden kann.

Experimentell zu überprüfen ist auch, wie sich diese Brennstoffe und Hüllrohrmaterialien in einem realen Reaktor verhalten. Bleiben sie unter dem Beschuss mit schnellen Neutronen und bei hohen Abbränden stabil? Und schließlich müssen die Aktiniden wegen ihrer hohen Radioaktivität und starken Wärmeentwicklung mit speziellen Fernhantier-techniken gehandhabt werden, die bislang ebenfalls nur im Labormaßstab existieren.

In den heute üblichen Leichtwasserreaktoren setzen thermische Neutronen, also Teilchen mit niedriger Energie, die Kernspaltung in Gang. Doch Plutonium und vor allem die minoren Aktiniden fangen viele dieser »langsamen« Neutronen einfach ein. P&T-Verfahren arbeiten hingegen mit schnellen Neutronen. So stellt man sicher, dass sie die Trans-



Die Radiotoxizität abgebrannter Brennstoffe, gemessen in Sievert pro Tonne Schwermetall, wird stets auf diejenige von Natururan bezogen. Im Fall von Plutonium ist sie nach über 100 000 Jahren auf dessen Niveau abgesunken, im Fall der minoren Aktiniden nach rund 10 000 Jahren und bei Spaltprodukten bereits nach einigen hundert Jahren (Grafik links). Unterschiedliche Rezyklierungsszenarien verändern das Bild (Grafik rechts). Durch einma-

lige Wiederaufarbeitung (blaue Kurve) wird nach rund 10 000 Jahren das Niveau von Natururan erreicht. Durch P&T verbessert sich dieser Wert noch: Im realen Betrieb könnten sich Werte einstellen, die zwischen der orangefarbenen und der roten Kurve liegen. Die Radiotoxizität der hoch radioaktiven Bestandteile des Atom Mülls wäre dann bereits nach einigen tausend Jahren auf das Niveau von Natururan gefallen.

Nichts als Aktiniden

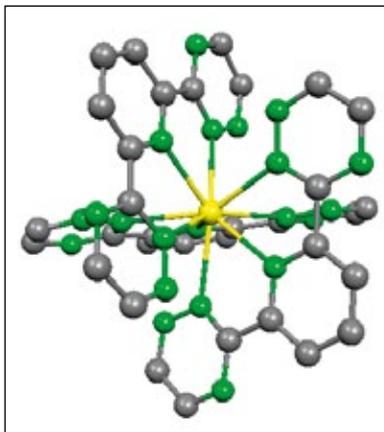
Von Andreas Geist

Wie geht man mit abgebrannten Brennstäben und den darin enthaltenen Aktiniden um? Man kann sie nicht einfach in einer Transmutationsanlage einsetzen. Denn sie enthalten auch Spaltprodukte, die viele der für die Transmutation benötigten Neutronen absorbieren. Die Aktiniden müssen daher vor ihrer Wiederverwendung von den Spaltprodukten abgetrennt werden. Für dieses so genannte Partitioning sind zwei Typen von Verfahren entwickelt worden.

Die pyrometallurgischen oder »trockenen« Prozesse sind meist elektrochemische Trennverfahren, die bei hoher Temperatur ablaufen. Zunächst löst man den Brennstoff in einer Salzschnmelze. Beim anschließenden Trennvorgang wird eine Spannung angelegt, so dass sich die Aktiniden in Richtung der Elektroden bewegen und dort abgeschieden werden. Verglichen mit hydrometallurgischen Verfahren sind solche Pyroprozesse unempfindlicher gegenüber der Radiolyse, also der Zerstörung chemischer Bindungen durch radioaktive Strahlung. Allerdings befinden sie sich noch im Laborstadium; bis zu ihrer industriellen Realisierung dürfte es einige Jahrzehnte dauern.

Hydrometallurgische oder »wässrige« Verfahren sind bereits verfügbar. Sie basieren auf dem Prinzip der Flüssig-Flüssig-Extraktion, bei der mit zwei flüssigen Phasen gearbeitet wird. Zunächst löst man die Aktiniden in einer wässrigen Phase und mischt diese dann mit einer organischen Phase, die in der wässrigen Phase feine Tropfen bildet. Ein Extraktionsmittel in der organischen Phase reagiert nun mit den Aktiniden, wodurch Molekülkomplexe entstehen, die wie die organische Phase in der wässrigen Phase ebenfalls nicht löslich sind. Auf Grund ihres Dichteunterschieds setzen sich die wässrige und die organische Phase voneinander ab – letztere enthält nun auch die Aktiniden – und lassen sich trennen.

Die Extraktion in einem einzigen Schritt ist bislang nicht gelungen. Gegenwärtige Verfahren bestehen daher aus mehreren Einzelprozessen. Der so genannte PUREX-Prozess (Plutonium and Uranium Recovery by Extraction) zur Abtrennung von Uran und Plutonium ist heute industrieller Standard und wird in großtechnischen Wiederaufarbeitungsanlagen wie im französischen La Hague, im britischen Sellafield und im japanischen Rokkasho genutzt. Dabei wird der Kernbrennstoff zunächst in Salpetersäure aufgelöst. In einem Flüssig-Flüssig-Extraktions-



INE AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Im SANEX-Prozess werden Curium- und Americiumatome von alkylierten Bistriazinylpyridinen (BTP) umhüllt. Dann nämlich lassen sie sich von den ihnen chemisch sehr ähnlichen Lanthaniden trennen. Die Grafik zeigt ein Curiumatom (gelb), umgeben von drei BTP-Molekülen. Die Bindungen zwischen BTP und Curium erfolgen ausschließlich über Stickstoffatome (grün).

verfahren erfolgt dann die selektive Abtrennung von Uran und Plutonium mit dem Molekül Tri-n-butylphosphat (TBP).

Der PUREX-Prozess ist auch für Neptunium geeignet. Americium und Curium müssen hingegen im DIAMEX-Prozess extrahiert werden (»Diamide Extraction«, benannt nach dem verwendeten Extraktionsmittel). Hierfür geeignete Moleküle wurden in den letzten Jahren in Frankreich und Japan entwickelt und im Labor erfolgreich getestet. Beim DIAMEX-Prozess werden gemeinsam mit den Aktiniden allerdings auch die ihnen chemisch sehr ähnlichen Lanthaniden abgetrennt. Diese Spaltprodukte fangen so viele Neutronen ein, dass sie ebenfalls von den Aktiniden getrennt werden müssen.

Herkömmliche Extraktionsmittel, welche die abzutrennenden Metallionen über Sauerstoffatome binden, eignen sich dafür nicht: Die Stoffe sind einander zu ähnlich, zudem übersteigt der Anteil der Lanthaniden den der Aktiniden bei Weitem. Man benötigt daher Stickstoff- oder Schwefel-

reagenzien, welche die Metallionen gewissermaßen umhüllen und dadurch voneinander trennen. Möglich wurde dies dank eines Durchbruchs beim so genannten SANEX-Prozess (Selective Actinide Extraction) Ende der 1990er Jahre. Erstmals konnte mit den am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eingesetzten alkylierten Bistriazinylpyridinen (BTP, siehe Grafik) Americium und Curium aus Salpetersäure extrahiert und von den Lanthaniden getrennt werden.

Aus den BTP entwickelten Forscher schließlich auch so genannte alkylierte Bistriazinylbipyridine (BTBP). Das in England synthetisierte CyMe₄-BTBP gilt derzeit als europäischer Standard für den SANEX-Prozess. Die genaue Arbeitsweise von BTP und BTBP wird noch untersucht, mit dem Ziel, die Moleküle weiter zu optimieren.

Im Labor haben Wissenschaftler DIAMEX- und SANEX-Prozesse mittlerweile sowohl »kalt« als auch »heiß«, also mit hochradioaktiven Kernbrennstofflösungen, erprobt. Dabei konnten sie Americium und Curium zu mehr als 99,9 Prozent abtrennen. Die hydrometallurgische Trennchemie ist also bereits verfügbar.

Andreas Geist ist promovierter Chemiker und gehört dem Institut für Nukleare Entsorgung (INE) des Karlsruher Instituts für Technologie an.

Achtung, Korrosion!

Von Georg Müller

Für den sicheren Betrieb eines Reaktors ist die Stabilität der Strukturmaterialien entscheidend. Doch was, wenn der Stahl korrodiert oder durch andere Einflüsse geschwächt wird? Für Transmutationsanlagen vom ADS-Typ sind austenitische Chrom-Nickel-Stähle und ferritisch-martensitische Chrom-Stähle vorgesehen. Dort kommen sie aber in Kontakt mit flüssigem Blei oder einer so genannten eutektischen Legierung aus Blei und Wismut, die sowohl als Neutronenquelle wie auch als Kühlmittel zum Einsatz kommen – aber erhebliche Korrosionsprobleme mit sich bringen. Denn in den flüssigen Schwermetallen lösen sich metallische Legierungskomponenten des Stahls (Nickel, Chrom und Eisen), was ihn erheblich schwächt. Zudem verstopft der Flüssigkeitskreislauf allmählich, da die bei hohen Temperaturen gelösten Legierungsbestandteile in den kühleren Rohrleitungssystemen wieder abgeschieden werden.

Eine Lösung des Problems stellen Schutzschichten aus Oxiden dar. Der Stahl selbst enthält Oxidbildner wie Eisen und Chrom, die sich zur Herstellung solcher Schichten nutzen lassen. Entscheidend für die Schutzwirkung sind dann die Dichte der Schicht, deren Haftung auf dem Stahl sowie deren Fähigkeit, die Diffusion der Metallionen in das Kühlmittel und die des Sauerstoffs in den Stahl zu unterdrücken. Stahl oxidiert in sauerstoffhaltigen Bleilegierungen im Wesentlichen wie an Luft: Darin enthaltene Eisenionen diffundieren zur Stahloberfläche und reagieren dort mit Sauerstoff zu Magnetit (Fe_3O_4). Darüber hinaus diffundiert Sauerstoff in eine Zone unterhalb dieser Oberflächenschicht, so dass sich dort das Chrom-Spinell FeCr_2O_4 bildet. Dessen dichte Struktur bildet eine hochwirksame Barriere.

Entscheidend ist nun, wie viel Sauerstoff die flüssige Bleilegierung enthält. Seine Konzentration muss einen Mindestwert überschreiten, damit sich Magnetit und das Chrom-Spinell auf der

Stahloberfläche überhaupt bilden können. Bei zu niedriger Sauerstoffkonzentration würden sich die Oxidschichten zersetzen, bei zu hoher Konzentration würden sich Bleioxide bilden, die als feste Klumpen die Rohrleitungen verstopfen. Die jeweils geeigneten Konzentrationswerte hängen wiederum von der Temperatur ab, variieren also innerhalb des Kühlkreislaufs einer Transmutationsanlage und müssen so gewählt werden, dass die optimalen Bedingungen überall eingehalten werden.

Wie es nicht geht, zeigt das nebenstehende Foto. Dargestellt ist ein Querschnitt senkrecht durch die Oberfläche eines austenitischen AISI-360L-Stahls. Das Material war bei einer Temperatur von 550 Grad Celsius 2000 Stunden lang in eine Blei-Wismut-Legierung getaucht. Die Konzentration des Sauerstoffs von 10^{-8} Gewichtsprozent lag unter dem Mindestwert, weshalb sich keine Schutzschicht bilden konnte. Darum drang das Flüssigmetall in das Material ein und löste Stahlkomponenten, insbesondere Nickel, heraus.

Eine funktionsfähige Schutzschicht zeigt hingegen das Foto rechts außen. Dieser Stahl war der Legierung fünfmal länger ausgesetzt, die Sauerstoffkonzentration war 100-mal höher. In der Magnetitschicht sind helle Punkte zu sehen: kleine Poren, in denen Blei-Wismut eingelagert ist. Doch die darunterliegende Spinellschicht hat verhindert, dass das Flüssigmetall tiefer eindrang. Einen Nachteil haben solche Schutzschichten jedoch. Sie wachsen mit der Zeit und erschweren so den Übergang der Wärme zwischen Brennelementen und Kühlmittel. Die Effizienz der Kühlung nimmt also ab. Neuere Entwicklungen zielen darauf ab, die schützenden Oxidschichten durch Legierungskomponenten im Stahl zu verbessern. Das sind vor allem Elemente, die sehr stabile Oxide hoher Dichte bilden und das Wachstum der Oxid-

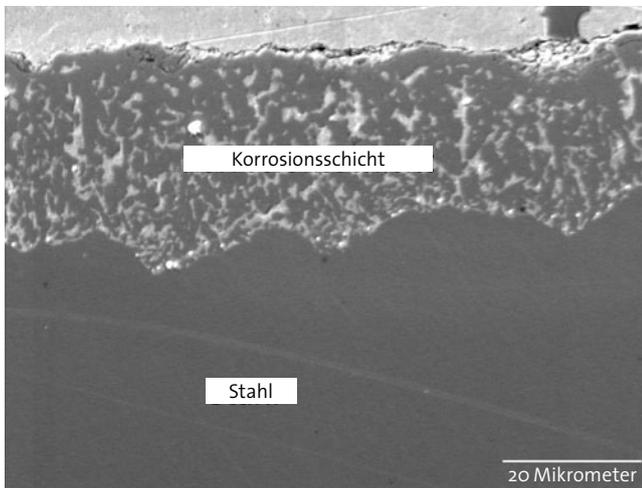
urane bevorzugt spalten und sich von ihnen nicht einfach einfangen lassen.

Die höchste Transmutationsrate lässt sich theoretischen Modellen zufolge mit beschleunigergetriebenen Transmutationssystemen (englisch: Accelerator Driven Systems, ADS) erreichen, die mit schnellen Neutronen und uranfreiem Brennstoff arbeiten. In solchen ADS-Systemen schießt ein leistungsfähiger Beschleuniger energiereiche Protonen durch ein Vakuumstrahlrohr in ein »Target«, in dem sie schnelle Neutronen erzeugen (siehe Skizze S. 35). Dieser Vorgang, bei dem Teilchen auf Atomkerne prallen und diese unter Freisetzung von Neutronen »zersplittern« lassen, wird als Spallation bezeichnet.

Als Spallationsmaterial setzt man das schwere Flüssigmetall Blei oder eine schon bei niedrigerer Temperatur schmelzende Legierung aus Blei und Wismut ein. Schließlich treffen die Neutronen auf das so genannte Blanket, also auf den Kern

mit dem Transmutationsbrennstoff. Anders als in heutigen Reaktoren ist der Kern eines Transmutationsreaktors nämlich unterkritisch. Dies bedeutet, dass in ihm nicht genügend Neutronen entstehen, um die Kettenreaktion aufrechtzuerhalten; dafür sorgen erst die zusätzlich hineingeschossenen Teilchen. Dies ist ein wichtiger Sicherheitsaspekt: Fällt der Beschleuniger aus, endet die Kettenreaktion automatisch.

Heute sind Transmutationsanlagen vom Typ ADS noch Zukunftsmusik. Tatsächlich müssten wir für ihre etwaige Realisierung in den nächsten Jahrzehnten noch mehrere große Herausforderungen bewältigen. Das gilt sowohl für die Entwicklung hochtemperaturfester Werkstoffe (siehe Kasten oben) und neuer Kühlmitteltechnologien (siehe Kasten S. 40) als auch für neue fluiddynamische Simulationsverfahren. Diese müssen präzise Vorhersagen darüber treffen, wie sich die neuartigen Materialien und Komponenten unter Bestrahlung und anderen erschwerten Betriebsbedingungen



Die Oberfläche des Stahls AISI 316L im Bild links hat sich nach 2000 Stunden, in denen sie einer 550 Grad Celsius heißen Blei-Wismut-Legierung ausgesetzt war, stark verändert. Der Sauerstoffgehalt der Legierung von 10^{-8} Gewichtsprozent war zu niedrig, als dass sich eine Schutzschicht hätte bilden können. Die Legierung drang daher in den Stahl ein und löste dort

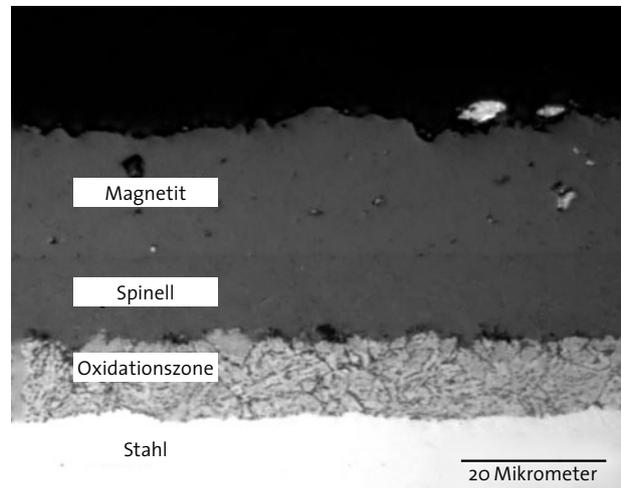
schichten stark einschränken. Aluminium scheint sehr geeignet: Beträgt seine Konzentration im Stahl mehr als fünf Gewichtsprozent, bilden sich dichte, dünne Aluminiumoxidschichten mit genau den gewünschten Eigenschaften.

Allerdings wird Stahl spröde, wenn man ihm Aluminium hinzufügt – das Element darf die Stahloberfläche also tatsächlich nur als dünne Schicht bedecken. Dazu wird im Vakuum eine Aluminiumlegierung wie FeCrAlY mit der Oberfläche verschmolzen, so dass eine feste Verbindung entsteht. An unserem Institut erlernt das die Gepulste Elektronenstrahlanlage GESA: Mit einem einzigen Puls energiereicher Elektronen kann sie eine Oberfläche bis zu einer Tiefe von 40 millionstel Metern umschmelzen.

verhalten. Auf dem Weg zur großtechnischen Demonstration einer vollständigen ADS-Anlage stehen zudem vielfältige Tests mit maßstabsgetreu verkleinerten Komponenten an.

Die Chancen und Risiken von P&T, aber auch generell von fortgeschrittenen Brennstoffkreisläufen wird man je nach Perspektive unterschiedlich bewerten. Für die Industrie stehen vor allem wirtschaftliche Fragen im Vordergrund, die Gesellschaft hingegen ist vor allem an Sicherheitsaspekten interessiert. Weil P&T die Menge an langlebigen radiotoxischen Elementen stark verringert, könnte das Verfahren dazu einen Beitrag liefern.

Viele Studien der letzten Zeit untersuchen, wie sich P&T auf geologische Endlagerkonzepte auswirken könnte. Zum einen verringert die Technik die endzulagernde hochradioaktive Abfallmenge auf etwa ein Fünftel. Die Menge an schwach und mittelradioaktivem Abfall wächst jedoch gleichzeitig um das Mehrfache an. Zum anderen verringert sich die Nachzer-



dessen Komponenten, insbesondere Nickel. Der Stahl Tg1 im Bild rechts war sogar 10 000 Stunden lang einer 550 Grad Celsius heißen Blei-Wismut-Legierung ausgesetzt. Der Sauerstoffgehalt der Legierung war allerdings 100-mal höher, so dass sich eine intakte Schutzschicht aus Magnetit (Fe_3O_4) und einem Spinell (FeCr_2O_4) ausbildete.

Bei Tests waren entsprechende Materialproben 10 000 Stunden lang bei einer Temperatur von 550 Grad Celsius in Blei-Wismut getaucht, ohne dass Sauerstoff in den Stahl eindrang. Weil die Aluminiumoxidschichten kaum dicker als ein millionstel Meter sind, behindern sie auch den Wärmeübergang nicht. Das hier am KIT entwickelte Verfahren schützt Metall sogar bis zu Temperaturen von etwa 650 Grad Celsius.

Georg Müller ist promovierter Physiker und leitet die Abteilung Hochleistungsimpulstechnik am Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) des Karlsruher Instituts für Technologie.

fallswärme, die nach 50 Jahren noch zu erwarten ist, auf rund ein Drittel. Dadurch sinkt der Raumbedarf in einem Endlager etwa um den Faktor neun, da sich der hoch radioaktive Abfall dichter lagern lässt. Die Reduktion der Aktinidenmenge bietet noch einen weiteren Vorteil. Bei der Errichtung von Endlagern müssen wegen ihrer langen Betriebszeit nämlich auch unwahrscheinlichere Ereignisse wie Änderungen der geochemischen Bedingungen, verbunden mit einer höheren Mobilität der Aktiniden – also ihrer Fähigkeit, bei eventuellen Lecks das umgebende Gestein zu durchdringen –, oder unbeabsichtigtes Eindringen von Menschen in Betracht gezogen werden. Genau diese Risiken sinken, wenn dort weniger Aktiniden lagern.

Trotz all dieser Sachargumente wird die Akzeptanz von P&T letztlich aber entscheidend davon abhängen, wie unsere Gesellschaft die mehrfache Rezyklierung des Brennstoffs sowie die Sicherheit der ADS-Anlagen bewertet. Voraussichtlich würde auch die Zahl der Transporte von radioaktivem

Flüssige Schwergewichte

Von Thomas Wetzel

Wie kühlt man eine Transmutationsanlage? Und woher kommen die schnellen Neutronen, die den Transmutationsprozess überhaupt erst in Gang setzen? Auf diese beiden Fragen, die auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun haben, lässt sich ein und dieselbe Antwort geben. Die Flüssigmetalllegierung Blei-Wismut kann zum einen als Kühlmittel und zum anderen als Neutronenquelle dienen.

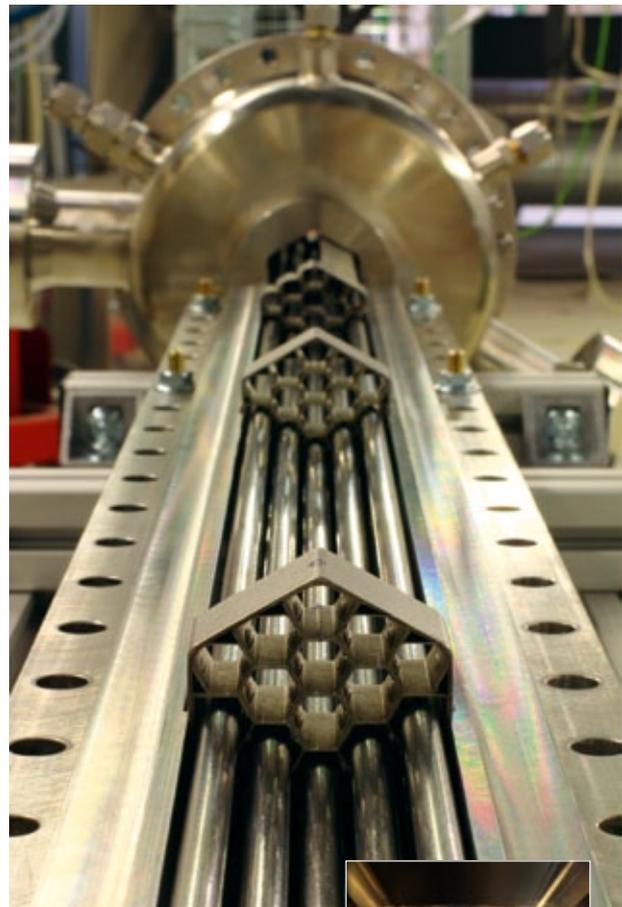
Ihre Funktion als Kühlmittel ist extrem wichtig. Beträgt die Wärmestromdichte – also die thermische Leistung, die auf einer bestimmten Oberfläche frei wird – im Fall einer heißen Herdplatte zirka sechs Watt pro Quadratcentimeter, liegt sie an der Oberfläche eines Transmutationselements bei etwa 100 Watt pro Quadratcentimeter oder noch darüber. Diese Wärme muss ein Kühlmittel kontinuierlich und effektiv abführen, damit die Temperaturen nicht über einige hundert Grad Celsius steigen. Nur dann lässt sich vermeiden, dass Strukturmaterialien wie Stahl während des Betriebs Schaden nehmen.

Flüssige Metalle sind eine technisch äußerst elegante Lösung zur Übertragung hoher Wärmeleistungen. Wärme leiten sie etwa 20-fach besser als Wasser, trotzdem lassen sie sich wie dieses pumpen, durch Ventile regeln und durch Rohrleitungen transportieren. Blei-Wismut als Material der Wahl für Transmutationsanlagen wird schon bei 125 Grad Celsius flüssig. Weil es nicht brennen kann und selbst unter Umgebungsdruck erst bei 1670 Grad Celsius verdampft, bietet es hohe Sicherheitsreserven.

Zugleich setzt Blei-Wismut beim Beschuss mit Protonen zahlreiche Neutronen frei, kann also als Spallationstarget dienen. Der Prototyp eines solchen Targets wurde bereits 2006 erfolgreich getestet. Damals führte eine internationale Forschergruppe am Schweizer Paul Scherrer Institut (PSI) das internationale MEGAPIE-Projekt (Megawatt Pilot Experiment) durch. Der Protonenstrahl der Anlage besaß eine Leistung von einem Megawatt. Die Protonen traten durch ein Strahlrohr, an dessen Ende ein halbkugelförmiges Strahlfenster aus Edelstahl saß. Dieses im Durchschnitt etwa 1,5 Millimeter dicke Fenster hatte einen Durchmesser von 20 Zentimetern und diente dazu, das im Strahlrohr und im Beschleuniger herrschende Vakuum vom Flüssigmetall zu isolieren.

Die hindurchfliegenden Protonen erhitzen es jedoch extrem stark. Als Kühlmittel diente wiederum das Flüssigmetall selbst. Es wurde kontinuierlich von Pumpen angetrieben, am Fenster vorbeibefördert und in Wärmetauschern wieder abgekühlt. Dabei kommt es auf eine geschickte Strömungsführung an – eine Spezialität der Entwickler des Flüssigmetalllabors KALLA (Karlsruhe Liquid Metal Laboratory), die für diesen Teil des MEGAPIE-Projekts verantwortlich waren.

Am KALLA findet auch die Grundlagenforschung statt, die helfen soll, das Transmutationselement sicher zu kühlen. Das



BEIDE FOTOS: IKT AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Dieses Modell eines Transmutationselements (oben) nimmt neun Brennstäbe auf. Am Karlsruher Flüssigmetalllabor KALLA dient es dazu, die Kühleigenschaften von Flüssigmetallen (rechts, beim Strömen durch eine Düse) zu untersuchen.



Foto oben zeigt ein elektrisch beheiztes Modell in Originalgröße, das erlaubt, Temperatur, Druck und Strömungsverhältnisse zu messen. Parallel dazu entwickeln die Forscher physikalische Modelle und Computersimulationen, um die Sicherheit einer Transmutationsanlage zu beurteilen.

Thomas Wetzel vom Institut für Thermische Verfahrenstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie ist Professor für Wärme- und Stoffübertragung und leitet das Karlsruher Flüssigmetalllabor KALLA.

Material zwischen Kernkraftwerken, P&T-Einrichtungen und dem Endlager steigen.

Bislang ist keine effektive Strategie bekannt, um auch die langlebigen Spaltprodukte wie Jod-129 (Halbwertszeit: 15,7 Millionen Jahre) und Technetium-99 (211100 Jahre) zu transmutieren. Denn die Wahrscheinlichkeit, dass es bei diesen Spaltprodukten durch Beschuss mit schnellen Neutronen zu den gewünschten Kernreaktionen kommt, ist sehr klein. Die entsprechenden Transmutationsraten würden bei nur drei bis vier Prozent liegen, so dass man die Elemente entsprechend häufig rezyklieren müsste. Mit thermischen Neutronen stiege die Transmutationsrate zwar. Doch weil die Spaltprodukte viele dieser Neutronen einfach einfangen würden, müssten die Verluste durch eine höhere Uran-235-Anreicherung im Brennstoff kompensiert werden. Dagegen sprechen aber Bestimmungen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) in Wien, welche die Obergrenze für die Anreicherung von Uran festlegen.

Festzuhalten bleibt: Auch P&T kann die Endlagerung von abgebranntem Kernbrennstoff in tiefen geologischen Formationen nicht ersetzen. Für die Prozessverluste, die unter anderem beim Partitioning anfallen, für die kurzlebigen Spaltprodukte und auch für die bereits verglasten hochradioaktiven Abfälle, die aus der Wiederaufarbeitung stammen, bleibt ein Endlager nach wie vor erforderlich. Allerdings könnte eine funktionsfähige P&T-Technologie im industriellen Maßstab Menge und Volumen der langlebigen hochradioaktiven Radionuklide künftig drastisch verringern.

Was geschieht nun als Nächstes? Im belgischen Forschungszentrum SCK-CEN (Studiecentrum voor Kernenergie – Centre d'Etudes de l'Énergie Nucléaire), das sich mit Fragen der Kernenergie beschäftigt, ist der Bau des rund eine Milliarde Euro teuren MYRRHA-Reaktors geplant. Dieser »hybride Vielzweck-Forschungsreaktor« soll etwa 85 Megawatt thermische Leistung erbringen. Erstmals koppeln Wissenschaftler darin einen Protonenbeschleuniger, ein Spallationstarget und ein unterkritisches Blanket zu einer vollständigen ADS-Anlage; gekühlt wird das System mit der Flüssigmetalllegierung Blei-Wismut. Hier werden sich unter anderem Transmutationsbrennstoffe und Hüllrohrmaterialien testen lassen.

Außerdem wird die weitere Entwicklung unter anderem davon abhängen, welche Strategien die Kernkraft nutzenden Länder weltweit verfolgen und welche Entscheidungen sie über die Reaktoren der so genannten 4. Generation treffen. Diese Reaktorkonzepte sind noch in Planung: Die Anlagen, die frühestens ab 2030 zum Einsatz kommen dürften, sollen unter anderem höhere Sicherheitsstandards erfüllen, wirtschaftlicher arbeiten und es ermöglichen, das nukleare Brennstoffmaterial besser auszunutzen und weniger Abfall zu produzieren.

Manche Länder wie Russland, China und Indien planen eine nachhaltige Entwicklung der Kernenergie, mit der sie Uranreserven schonen und die Abfälle zu minimieren suchen. Sie betrachten Plutonium als Wertstoff, den sie in erweiterten Brennstoffkreisläufen – wenn auch nicht unbedingt mit ADS-Anlagen – verwerten wollen. Dazu verfolgen

sie umfangreiche Ausbauprojekte und wollen ab 2040 bis 2050 schnelle Reaktoren der 4. Generation einsetzen. Andere Länder wie die USA, wo die Wiederaufarbeitung gegenwärtig verboten ist, werden diesen Schritt erst später gehen. Sie setzen weiterhin auf Leichtwasserreaktoren, zusätzlich aber auf die Reduzierung der Transurane. Diese könnte in ADS-Anlagen ebenso erfolgen wie in einigen anderen Reaktortypen der 4. Generation. Darüber hinaus ist es auch möglich, Plutonium in Leichtwasserreaktoren mehrfach zu rezyklieren. Für Länder wie Deutschland und Japan, die aus der Kernenergie aussteigen und vor allem die Endlagerproblematik im Blick haben, bietet sich schließlich an, sämtliche Transurane zu transmutieren.

De facto wird die Kernenergie in Zukunft weltweit zur Stromerzeugung genutzt werden. Zunehmend werden dabei Reaktoren der 4. Generation zum Einsatz kommen. Ihre hochgesteckten Ziele – mehr Sicherheit, größere Nachhaltigkeit, höhere Wirtschaftlichkeit – erreichen sie allerdings nicht von selbst. Erst wenn man sie in Kombination mit erweiterten geschlossenen Brennstoffkreisläufen betrachtet, können sie die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen. ~

DIE AUTOREN



Joachim Knebel ist Chief Science Officer im Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Im Mai 2011 wurde ihm von PRO EUROPA der Europäische Wissenschafts-Kulturpreis für seine Arbeiten zum Thema P&T verliehen. **Concetta Fazio** gehört dem KIT-Programm Nukleare Sicherheitsforschung (NUKLEAR) an, **Werner Maschek** ist Stellvertretender Institutsleiter am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) des KIT, und **Walter Tromm** ist Sprecher von NUKLEAR (von links nach rechts).

QUELLEN

Fazio, C. et al.: The MEGAPIE-TEST Project: Supporting Research and Lessons Learned in First-of-a-Kind Spallation Target Technology. In: Nuclear Engineering and Design 238, S. 1471–1495, 2008
Gompper, K. et al.: Actinoidenabtrennung aus hochradioaktiven Abfällen. In: Nachrichten aus der Chemie 58, S. 1015–1019, 2010
Knebel, J., Salvatores, M.: Partitioning & Transmutation (P&T), 2. März 2011, www.energie-fakten.de/pdf/p-und-t.pdf
Magill, J. et al.: Impact Limits of Partitioning and Transmutation Scenarios on Radiotoxicity of Actinides in Radioactive Waste. In: Nuclear Energy 42, S. 263–277, 2003
Salvatores, M., Palmiotti, G.: Radioactive Waste Partitioning and Transmutation within Advanced Fuel Cycles: Achievements and Challenges. In: Progress in Particle and Nuclear Physics 66, S. 144–166, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178937

Alchemie oder Alternative?

Die umstrittene Technik der Partitionierung und Transmutation (P&T) könnte die Mengen an radioaktivem Abfall aus der Kernkraft langfristig deutlich reduzieren. Damit würden auch weniger Endlager nötig. Doch für welche Staaten könnte P&T eine realistische Option sein? »Spektrum der Wissenschaft« fragte **Christoph Pistner**, Experte für Nukleartechnik und Anlagensicherheit im Darmstädter Büro des Öko-Instituts.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Dr. Pistner, Deutschland sitzt auf einer großen Menge nuklearen Mülls, auch wenn durch den beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie ein Ende der Anhäufung in Sicht kommt. Andere setzen weiterhin langfristig auf nukleare Stromerzeugung. Wie sollten sie mit dem dabei entstehenden Müll umgehen?

CHRISTOPH PISTNER: Die meisten Staaten gehen heute davon aus, dass sie die abgebrannten Brennelemente und hoch radioaktiven Abfälle in einem geologischen Endlager unterbringen, wo sie für Hunderttausende von Jahren von der Biosphäre abgeschirmt sind. Nach heutigen Erkenntnissen ist das auch das sinnvollste Vorgehen. Selbst ein Staat wie Frankreich, der die meisten abgebrannten Brennelemente wiederaufarbeitet, um Plutonium und Uran abzutrennen, benötigt ein geologisches Endlager. Denn nach der Wiederaufarbeitung bleiben Abfälle mit sehr hoher Radioaktivität und starker Wärmeentwicklung übrig, außerdem fallen große Mengen mittel- und schwach radioaktiver Abfälle an.

Jetzt kommt plötzlich das P&T-Verfahren daher und verspricht einen genialen Streich: Wir betreiben Alchemie und wandeln die radioaktiven Elemente in ungefährlichere Stoffe um. Wie ernst müssen wir diesen Ansatz nehmen?

PISTNER: In der Theorie klingt er sehr gut: Wir transmutieren die hoch radioaktiven Stoffe und haben zumindest einen Teil des Problems gelöst. Schwierig wird es, wenn man zur Praxis kommt. Man sieht dann sehr schnell, dass P&T, wenn die

Technik denn eines Tages funktionieren sollte, nur eine begrenzte Lösung bietet.

Allein Deutschland wird bis zum Ende des Betriebs seiner Reaktoren rund 15 000 Tonnen hoch radioaktiver Schwermetalle produziert haben. Etwa ein Drittel davon haben wir aber bereits in die Wiederaufbereitungsanlagen in Frankreich und Großbritannien geschickt. Was von dort an aufgearbeiteten und verglasten Abfällen wieder zurückkehrt, steht für P&T nicht mehr zur Verfügung – das wird endgelagert werden müssen. Hinzu kommt: Auch wenn man gegenüber der klassischen Wiederaufarbeitung weitere Aktiniden aus dem





ALLE FOTOS DES ARTIKELS: MARKUS PALZER

Christoph Pistner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter für Nukleartechnik und Anlagensicherheit am Öko-Institut Darmstadt. Als Mitglied des Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik der Reaktor-Sicherheitskommission berät er auch das Bundesumweltministerium. Darüber hinaus ist er Vorstandsmitglied von FONAS. Dieser Forschungsverbund fördert mathematische, natur- und technikwissenschaftliche Methoden, die zu Abrüstung, internationaler Sicherheit und internationalem Frieden beitragen. Pistner gehört darüber hinaus dem Facharbeitskreis Probabilistische Sicherheitsanalysen beim Bundesamt für Strahlenschutz an.

abgebrannten Brennstoff abtrennt, muss der verbleibende Abfall wegen der langlebigen Spaltprodukte darin für mehrere hunderttausend Jahre endgelagert werden. Die Isolation der Abfälle von der Biosphäre und die Auswahl eines geeigneten Endlagerstandorts erspart uns auch P&T nicht.

Europaweit stellt sich der mögliche Nutzen von P&T aber anders dar.

PISTNER: Da sind die Müllmengen natürlich viel größer. Neben Deutschland benötigen Länder wie Schweden, Finnland, die Schweiz, Großbritannien und Frankreich auf jeden Fall ein geologisches Endlager. Wenn Frankreich nicht rasch aussteigt, braucht man dort schon bald ein zweites. Ob Länder wie Belgien oder die Niederlande, die Kernenergie in geringerem absolutem Umfang genutzt haben, jeweils ein eigenes Endlager bauen, ist noch offen. Dies wird vor allem davon abhängen, ob gemeinsame Endlager für kleinere Länder in absehbarer Zeit politisch und gesellschaftlich durchsetzbar sein werden. Momentan zeichnet sich das nicht ab.

Sinkt durch P&T nicht die Zahl der nötigen Endlager?

PISTNER: Möglicherweise könnte man sie dichter befüllen, weil P&T die Wärmelast reduziert. Dann bräuchte man in der Summe womöglich weniger Endlager. Doch was kann P&T erreichen? Während der ersten rund 50 Jahre, nachdem ein Brennelement aus dem Reaktor entladen worden ist, dominieren bei der Wärmeleistung Spaltprodukte mit Halbwertszeiten von etwa 30 Jahren. Die sollen aber gar nicht transmu-

tiert werden. Es stellt sich dann eher die Frage, wie lange man den abgebrannten Brennstoff zwischenlagert, bevor er in ein Endlager kommt. Der zusätzliche Nutzen durch die Reduzierung des Aktinidenanteils ist dann nicht mehr so groß.

Man kann die Frage also so formulieren: Lohnen der Aufwand und die mit P&T verbundenen Risiken wie etwa der Betrieb zusätzlicher Reaktoren, wenn die Technik allenfalls die Zahl der Endlager in Europa reduziert, von beispielsweise acht auf sieben oder sechs?

Betrachten wir P&T versuchsshalber als Option. Was würde als Nächstes geschehen?

PISTNER: Zum einen müssten wir grundlegend neue chemische Verfahrensschritte entwickeln, die an die heutige Wiederaufarbeitung anschließen und auch die minoren Aktiniden aus dem Brennstoff abtrennen.

Das ist also ein rein technisches Problem?

PISTNER: Was heißt schon rein technisch? Schließlich ermöglicht schon die klassische Wiederaufarbeitung den Zugriff auf Plutonium; diese Technik steht daher immer in engem Zusammenhang zur Weiterverbreitung von Kernwaffen. Zudem ist sie nicht nur politisch höchst umstritten. Die abgebrannten Brennelemente müssen zunächst einmal zerlegt werden, wobei sich einige Spaltprodukte erfahrungsgemäß nicht komplett zurückhalten lassen. Technetium oder Jod gelangen dabei in relevanten Mengen in die Umwelt. Und im Austausch dafür, dass das Volumen der hoch radioaktiven Abfälle

sinkt, erhält man relativ große Mengen an schwach und mittelradioaktiven Abfällen. Genau diese unvermeidbaren Sekundärabfälle werden auch beim Partitionieren die Gesamtleistung des Systems wesentlich mitbestimmen.

Die sich für P&T anschließenden Verfahrensschritte werden dann sukzessive komplizierter. Unter anderem muss man die Aktiniden von den Lanthaniden trennen, was schwierig ist, weil sie sich chemisch stark ähneln. All dies findet zudem unter extremen Bedingungen von Radioaktivität und Hitze statt.

Wenn aber alles klappt, soll die vom Atommüll ausgehende Gefahr schon nach einigen hundert Jahren deutlich reduziert sein.

PISTNER: Oft zieht man einen Radiotoxizitätsindex heran, der die Gefährlichkeit der radioaktiven Abfälle im Vergleich zu Natururan angeben soll. Dieser Index sinkt, wenn man die Menge an Aktiniden verringert. Doch er bildet gar nicht die Gefährdung aus einem realen Endlager ab, weil er unterstellt, dass das gesamte Inventar freigesetzt wird und in die Nahrungskette gelangt. Dabei ignoriert er aber sämtliche Aspekte, die für die tatsächliche Freisetzung von Radionukliden aus Endlagern relevant sind.

Nämlich?

PISTNER: Aus Langzeitsicherheitsstudien weiß man, dass bei den meisten Endlagerkonzepten die mögliche Freisetzung von Aktiniden eine relativ kleine Rolle spielt. Sie kämen nicht besonders weit, auch wenn man annimmt, dass Wasser unkontrolliert in ein Endlager eindringen würde. Anders die langlebigen Spaltprodukte wie Selen-79, Jod-129 oder Technetium-99 sowie Aktivierungsprodukte wie Chlor-36. Die sind geochemisch relativ mobil, kehren also leichter wieder in die Biosphäre zurück. Ihr Anteil am Atommüll ist zwar gering, aber wegen ihrer Halbwertszeiten von Hunderttausenden und Millionen von Jahren dominieren sie, falls sie freigesetzt werden, die Strahlendosis. Diese Nuklide müssten daher vorrangig transmutiert werden, was aber die meisten

vorgeschlagenen P&T-Verfahren gar nicht vorsehen. Endlager bleiben darum unumgänglich.

Sind die Probleme so groß, dass wir die Erforschung von P&T einstellen sollten?

PISTNER: Dass wir unsere Kompetenzen in der Kerntechnik erhalten, bleibt natürlich trotz Ausstiegsszenario wichtig. Manche der mit P&T verknüpften Fragen sind auch in anderen Zusammenhängen interessant. Wie mobil sind Aktiniden in einem Endlager? Welche Freisetzungswegen sind denkbar? Außerdem brauchen wir Experten, um über die Sicherheit künftiger Reaktoren und über den Rückbau bestehender Anlagen zu wachen. Man müsste klären, inwieweit P&T-Forschung indirekt zur Lösung dieser Fragen beitragen kann oder ob man die Forschungsgelder nicht besser direkt in ihre Beantwortung investiert.

Wäre P&T ökonomisch sinnvoll?

PISTNER: Transmutationsreaktoren werden natürlich auch Strom produzieren, aber nicht für hohe Effizienz in der Stromproduktion optimiert sein. Kommt ein Beschleuniger zum Einsatz, wird auch der viel Strom benötigen. Darüber hinaus verursachen Partitionierung und wiederholte Wiederaufarbeitung und Brennstoffherstellung erhebliche Kosten. Insgesamt wird die Technik daher deutlich teurer sein als heutige Leichtwasserreaktoren. Auch das ökonomische Argument hilft also nicht wirklich weiter. Alles läuft immer auf die Bewertung heraus: Lohnt der ganze Aufwand für Partitionierung und Transmutation, wenn man damit allenfalls die Zahl der Endlager etwas reduziert?

Die Reaktorsicherheit wird aber doch ebenfalls erhöht.

PISTNER: In jedem Fall steigt mit P&T die Anzahl von Reaktoren und damit die Wahrscheinlichkeit für schwere Störfälle. Offen bleibt zudem, ob diese Anlagen wirklich sicherer wären. Mit der wachsenden Komplexität nimmt ihre technische Anfälligkeit sehr stark zu. Auch die Forschungsprogramme zu schnellen Brütern, die viele große Industrie-



»Lohnt der ganze Aufwand für Partitionierung und Transmutation, wenn man damit allenfalls die Zahl der Endlager etwas reduziert?«



Nuklearexperte Christoph Pistner (Mitte) im Gespräch mit den »Spektrum«-Redakteuren Thilo Körkel (links) und Reinhard Breuer.

nationen aufgelegt hatten, sind aus technischen, sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Gründen mittlerweile weitgehend zum Erliegen gekommen.

Transmutationsreaktoren würden mit schnellen Neutronen, die durch einen Beschleuniger erzeugt werden, und einer Flüssigmetallkühlung arbeiten. Mit beidem gibt es kaum großtechnische Erfahrungen. Auch müssen die Forscher Brennstoffe erst einmal über Jahre hinweg erproben und natürlich auch die möglichen Unfallszenarien durchspielen. Zudem bedarf es jeweils mehrerer P&T-Zyklen, um eine bestimmte Menge Brennmaterial zu transmutieren, da in jedem Zyklus nur ein Teil der Nuklide gespalten wird. Hinzu kommt das Problem, dass auf Brennelemente in nächster Umgebung der zentralen Neutronenquelle mehr Neutronen treffen als auf weiter entfernte. Daher muss man die Elemente regelmäßig neu gruppieren. Durch solche Effekte kommen ganz neue Fragen auf die Ingenieure zu. Selbst der Beschleuniger ist ein kritisches Element.

Die Technologie von Protonenbeschleunigern ist doch bewährt.

PISTNER: Das schon. Für Forschungsanlagen reicht das auch aus. Aber für einen Transmutationsreaktor müssen solche Beschleuniger über viele Monate, ja Jahre hinweg konstant laufen. Jeder Strahlabriss entspricht einer Reaktorschnellabschaltung und belastet die Struktur des Reaktorkerns thermisch und mechanisch. Das muss bei der Auslegung und den Wartungsintervallen berücksichtigt werden. Auch sonst gibt es viel zu bedenken. Trifft ein Strahl die Strukturen des Beschleunigers, reduziert das deren Lebensdauer. Je mehr Reparaturen fällig werden, desto höheren Dosisleistungen ist wiederum das Personal ausgesetzt. Probleme oder Herausforderungen gibt es also reichlich, auch wenn der Realisierung bislang kein echter Show Stopper im Weg zu stehen scheint.

Angenommen, die Ingenieure werden mit all dem fertig. Wie viele dieser Anlagen bräuchte man denn?

PISTNER: Da sind nur grobe Abschätzungen möglich. Auf rund 20 Reaktoren, wie sie insgesamt in Deutschland betrieben wurden, würden vielleicht drei bis fünf Transmutationsreaktoren kommen, die dann ihrerseits zwei Reaktorgenerationen lang in Betrieb wären. Entsprechend wären für die rund 200 Reaktoren europaweit 30 bis 50 große Anlagen notwendig. In jedem Fall ist P&T nur dort sinnvoll, wo auch langfristig Kernenergie genutzt werden soll.

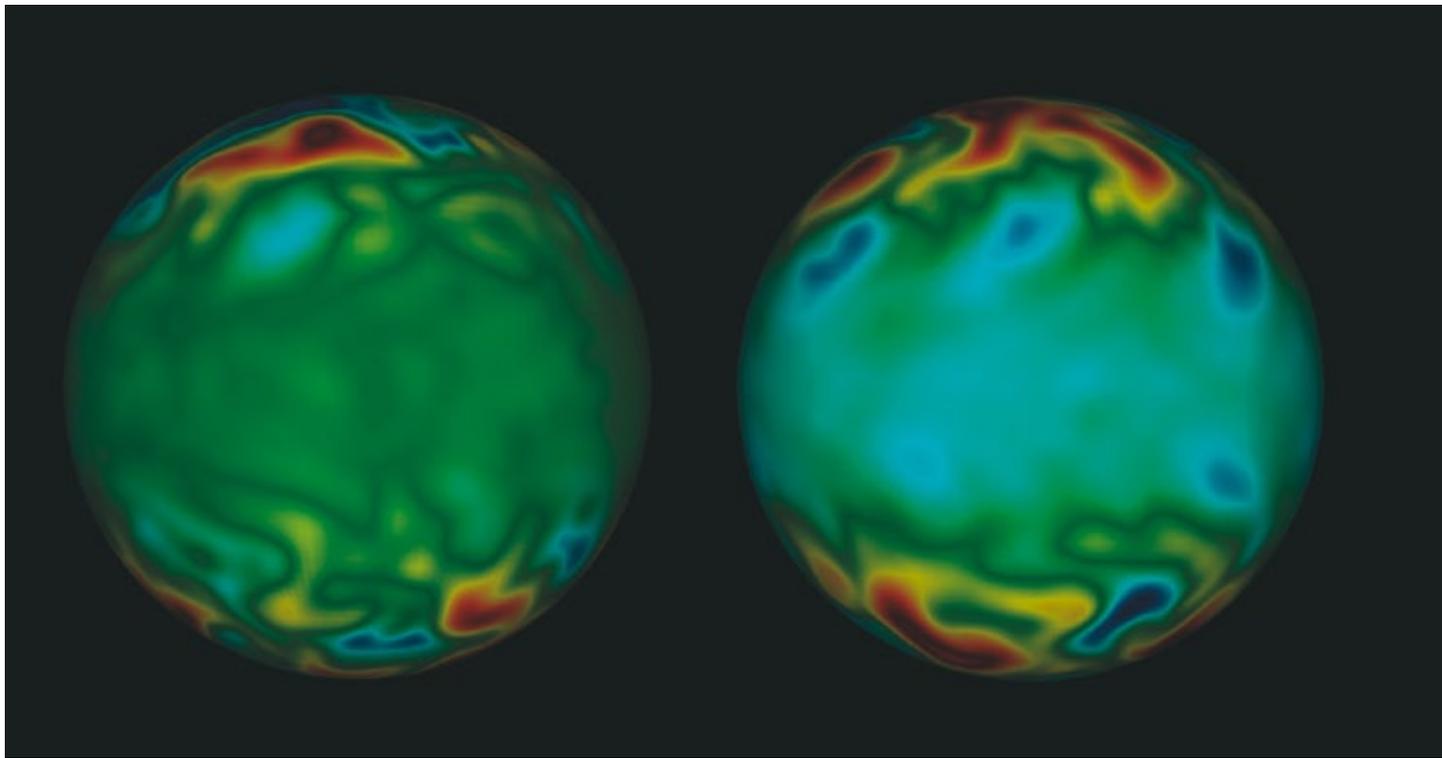
Was prognostizieren Sie für die nähere Zukunft?

PISTNER: Die Inbetriebnahme eines ersten großtechnischen Transmutationsreaktors werden heutige Ingenieure wohl nicht mehr erleben. Schon ein Zeitpunkt in 40 oder 50 Jahren scheint mir sehr ambitioniert. Erst einmal steht die Machbarkeitsprüfung des Konzepts durch die belgische Demonstrationsanlage Myrrha an. Ob die Erforschung von P&T generell sinnvoll ist, lässt sich aus heutiger Sicht noch kaum beantworten. Man kann sich nicht auf ein einziges großes Argument zurückziehen, sondern muss alle Aspekte berücksichtigen. Und natürlich muss auch die Politik entscheiden, ob sie die Investitionen überhaupt erbringen will. Heutigen Energieversorgern erscheint die Transmutation jedenfalls zu vage, als dass sie Geld dafür ausgeben würden.

Was heißt das konkret?

PISTNER: P&T ist längst nicht so weit, dass es unsere heutige Energiepolitik beeinflussen könnte. Das lässt sich auch daran ablesen, dass praktisch alle Staaten, die auf Kernkraft setzen, derzeit keine praktikable Alternative zur Endlagerung sehen. Was daher auf keinen Fall passieren darf, ist, dass sich die heutige Generation mit dem Verweis auf eine vage Hoffnung der unangenehmen Pflicht entledigt, ein Endlager zu finden. Selbst der optimistischste P&T-Forscher sollte wissen, dass daran kein Weg vorbeiführt. ~

Das Gespräch führten die »Spektrum«-Redakteure Thilo Körkel und Reinhard Breuer.



EXOPLANETEN

Das Klima auf fremden Welten

Astronomen genügt es nicht mehr, weitere Planeten in fernen Sonnensystemen zu entdecken. Sie wollen auch deren Atmosphären untersuchen. Obwohl sie ihre Information aus winzigen Lichtpunkten am Himmel gewinnen müssen, lassen erste Erfolge aufhorchen.

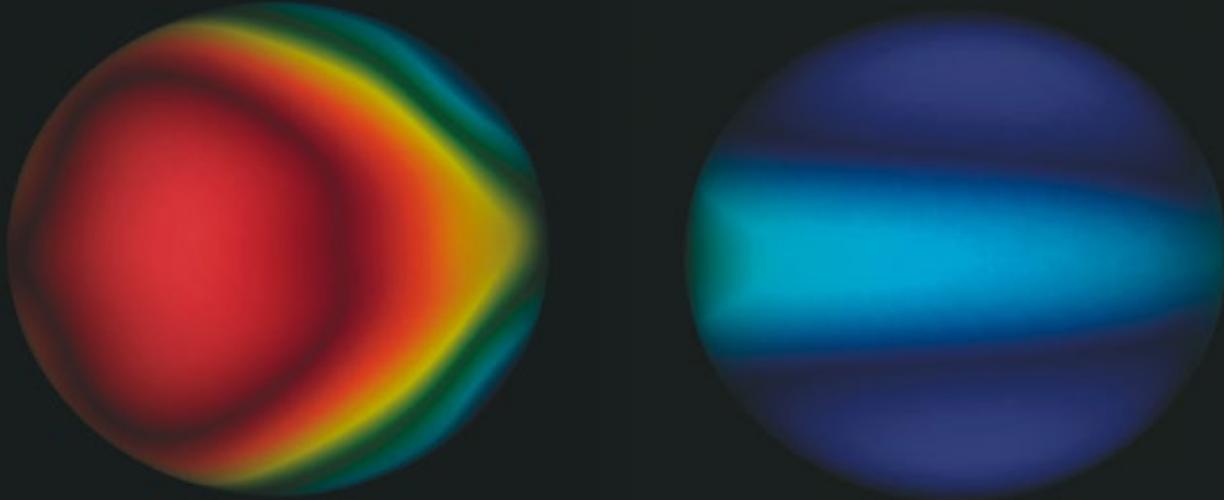
Von Kevin Heng

Weit über 800 Planeten außerhalb unseres Sonnensystems sind schon bekannt. Und allein das Weltraumteleskop Kepler hat seit seinem Start im März 2009 mindestens 2300 weitere Kandidaten aufgespürt. Für einige davon konnten andere Forscher schon bestätigen, dass es sich tatsächlich um Exoplaneten handelt.

Die rasant wachsenden Zahlen zeigen: Die Entstehung von Planeten ist offenbar eher die Regel als die Ausnahme. Und vielleicht haben wir erst die Spitze des Eisbergs entdeckt. Eine statistische Analyse der Kepler-Daten deutet sogar darauf hin, dass rund ein Drittel aller sonnenähnlichen

Sterne in der Milchstraße mindestens einen erdähnlichen Planeten besitzt, auf dem dauerhaft flüssiges Wasser und damit erdähnliches Leben existieren könnte.

Bislang ließen sich allerdings nur vier Exoplanetensysteme direkt abbilden. Meist überstrahlt das helle Leuchten der Sterne das von den Planeten ausgehende Licht, so dass Wissenschaftler auf indirekte Verfahren zurückgreifen müssen. Das wichtigste ist die Transitmethode, die auch Kepler nutzt. Weil die Bahnen von Planeten ganz unterschiedlich im Raum orientiert sein können, liegen sie zuweilen so, dass die Bahnebene genau in unserer Blickrichtung liegt. Dann ziehen die Planeten von der Erde aus gesehen bei jedem Umlauf einmal



KEVIN HENG

Noch können Astronomen nur davon träumen, Exoplaneten so detailliert zu betrachten. Diese Bilder wurden mit Computersimulationen gewonnen. Auf der linken Seite sind die beiden Hemisphären eines erdähnlichen Planeten mit einer mittleren Atmosphärentemperatur von rund 30 Grad Celsius zu sehen. Rechts ist die Tagseite (rötlich) und die Nachtseite (bläulich) eines »heißen Jupiters« dargestellt, der seinem Stern stets dieselbe Seite zuwendet. In die Berechnung der temperaturkodierte Falschfarnebilder ging nur der infrarote Teil der Strahlung ein.

vor ihrem Stern vorüber. Primäre Bedeckung oder Transit nennen die Forscher ein solches Ereignis.

Um solche periodischen Vorgänge zu entdecken, bei denen der Planet einen kleinen Teil seines Sterns verdeckt und dessen Helligkeit dadurch geringfügig abschwächt, überwacht Kepler die Helligkeiten von rund 150 000 Sternen. Das Weltraumteleskop kreist dabei nicht um unseren Planeten, sondern auf einer eigenen Bahn um die Sonne – mit leicht veränderter Umlaufzeit und Exzentrizität des Orbits im Vergleich zur Erde –, damit die schwachen Signale nicht durch irdische Einflüsse gestört werden.

Inzwischen gelang es Astronomen sogar, sekundäre Bedeckungen zu messen; dabei ziehen die Planeten *hinter* ihren Sternen vorbei. Verglichen mit einem Transit variiert die Intensität des Sternlichts dabei noch viel weniger. Im Infraroten, in dem Exoplaneten typischerweise am hellsten strahlen, beträgt die Abschwächung nur wenige Promille und im Bereich des sichtbaren Lichts sogar noch weniger. Während einer sekundären Bedeckung empfängt das Teleskop nur noch die Strahlung des Sterns, es misst also das reine Sternspektrum. Subtrahiert man dieses vom Gesamtspektrum, das gemessen wird, wenn gerade keine Bedeckungen oder Transits stattfinden, ergibt sich das Spektrum des Planeten.

Erstmals konnte so die von Exoplaneten emittierte Strahlung direkt nachgewiesen werden.

Spektrale Information lässt sich aber auch bei Transits gewinnen. Während der Bedeckung eines Sterns durch einen Planeten durchquert die Strahlung auch die planetare Atmosphäre. Im Verlauf dieser so genannten Transmission wird sie teilweise absorbiert, und zwar abhängig von der Wellenlänge unterschiedlich stark. Emissions- und Transmissionsspektren

AUF EINEN BLICK

ATMOSPHÄRENFORSCHUNG JENSEITS DES SONNENSYSTEMS

1 Nachdem Astronomen bereits über **800 Planeten in anderen Sternsystemen** entdeckt haben, wollen sie nun auch etwas über das dort jeweils herrschende **Klima** lernen.

2 Die Verfahren der **extrasolaren Meteorologie** erscheinen viel versprechend. Mit ihrer Hilfe haben Forscher **Windgeschwindigkeiten, Temperaturen und chemische Zusammensetzung** der Atmosphären von Exoplaneten vermessen.

3 Auf diese Weise könnten sie eines Tages auch herausfinden, ob einige dieser **Himmelskörper lebensfreundlich** sind.



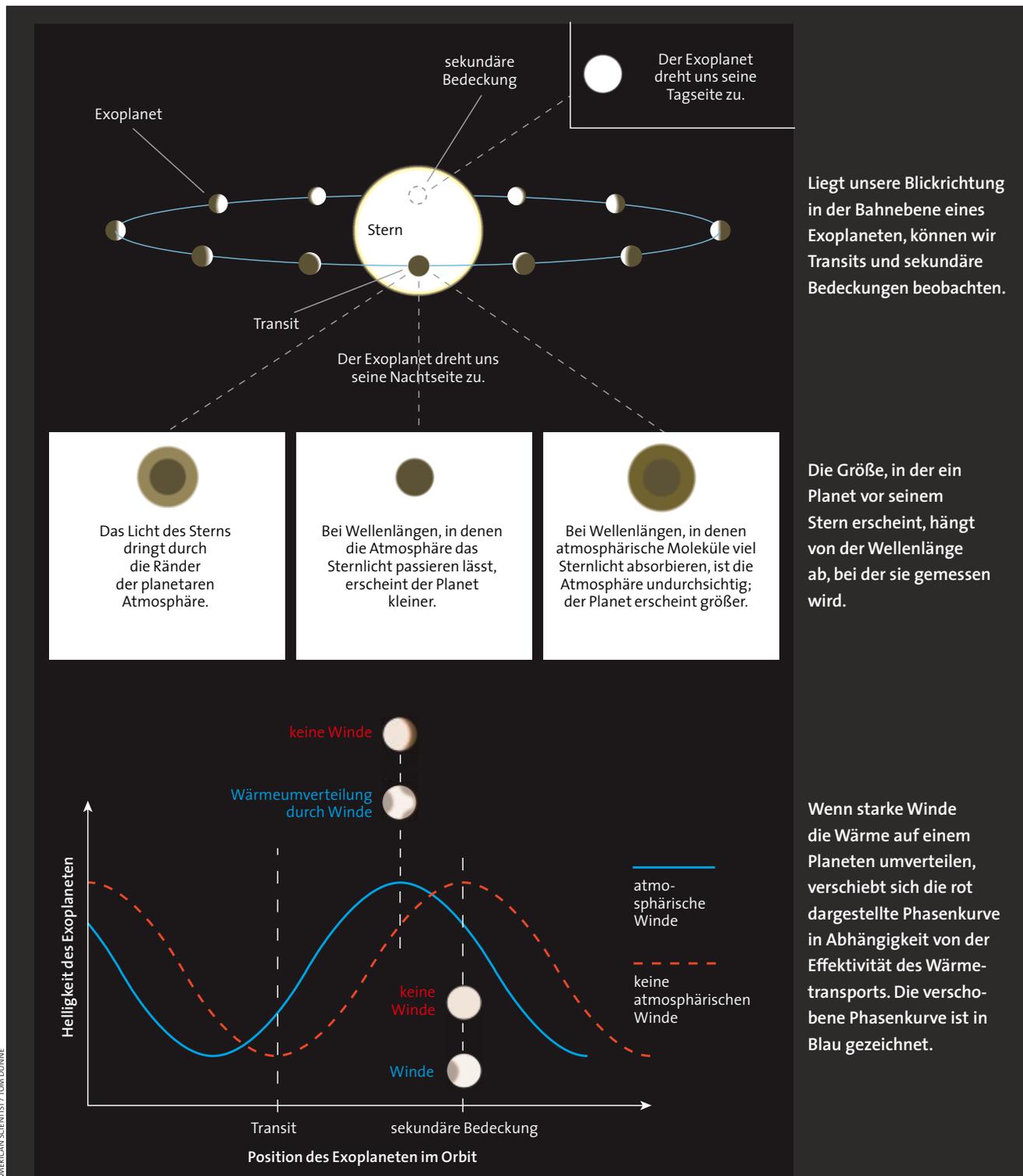
MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Exoplaneten« finden Sie unter
www.spektrum.de/exoplaneten

erlauben Rückschlüsse auf Temperatur, chemische Zusammensetzung und Elementhäufigkeiten in der Atmosphäre.

Selbst die geografische Verteilung der Temperaturen enträtseln Forscher mittlerweile. Dabei hilft die so genannte Phasenkurve, also der Verlauf der Helligkeit eines Exoplaneten während des Umlaufs um seinen Stern. 2007 veröffentlichten Heather Knutson von der Harvard University und ihre Kollegen eine erste solche »Karte« des 60 Lichtjahre ent-



Liegt unsere Blickrichtung in der Bahnebene eines Exoplaneten, können wir Transits und sekundäre Bedeckungen beobachten.

Die Größe, in der ein Planet vor seinem Stern erscheint, hängt von der Wellenlänge ab, bei der sie gemessen wird.

Wenn starke Winde die Wärme auf einem Planeten umverteilen, verschiebt sich die rot dargestellte Phasenkurve in Abhängigkeit von der Effektivität des Wärmetransports. Die verschobene Phasenkurve ist in Blau gezeichnet.

AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNN

fernten Planeten HD 189733b. Sie ist noch eindimensional und zeigt lediglich die Strahlungsintensität im Infraroten abhängig vom Längengrad. Auffallend ist ein deutliches Temperaturmaximum auf der Tagseite dieses so genannten heißen Jupiters. Es befindet sich allerdings nicht dort, wo der Stern von diesem Planeten aus gesehen am höchsten steht, sondern um 30 Längengrade versetzt.

Nick Cowan von der Northwestern University und Eric Agol von der University of Washington können mit einem so genannten Inversionsverfahren sogar eine zweidimensionale Karte des Planeten im Infraroten rekonstruieren. Dabei »übersetzen« sie die Phasenkurve in eine Art Helligkeitskarte als Funktion von Breiten- und Längengrad. Cowan, Agol und Carl Majeau demonstrierten das Verfahren Anfang 2012 erfolgreich bei dem Planeten HD 189733b. Mit anderen Worten: Wir haben begonnen, Exoplaneten zu kartografieren!

Das Licht des Sterns verrät die Existenz von Planeten, die ihn umkreisen

Die ersten Planeten bei anderen Sternen fanden Astronomen allerdings nicht mit der Transitmethode, sondern mit dem Radialgeschwindigkeitsverfahren. Streng genommen dreht sich ein Planet nicht um seinen Stern, vielmehr kreisen beide um ihren gemeinsamen Massenschwerpunkt. Da Sterne sehr viel mehr Masse besitzen als Planeten, liegt dieser Schwerpunkt zwar zumeist im Inneren des Sterns, trotzdem führt auch der Stern eine periodische Bewegung durch. Diese lässt sich im Spektrum des Sterns nachweisen: Bewegt er sich, während er Licht abstrahlt, »radial« auf uns zu – entlang der Verbindungslinie Erde-Stern –, werden die Lichtwellen durch den so genannten Dopplereffekt gestaucht und im umgekehrten Fall gezerrt. So verrät das Sternlicht die Existenz eines Planeten.

Mit diesem Verfahren machten die Forscher verblüffende Entdeckungen. Sie stießen auf Planeten, die größer sind als Jupiter, aber ihren Stern binnen weniger Tage auf Umlaufbahnen umkreisen, die gerade einmal ein Zehntel bis ein Hundertstel eines Erdbahnradius betragen. Je nach Stern und Bahnradius liegt die Oberflächentemperatur solcher heißen Jupiter bei 1000 bis 3000 Kelvin. Die Theoretiker hatten solche Objekte weder vorhergesagt noch konnten sie ihre Existenz anschließend erklären. Für Atmosphärenforscher kamen sie hingegen wie gerufen: Heiße Jupiter wurden dank ihrer vergleichsweise hohen Temperatur und damit intensiven Infrarotstrahlung zu ihren ersten Untersuchungsobjekten.

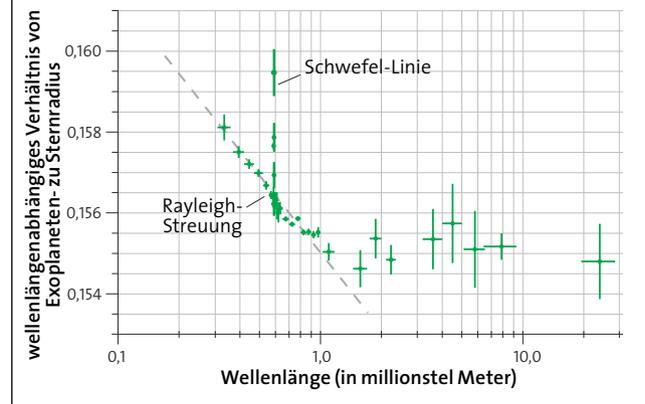
Kombiniert man die Radialgeschwindigkeitsmethode mit der Transitmethode – aus ersterer geht die Masse, aus letzterer die Größe des Planeten hervor –, lässt sich auch die Massendichte eines Planeten berechnen. Im Fall eines heißen Jupiter liegt sie demzufolge bei etwa einem Gramm pro Kubikzentimeter. Der Wert stimmt gut mit der Annahme überein, dass in der Atmosphäre des Gasplaneten molekularer Wasserstoff dominiert, und nährt damit die Hoffnung der Forscher, dass sich in der Atmosphäre die Zusammen-

setzung der Gaswolke widerspiegelt, aus der der Planet einst entstand – anders als im Fall der Erde, wo sie durch geologische Prozesse verändert wurde.

Heiße Jupiter besitzen eine weitere Eigenheit. Die Gezeitenreibung zwingt einen Planeten auf enger Umlaufbahn allmählich in eine so genannte gebundene Rotation: Eine Hemisphäre zeigt permanent auf den Zentralstern, während die andere in dauernder Dunkelheit liegt. Astronomen

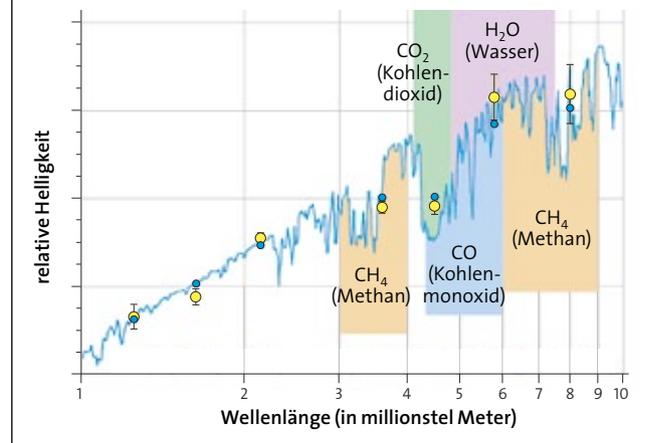
HD 189733b

Im Spektrum des heißen Jupiters sind Anzeichen für Rayleigh-Streuung zu sehen, wie sie auch für die blaue Farbe der Erdatmosphäre verantwortlich ist. Die schmale Absorptionslinie von Schwefel deutet auf die Anwesenheit des Elements hoch in der Atmosphäre hin. Der Planet ist vermutlich in einen Dunst unbekannter Zusammensetzung gehüllt.



WASP-12b

Die Hauptbestandteile der Atmosphäre des stark aufgeblähten Planeten scheinen Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasserdampf zu sein. Dies fanden Forscher heraus, indem sie ein Modellspektrum entwickelten (blaue Kurve), das zu den gemessenen Werten (gelbe Punkte) passte.



ist dieses Phänomen bislang nur im Zusammenhang mit Monden in unserem Sonnensystem vertraut – doch die kreisen nicht um strahlende Sterne. Theoretiker können nun erstmals genauer untersuchen, wie sich der Effekt auf die atmosphärische Zirkulation eines Planeten auswirkt.

Außerdem kann man den Himmelskörpern Informationen über die dort wehenden Winde entlocken. Die Theorie lässt im einfachsten Fall erwarten, dass die Phasenkurve bei den am intensivsten angestrahlten heißen Jupitern, die sich auf sehr engen Bahnen in gebundener Rotation befinden, sinusförmig verläuft. Das Minimum der Kurve würde dem Transit, das Maximum der sekundären Bedeckung entsprechen (siehe Grafik S. 48 oben). Die von Knutson und ihren Kollegen bei HD 189733b nachgewiesene Verschiebung des Maximums im Infrarotbereich deutet daher auf starke Winde hin, die Wärme entlang der Längengrade von der Tagseite des Planeten auf dessen Nachtseite transportieren. Ähnliche Verschiebungen fanden etwa Ian Crossfield von der University of California at Los Angeles und seine Kollegen bei Ypsilon Andromedae b, Cowans Team selbst wurde bei WASP-12b fündig.

Ignas Snellen von der Universität Leiden und seinen Kollegen gelang es mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte und mit Hilfe der Absorptionsspektroskopie sogar, die Windgeschwindigkeit auf dem heißen Jupiter HD 209458b zu messen. Dafür untersuchten sie zu-

nächst, wie sich die Größe des Planeten scheinbar verändert, je nachdem, bei welchen Wellenlängen man ihn beobachtet. Werden nämlich diese Wellenlängen von atmosphärischen Atomen oder Molekülen besonders gut absorbiert, lässt dies den Planeten größer wirken (siehe Grafik S. 48 Mitte). Da die genaue Lage der Absorptionslinien infolge des Dopplereffekts von der Geschwindigkeit abhängt, mit der sich die Gase bewegen, können die Astronomen aus der Wellenlängenabhängigkeit der Planetengröße letztlich auf die Windgeschwindigkeit schließen.

Die Winde wehen mit 100-mal größeren Geschwindigkeiten als auf der Erde

Snellens Team ist es tatsächlich gelungen, geringe Verschiebungen der Wellenlänge einer Absorptionslinie von Kohlenmonoxid aufzuspüren und über einen längeren Zeitraum hinweg zu überwachen. So ermittelten die Forscher eine Windgeschwindigkeit von etwa 7200 Kilometer pro Stunde, gut 100-mal höher als typische irdische Werte.

Solche Entdeckungen an der Grenze des heute technisch Machbaren markieren nichts weniger als den Beginn der extrasolaren Meteorologie. Trotzdem ist Vorsicht angebracht, wenn wir Erkenntnisse aus unserem eigenen Sonnensystem einfach auf fremde Planeten übertragen. Einer der Gründe liegt in den unterschiedlichen Temperaturen. Atmosphären lassen sich durch zwei charakteristische Längenskalen beschreiben. Die eine ist die Rhines-Länge, die typische Breite der von Osten nach Westen wehenden Jetströmungen. Die andere ist die Rossby-Länge, die typische Größe von atmosphärischen Wirbeln. Auf Himmelskörpern in unserem Sonnensystem sind diese Längen stets kleiner als die Radien der Planeten. Auf Exoplaneten in engen Umlaufbahnen gilt dies wegen der hohen Temperaturen aber nicht, hier sind Längen und Radien vergleichbar groß. Atmosphärische Strukturen erstrecken sich daher stets über den gesamten Planeten, wie inzwischen auch Computersimulationen gezeigt haben. Darum muss zum Beispiel auch die globale Durchmischung atmosphärischer Bestandteile und ihr Einfluss auf das Spektrum genauer untersucht werden.

Anders als von den Planeten im Sonnensystem besitzen wir von Exoplaneten aber keine hoch aufgelösten Aufnahmen. Auch in absehbarer Zukunft wird es eine Herausforderung bleiben, aus den spektralen Informationen einer punktförmigen Quelle am Nachthimmel und ihren zeitlichen Veränderungen ein räumliches Bild zu gewinnen. Beim Interpretieren und Modellieren der wenigen Daten, die sich über die hochkomplexen Systeme gewinnen lassen, wird

Mit Computersimulationen der Oberfläche eines heißen Jupiters lassen sich Karten der dort herrschenden Temperatur und Windgeschwindigkeit erstellen (Grafik oben). Starke Winde sorgen dafür, dass der Punkt maximaler Infrarotabstrahlung des Exoplaneten gegenüber dem Punkt verschoben ist, wo die Einstrahlung des Sterns den höchsten Wert besitzt (Diagramm unten).

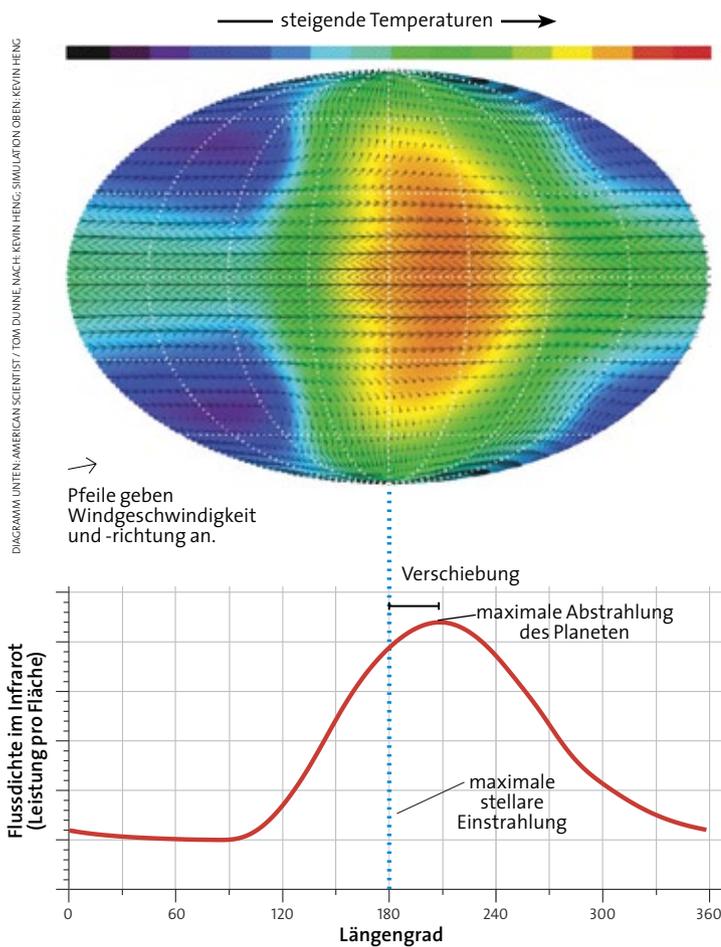


DIAGRAMM UNTEN: AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNIE; NACH: KEVIN HENG; SIMULATION OBEN: KEVIN HENG

Wenn einzelne Exoplaneten nur wenig Information preisgeben, kann es hilfreich sein, viele davon zu untersuchen. Das Weltraumteleskop Kepler (Bild) hat der NASA zufolge bis Dezember 2012 schon 2321 mögliche Kandidaten für Exoplaneten entdeckt – und ständig kommen neue hinzu.

man auf viele mögliche Erklärungen stoßen, zwischen denen sich nicht ohne Weiteres entscheiden lässt. In solchen Fällen greifen Wissenschaftler zu einem bewährten wissenschaftstheoretischen Prinzip, nämlich zu »Ockhams Rasiermesser«: In Abwesenheit weiterer und besserer Daten gilt die einfachste Erklärung als die beste. Aus dieser Vorgehensweise ergibt sich allerdings auch, dass wir unsere wissenschaftlichen Erwartungen und Vorstellungen im Licht neuer Daten immer wieder anpassen müssen.

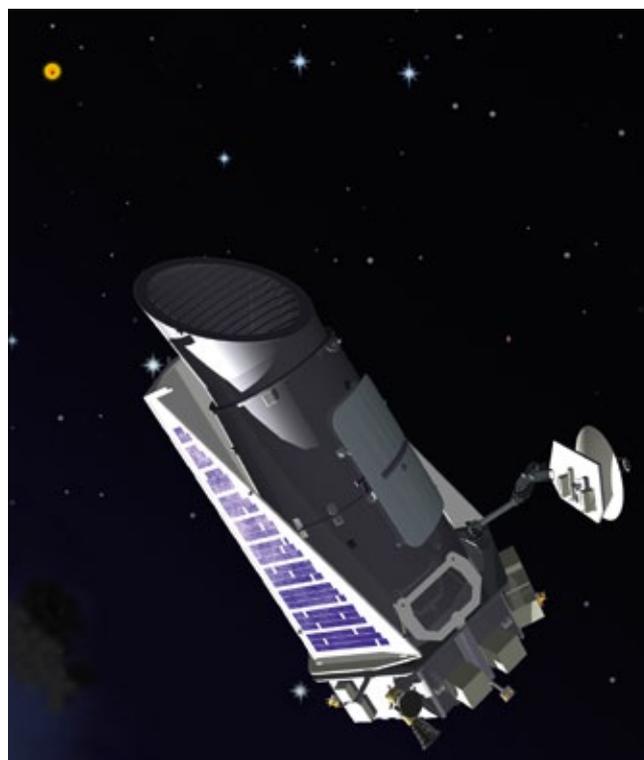
Hierarchie theoretischer Modelle

Atmosphärenstudien im Sonnensystem zeigen, dass positive und negative Rückkopplungen in diesen komplexen Systemen zu physikalischen und chemischen Veränderungen auf vielen sehr unterschiedlichen Zeitskalen führen. Isaac Held vom Geophysical Fluid Dynamics Laboratory in Princeton im US-Bundesstaat New Jersey hält darum eine Hierarchie theoretischer Modelle für erforderlich, um die Systeme vollständig zu verstehen. Sie sollte von eindimensionalen Beschreibungen, die ein Schlüsselement der Atmosphärenphysik isolieren, bis hin zu vollständigen dreidimensionalen Modellen der atmosphärischen Zirkulation reichen.

Meteorologen und Klimaforscher nutzen typischerweise Zirkulationsmodelle, die erstens auf einem Satz von Gleichungen beruhen, in denen die Atmosphäre als Flüssigkeit behandelt wird – die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen –, und zweitens auf einer thermodynamischen Gleichung. Hinzu kommen modifizierende Faktoren wie die Bildung von Gebirgen und die Biologie. Viele dieser Feinheiten sind allerdings unnötig, wenn man die Atmosphären von Exoplaneten beschreiben will. Die Kunst besteht dann darin zu erkennen, an welchen Stellen sich das für die Erde entwickelte Modell vereinfachen lässt.

Auch Modelle, die ursprünglich für Braune Zwerge entwickelt wurden, haben Forscher auf heiße Jupiter übertragen. Pionierarbeiten leisteten etwa Adam Burrows von der Princeton University und Ivan Hubeny von der University of Arizona. Braune Zwerge sind »gescheiterte Sterne« – sternähnliche Himmelskörper, deren Masse zu gering ist, als dass Atomkerne in ihrem Inneren kontinuierlich miteinander fusionieren würden. Sie weisen eine Reihe von Ähnlichkeiten mit heißen Gasplaneten auf; schließlich entstehen beide Arten von Himmelskörpern aus kollabierenden Gaswolken.

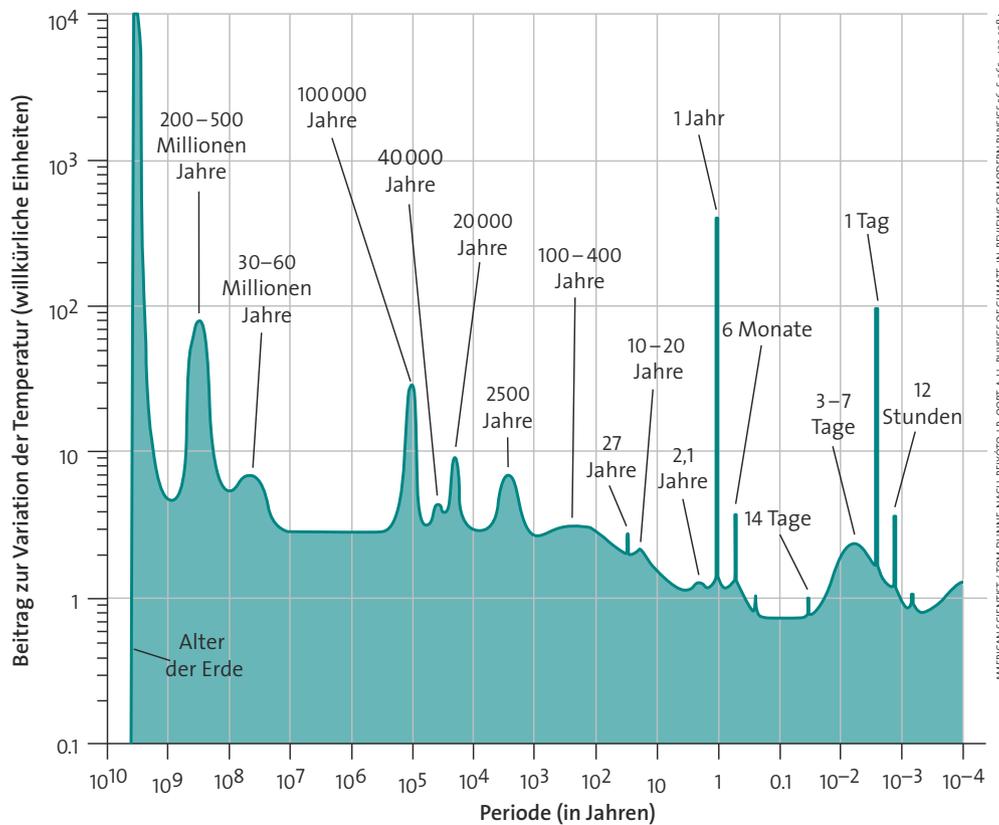
Mit Anleihen bei etablierten Methoden aus der Atmosphären- und Klimaforschung lässt sich aus dem Spektrum eines Exoplaneten dann seine chemische Zusammensetzung sowie das Temperatur- und Druckprofil seiner Atmo-



sphäre rekonstruieren. Auf diese Weise fanden Nikku Madhusudhan von der Yale University und seine Kollegen heraus, dass in der Atmosphäre von WASP-12b das Verhältnis von Kohlenstoff zu Sauerstoff mindestens doppelt so groß ist wie in seinem Zentralstern. Möglicherweise lässt sich durch solche Studien herausfinden, in welcher Weise die Eigenschaften planetarer Atmosphären und die Entstehungsgeschichten der Himmelskörper miteinander in Beziehung stehen. Zunächst einmal müssen aber zusätzliche Untersuchungen das Ergebnis bestätigen und entsprechende Messungen bei weiteren Planeten gelingen.

Adam Showman, Planetologe an der University of Arizona, war einer der Ersten, welche die Atmosphären heißer Jupiter mit einem globalen Zirkulationsmodell untersuchten. Andere Forscher, darunter ich selbst mit einigen Kollegen, zogen bald nach. Ein wichtiger Aspekt ist dabei der Wärmetransport von der Tagseite eines Planeten mit gebundener Rotation auf seine Nachtseite. Dieses Phänomen findet zwar in nur zwei Dimensionen statt. Allerdings können sich die zeitlichen Charakteristika eines solchen Prozesses über mehrere Größenordnungen erstrecken. Es zeigte sich, dass nur dreidimensionale Modelle es erlauben, nicht nur die Spektren, sondern zugleich auch die Phasenkurven und zeitliche Veränderungen zu reproduzieren. Tatsächlich ist es mehreren Forschergruppen inzwischen gelungen, Zirkulationsmodelle auf heiße Jupiter anzuwenden und konsistente Ergebnisse zu erhalten. Mit der Entdeckung von immer mehr Planeten, die der Erde hinsichtlich Größe und Temperatur ähneln, werden solche Modelle künftig sogar noch wichtiger, wemgleich eine ganze Reihe technischer Probleme zu lösen bleibt.

Werden Forscher ein solches Diagramm jemals für Exoplaneten erstellen können? Es zeigt die charakteristischen Zeitskalen, auf denen die Temperatur der Erdoberfläche variiert. So steht das breite Maximum im Bereich von drei bis sieben Tagen in Zusammenhang mit Druck- und Temperaturschwankungen, die wiederum Wetterveränderungen in mittleren Breiten mitverursachen. Die Maxima bei 20 000, 40 000 und 100 000 Jahren markieren die so genannten Milankowitch-Zyklen, in denen die Präzession und veränderliche Schiefe der Erdachse sowie die Exzentrizität der Erdbahn die solare Einstrahlungsintensität periodisch variieren lassen.



AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE NACH: PHOTON.P.P., DOOR, A.H., PHYSICS OF CLIMATE, IN: REVIEWS OF MODERN PHYSICS 56, S. 365-429, 1984

Doch selbst die grundlegenden Eigenschaften heißer Jupiter verstehen wir noch nicht vollständig. Warum sind einige von ihnen stärker aufgebläht als andere? Warum verteilen manche die Wärme effektiver als andere von der Tag- zur Nachtseite um? Für die Planeten HD 189733b und HD 209458b wurden Zirkulationsmodelle entwickelt, die sowohl die Spektren als auch die Phasenkurven – deren Verschiebung die Effektivität des Wärmetransports widerspiegelt – recht gut reproduzieren. Masse und Radius von HD 189733b entsprechen den theoretischen Erwartungen an einen Planeten, der nach der heißen Phase seiner Entstehung allmählich abkühlt. Die Form seines Spektrums könnte sich mit Rayleigh-Streuung von Sonnenstrahlen an Molekülen erklären lassen, also mit demselben Phänomen, das auf der Erde für die blaue Farbe des Tageshimmels verantwortlich ist. HD 189733b ist demnach in einen atmosphärischen Dunst gehüllt, dessen chemische Zusammensetzung aber noch unbekannt bleibt.

Im Gegensatz dazu besitzt HD 209458b keinen Dunstschleier, ist aber stark aufgebläht, also erheblich größer als von Theoretikern erwartet. Einer der möglichen Gründe: Heiße, teilweise ionisierte Atmosphären können sich wie riesige elektrische Stromkreise verhalten. Wenn sich diese Stromkreise im Magnetfeld des Planeten bewegen, werden weitere Ströme hervorgerufen, die der Bewegung über zusätzliche Magnetfelder entgegenwirken. So wird letztlich Bewegungsenergie der Atmosphärenbestandteile in Wärmeenergie umgewandelt, die den Planeten erwärmt und in seinem aufgeblähten Zustand verharren lässt. Diese Theorie hat allerdings noch einen Haken: Ob heiße Jupiter überhaupt Magnetfelder besitzen, ist eine bislang offene Frage.

Ultimatives Ziel für viele Forscher ist die Messung des Spektrums eines erdähnlichen Gesteinsplaneten, der um einen sonnenähnlichen Stern kreist. Doch unsere theoretischen Werkzeuge müssen wir vor allem an heißen Jupitern schärfen, weil wir bislang nur wenige Daten über Planeten besitzen, die dem Neptun oder gar der Erde ähneln. Eines Tages werden wir dann vielleicht auch die jahrhundertealte Frage beantworten, ob unter dem Licht ferner Sonnen außerirdisches Leben existiert. Und ob ein Zwilling der Erde in einer Umlaufbahn um einen Zwilling der Sonne die einzige mögliche Wiege für Leben im Universum ist. Noch liegen die Antworten außerhalb der Reichweite selbst der nächsten Generation von Teleskopen.

David Charbonneau von der Harvard University und Jill Tarter vom SETI Institute schlagen darum vor, in den Umlaufbahnen um Rote Zwerge nach bewohnbaren Welten zu

W

I

S

wissenschaft
in die schulen!

Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema
»Planetenatmosphäre« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/atmosphaere

suchen. Rote Zwerge sind Verwandte unserer Sonne, besitzen aber nur zwischen einem Zehntel und der Hälfte ihrer Masse. In unserer galaktischen Nachbarschaft stellen sie etwa drei Viertel der Sternpopulation. Forschern bieten sie eine Reihe von Vorteilen. Da sie kühler sind als sonnenähnliche Sterne, können auch Planeten auf sehr engen Bahnen – 10- bis 100-mal enger als bei sonnenähnlichen Sternen – flüssiges Wasser auf ihrer Oberfläche beherbergen. Solche Exemplare lassen sich mit den gegenwärtigen Suchverfahren leichter aufspüren. Die Hoffnung: Auf diese Weise könnte man auf bewohnbare Supererden stoßen, auf Planeten also, die zwar mehr Masse und größere Radien besitzen als unsere Erde, ihr aber sonst stark ähneln.

Einen Nachteil hat die Suchstrategie von Charbonneau und Tarter allerdings. Falls sich diese Supererden in einer gebundenen Rotation befinden, könnten ihre Atmosphären manchen Theoretikern zufolge längst kollabiert sein – dann nämlich, wenn auf der kalten Nachtseite der Planeten wichtige atmosphärische Bestandteile ausgefroren sind. Welche Bedingungen auf solchen Himmelskörpern tatsächlich herrschen, können letztlich aber nur Beobachtungen zeigen. Immerhin liegen bereits Transmissionsspektren der um einen Roten Zwerg kreisenden Supererde GJ 1214b vor, die zweieinhalbfache Erdgröße besitzt. Doch was sie über die Zusammensetzung seiner Atmosphäre sagen, ist noch umstritten.

Neue Weltraummissionen werden mehr als nur Momentaufnahmen ermöglichen

Astronomen hoffen nun auf den Bau von Weltraumteleskopen, die über lange Zeiträume hinweg die zeitliche Veränderung der Spektren von Exoplaneten messen können. Weltweit setzen sie sich für das Exoplanet Characterization Observatory (EChO) der Europäischen Weltraumagentur ESA und für den Fast Infrared Exoplanet Spectroscopy Explorer (FINESSE) der NASA ein. Wenn diese Missionen starten – in den nächsten ein oder zwei Dekaden –, werden sie Daten zu Hunderten von Exoplaneten liefern. Aus ihnen können die Forscher dann die Chemie und die Dynamik der Atmosphären und das Klima der Planeten rekonstruieren.

Möglicherweise gelingt es ihnen auch, für einen Exoplaneten ein Diagramm wie dasjenige links oben zu erstellen. Es stellt die charakteristischen Zeitskalen dar, in denen sich die Temperatur des Himmelskörpers verändert. Beispielsweise lässt sich aus der Schwankung der Strahlung auf Temperaturänderungen im Verlauf eines Planetentages oder eines Planetenjahres schließen. Im Fall der Erde war das in spektakulärer Weise für Skalen möglich, die von weniger als einem Tag bis hin zu Zehntausenden von Jahren reichen, wobei natürlich auch geologische Daten einfließen (siehe Grafik links). Weltraummissionen werden kaum mehr als einige Monate abdecken können, doch wahrscheinlich lassen sich damit bereits viele der charakteristischen Maxima erfassen, weil diese im Fall enger Umlaufbahnen auf kürzere Zeiträume komprimiert sind.



Im Augenblick liegt der Ball aber noch bei den Theoretikern. Sie müssen die Grundlagen schaffen, damit wir aus der zu erwartenden Datenfülle die atmosphärischen, meteorologischen und klimatischen Bedingungen auf Exoplaneten erschließen können. Erst im nächsten Schritt können wir dann versuchen, erste verlässliche Aussagen über die Bewohnbarkeit dieser fernen Welten zu treffen. ~

DER AUTOR



Kevin Heng ist Zwicky Prize Fellow am Institut für Astronomie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Der Astrophysiker interessiert sich vor allem für theoretische Modelle, welche die Atmosphären von Exoplaneten physikalisch und chemisch beschreiben. Unter anderem ist er an der Vorbereitung der ESA-Mission Exoplanet Characterization Observatory beteiligt.

QUELLEN

- Fortney, J.J. et al.:** Transmission Spectra of Three-Dimensional Hot Jupiter Model Atmospheres. In: *Astrophysical Journal* 709, S. 1396–1406, 2010
- Heng, K. et al.:** Atmospheric Circulation of Tidally Locked Exoplanets: A Suite of Benchmark Tests for Dynamical Solvers. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 413, S. 2380–2402, 2011
- Madhusudhan, N. et al.:** A High C/O Ratio and Weak Thermal Inversion in the Atmosphere of Exoplanet WASP-12b. In: *Nature* 469, S. 64–67, 2011
- Snellen, I.A.G. et al.:** The Orbital Motion, Absolute Mass and High-Altitude Winds of Exoplanet HD 209458b. In: *Nature* 465, S. 1049–1051, 2010
- Tarter, J. et al.:** A Reappraisal of the Habitability of Planets around M Dwarf Stars. In: *Astrobiology* 7, S. 30–65, 2007

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178936

Wie vergitterte Fenster die Welt einfärben

Schaut man durch transparenten Kunststoff, können unerwartete Interferenzerscheinungen auftreten.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Der Blick durch das Fenster eines Flugzeugs hat nicht nur Freunden ungewohnter Perspektiven und ferner Horizonte viel zu bieten. Kaum ein Flug, der uns nicht den Genuss eines eindrucksvollen Naturphänomens beschert: Wir sehen kreisförmig geschlossene Regenbögen, Halos in Form von Neben- und Untersonnen und gelegentlich auch eine Glorie. Wie all diese Erscheinungen zu Stande kommen, ist jedes Mal eine Geschichte für sich. Denn die physikalischen Gesetze, auf denen sie beruhen, sind zwar meist einfach, wirken aber auf recht komplexe Weise zusammen.

Doch was, wenn sich dem Beobachter partout nicht erschließen will, was er da eigentlich sieht? Vor einigen Jahren entdeckte ich bei einem Flug farbig berandete Schneefelder (Foto S. 55 oben). Das Phänomen erinnerte in gewisser Weise an die Kantenspektren, welche die Ränder von Gegenständen säumen, die man durch ein Prisma betrachtet. Auch der Sonnenreflex auf dem glänzenden Tragflügel erschien beidseitig von farbigen Streifen gesäumt (Foto oben). Woher kommen also die Farben?

Um einen Polarisierungseffekt konnte es sich nicht handeln, denn die Streifen hatten keinerlei Ähnlichkeit mit den typischen flächenhaften Farbverläufen, die bei einer Polarisierung durch Spannungsdoppelbrechung bei transparenten Plastikteilen auftreten. Allerdings drängt sich eine weitere Erklärung auf, denn die farbigen Streifen neben dem Reflex ließen sich als gebeugtes Licht unterschiedlicher Ordnung interpretieren. Das langwellige Rot wäre demnach am stärksten und das kurzwellige Violett und Blau am schwächsten abgelenkt. Doch leider schien das optische Gitter zu fehlen, das eine solche Beugungserscheinung überhaupt erst möglich macht. Denn zwischen Lichtreflex und Flugpassagier lag nichts außer dem Kunststofffenster. Und von Fenstern sind ja erst einmal keine Gittereigenschaften zu erwarten.

Das Rätsel begleitete mich, bis ich Jahre später durch ein Geodreieck hindurch auf einen hellen Lichtreflex blickte und ihn ebenfalls beidseitig von farbigen Satellitenreflexen gesäumt sah. War ich des Rätsels Lösung näher gekommen? Ich beschloss, den Sachverhalt zu

Herstellungsbedingte Dichteschwankungen im Kunststoff eines Flugzeugfensters wirken wie ein optisches Liniengitter. Fällt durch dieses Gitter ein Lichtbündel, wird es gebeugt, also – vereinfacht gesagt – in Teilstrahlen aufgespalten. Diese Strahlen erzeugen nicht nur ein Abbild des Originalreflexes, sondern überlagern sich auch zu Interferenzmustern an dessen beiden Seiten. Muster höherer Beugungsordnung erscheinen dabei schwächer.

... so will ich mich wenigstens bemühen bei einer (Observation) aus meinem Fenster den besten Gedanken zu haben.

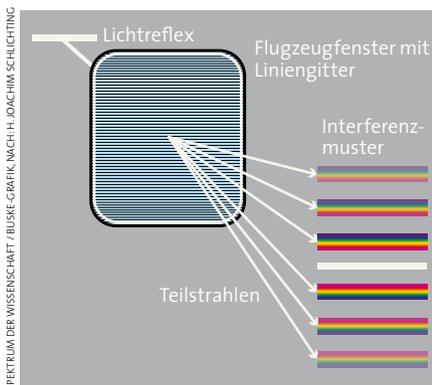
Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)



Woher stammen die farbigen Interferenzerscheinungen oberhalb und unterhalb des Sonnenreflexes auf dem Flugzeugtragflügel?

prüfen. Statt einer Flugzeugtragfläche diente mir ein in der Sonne stehendes Auto als Quelle für Sonnenreflexe. Und siehe da, es zeigte sich ein ganz ähnlicher Anblick (Foto rechts unten). In der Folge beschaffte ich mir weitere transparente Kunststoffobjekte und stellte fest, dass das Phänomen überraschend häufig auftritt – allerdings meist nur dann, wenn das Licht an bestimmten Stellen durch die Objekte fällt. Weil dort mit bloßem Auge aber nichts Auffälliges zu sehen war, legte ich das Geodreieck unter das Mikroskop. Und tatsächlich: Ich stieß mehrfach auf eine fein geriffelte Struktur – das Gitter war gefunden.

Doch wie kommt es ins Geodreieck? Ebenso wie viele andere Kunststoffgegenstände werden Geodreiecke und Flugzeugfenster im Spritzgussverfahren fabriziert. Dabei erhitzt man ein Kunststoffgranulat und verwandelt es so in eine zähe, gut formbare Masse. Diese presst man unter hohem Druck in ein Spritzgießwerkzeug, das die Hohlform des gewünschten Objekts aufweist. Anschließend lässt man die Mas-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ILLUSTRATION: H. JOACHIM SCHLICHTING



ALLE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Die Schneefelder auf diesem Luftbild, das der Autor durch ein Flugzeugfenster aufnahm, erscheinen erwartungsgemäß weiß. Beim Übergang zu dunkleren Flächen zeigen sich aber auch farbige Lichtfetzen. Als Ursache des Phänomens entpuppten sich letztlich Nebeneffekte des Spritzgussverfahrens, mit dem das Fenster hergestellt wurde.

se erkalten und erstarren. Öffnet man nun die zweigeteilte Form, gibt sie das fertige Objekt frei.

Das für uns Entscheidende ist aber schon zuvor geschehen. Beim Einspritzen der heißen, flüssigen Kunststoffmasse drängt sich diese durch die Einspritzöffnung und breitet sich dann radial in den Hohlkörper hinein aus. Dabei kann es vorkommen, dass die Flüssigkeit an den Wänden des Hohlkörpers stärker abkühlt als innen und damit zäher wird. Die nach wie vor dünnflüssige innere Schicht überholt dann die äußere Schicht, gerät ihrerseits in Kontakt mit den kühlen Wänden, wird selbst zähflüssig und so weiter.

Dieses »stotternde Voranschreiten« lässt feine Dichteinhomogenitäten an der Grenzschicht zwischen Kunststoff und Formwerkzeug entstehen. Weil die äußeren Bedingungen gleich bleiben, besitzen sie eine präzise periodische Abfolge – wegen der Analogie zu den Rillen einer Schallplatte sprechen Fachleute auch vom Schallplatteneffekt

(englisch: gramophone record effect). Seine Wirkung erzielt er, weil sich Licht in einem dichteren Medium anders ausbreitet als in einem weniger dichten.

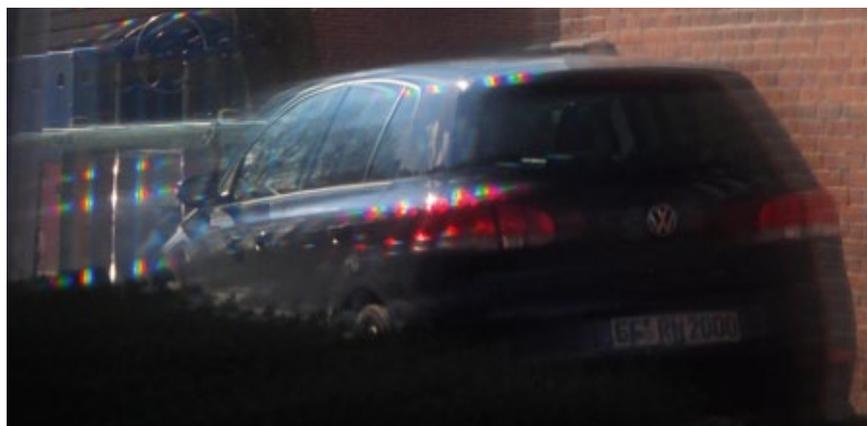
Ein optisches Gitter allein macht aber noch keine Interferenz. Dazu kommt es erst, wenn die Wellenzüge des darauf fallenden Lichts wie bei einem Laser weit gehend frequenz- und phasengleich sind – was bei weißem Licht normalerweise nicht der Fall ist. Stammt es aber von einer sehr schmalen Quelle, in diesem Fall vom Reflex auf einer konvexen Fläche, ist es immerhin so weit kohärent, dass einige wenige Beugungsordnungen zu sehen sind.

Solcherart mit Erkenntnissen bewaffnet, versuchte ich mich bei den folgenden Flügen als Materialprüfer und stellte fest, dass die Dichte der Flugzeugfenster fast immer sehr homogen ist: So brillante Beugungserscheinungen wie bei meiner ersten Beobachtung erlebt man selten.

Die Frage, warum das Licht nur an den Rändern der Schneeflächen in

Farben zerlegt wird, haben wir allerdings einfach falsch gestellt. Denn natürlich ist der Effekt nicht auf die Ränder beschränkt. Dort kommt er lediglich besser zur Geltung, während sich auf den Flächen die Farben wieder zu Weiß mischen.

Dieser Effekt war schon Goethe aufgefallen, als er einst eine weiße, durch Fensterstäbe begrenzte Fläche durch ein Prisma betrachtete und feststellte, »daß nur da, wo ein Dunkles dran stieß, sich eine mehr oder weniger entschiedene Farbe zeigt, daß zuletzt die Fensterstäbe am allerlebhaftesten farbig erschienen, indessen am lichtgrauen Himmel draußen keine Spur von Färbung zu sehen war.«



Beim Blick durch ein Geodreieck, das Eigenschaften eines optischen Gitters besitzt, erscheinen helle Stellen eines Objekts in mehreren Beugungsordnungen farbig zerlegt.

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

- Bonnet, M.:** Kunststoffe in der Ingenieur-anwendung. Vieweg Teubner, Wiesbaden 2009
- Schlichting, H. J., Suhr, W.:** Ein Geodreieck als optisches Gitter. In: Physik in unserer Zeit 43, S. 198–199, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178942

Unser besonderer Tipp:



LCD DELUXE DIGITAL MIKROSKOP Mikroskop mit Digitalkamera und TFT Touchscreen

Vergrößerungsbereich 40x bis 1600x, Einzelaufnahme und Filme, universelles Netzteil, 110–240 Volt mit Adaptern für fast alle Länder, 6-Volt-Batterie-pack für mobilen Einsatz (4 AA-Batterien, nicht enthalten), Tragetasche, Gewicht: 1,7 kg, Celestron

Bestell-Nr. 3770 € 299,-

Das Deluxe Digital-Mikroskop ist das weltweit erste digitale LCD-Mikroskop mit 3,5-Zoll-Touchscreen!

Diese Screen ist um 180° drehbar ist – so können Sie die Bilder leicht anderen Zuschauern zeigen. Die eingebaute Digitalkamera ermöglicht Einzelbilder oder kurze Filme, die Sie im internen Speicher oder auf einer optionalen SD-Karte speichern und auf den PC überspielen können.

Weitere Details zum Artikel und umfangreiches Zubehör finden Sie im Internet unter:
www.science-shop.de/mikroskopie



NEU NIGHT VISION
LED Rotlicht-
Taschenlampe
Hersteller: Celestron
Bestell-Nr. 3689
€ 14,95

Hochwertige Rötlichtleuchte mit zwei stufenlos regelbaren LEDs – das Standardwerkzeug für jeden Hobbyastronomen. Wenn die Augen des Beobachters einmal an die Dunkelheit adaptiert sind, sollte nur noch mit Rotlicht hantiert werden. Dies weitet die dunkel adaptierten Pupillen am wenigsten und reicht aus, um alle wichtigen Arbeiten in der Dunkelheit vorzunehmen. Die Lieferung erfolgt inkl. 9-V Batterie.



ZAHLEN AM LAUFENDEN METER
Albrecht
Beutelspachers
Mathezollstock
2012, Maße: 24 x 1,6 x 2,8 cm, Metermorphosen
Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.



ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE
aus Biskuitporzellan
Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer
Bestell-Nr. 3651 € 24,90
Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren des Biskuitporzellans erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!



CHARLES DESIGN-NUSSKNACKER
Polykarbonat/Aluminium,
mit aussergewöhnlicher Mechanik zum Nüsseknacken, schwarz
Design: Ralf Webermann, 62 x 70 mm,
Gewicht: 145 Gramm, Troika

Bestell-Nr. 2842 € 32,90

Lieben Sie Nüsse? Wenn Sie bisher dachten, Nüsse zu knacken wäre eine lästige Angelegenheit, belehrt Sie CHARLES eines besseren. Ein verblüffendes und sauberes Prinzip: Die Nüsse werden mittels Schleuderkraft im Deckel geknackt. Die Nusschalen werden sauber aufgefangen – keine Krümel mehr auf dem Tisch!



STIRLINGMOTOR WIRO 1.0 BAUSATZ
Basis-Set
2011, mit ausf. bebildeter Bauanleitung mit Infos zu Historie und Funktion, eduwerk

Bestell-Nr. 3272 € 32,90

Ein Motor mit Charakter! Das Modell besticht durch hervorragende Laufeigenschaften schon bei geringer Energiezufuhr. Es kann mit einer Spiritusflamme beheizt werden, aber ebenso mit einem Teelicht oder mit gebündelter Sonnenstrahlung.

Der 'Verdränger'kolben' besteht aus Kugeln, deren Anzahl von 1 bis 7 verändert werden kann. Durch Variationen ergeben sich unterschiedliche Lauf- und Bewegungseigenschaften, die einen Unterhaltungswert haben. Der Bausatz ist auch sehr gut für Schüler ab 12 Jahren geeignet. Aufbauzeit: ca. 60 Min.

VIDEO-HELICOPTER SAFARI RTF/ GSY/3+3CH/MHZ
Mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und LED-Beleuchtung



L x B x H: 365 x 85 x 175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beiliegendes Ladegerät, Controller mit 6 x 1,5-V-AA-Batterien (nicht enthalten), Revell

Bestell-Nr. 3717 € 99,-

Ready-to-Fly-MHZ-Helikopter in auffälligem Design mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und über die Fernsteuerung schaltbarer LED-Beleuchtung. Der Helikopter hat sehr gute Flugeigenschaften durch das elektronische Kreiselsystem (Gyro) und ist gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät. Indoorgeeignet – Outdoor nur bei Windstille. Einsteigermodell, ab 15 Jahren.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



NEU ASTROSOLAR
SONNENFILTER-
FOLIE
Für die visuelle Beobachtung am Fernglas, Teleskop oder an der Kamera
Größe: 20 x 30 cm, Neutrale Dichte: OD = 5,0, Baader-Planetarium
Bestell-Nr. 3753
€ 25,-

Durch diese Folie können Sie gefahrlos in die Sonne schauen – auch und gerade mit optischen Instrumenten. Eine ausführliche Anleitung, die Ihnen zeigt, wie Sie sich mit Hilfe dieser Folie einen sicheren Filter basteln können, liegt bei. Diese Folie aus absolut blasen- und schlierenfreien Trägermaterial wird beidseitig mit reflektierenden Schichten bedampft. Dadurch wird erreicht, dass die Folie keine gefährlichen Fehlstellen aufweisen kann und ein kontrastreiches und farbneutrales Sonnenbild geliefert wird.

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan



WISSENSBECHER MATHEMATIK
Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK
Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE
Bestell-Nr. 3432 € 9,95

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



LEONARDO DA VINCI VITRUV MANN, HOLZBAUSATZ

Einzelteile: 13, L x B x H: 210 x 210 x 290 mm, Maßstab: 1 : 16, Revell

Bestell-Nr. 3433 € 29,95

Für viele war Leonardo der große Humanist der Renaissance. Er versuchte alles über den Menschen nachzuvollziehen – Proportionen, Funktionen und Emotionen. Seine berühmteste Studie hierzu ist der Vitruv-Mann. Er stellt ein echtes Stück Kunstgeschichte dar, das nun erstmals als Holzmodell erhältlich ist.



FLEDERMAUSDETEKTOR ZUM SELBERBAUEN

Inhalt: Buch und alle Bauteile, zusätzlich benötigt werden: LötKolben für den Aufbau, 9-V-Batterie (nicht enthalten), Franzis

Bestell-Nr. 1929 € 29,95

Belauschen Sie die Natur mit moderner Elektronik! Die Platine des Bausatzes ist bereits mit zahlreichen SMD-Bauelementen bestückt. Sie müssen nur noch wenige Teile selbst einlöten und die Platine mit Mikrofon, Lautsprecher und den Einstellreglern verdrahten. Moderne integrierte Schaltungen sorgen für hohe Empfindlichkeit und Lautstärke. Mit dem fertigen Detektor lassen sich die Ultraschall-Rufe von Fledermäusen hörbar machen. So können Sie diese faszinierenden Flugkünstler in der Dunkelheit auch dort aufspüren, wo sie sonst völlig unbemerkt auf der Jagd nach Insekten sind.



PEN ULTIMATE

Bestell-Nr. 1667 € 13,90

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.



DIE KNOTENBOX 50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.



NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker, Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 € 199,-

Das Night Eye ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. Night Eye ist kompakt und mit einer Hand bedienbar.



POWERLUX – LEUCHTLUPE KALTWEISS

Linsengröße: Ø 58 mm, cera-tec®, Vergrößerung: 28 dpt / 7x

(Doppellinse), punktgenaue Ausleuchtung, Abschaltautomatik nach 30 Min., Lichtfarbe: kaltweiß, ca. 8000 K, Hartschaum-etui. Benötigt werden 3 Mignon Batterien, im Lieferumfang enthalten, made in Germany, Eschenbach

Bestell-Nr. 3476 € 99,-

Die neue Generation der Leuchtlupe – in einer neuen geometrischen Gestaltung. Die einzigartige und vertraute Form der Computermaus hat sich millionenfach bewährt und sorgt für eine entspannte Handhaltung auch bei längerem Gebrauch.

- liegt sehr gut in der Hand
- sehr einfache, intuitive Führung auf dem Lesegut durch kompakte Bauform
- gleichmäßig helle und blendfreie Ausleuchtung durch zwei SMD-LED



DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfcondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50



Carmen Skupin
ABENTEUER ELEKTRONIK
2012, Set aus Bauteilen und Buch, 24 S. m. zahlr. farb. Abb., ab 8 Jahren, Franzis

Bestell-Nr. 3742 € 29,95

Ob drinnen oder draußen, bei Tag oder Nacht, in diesem Set aus Buch und Bauteilen finden Kinder ab 8 Jahren immer das richtige Elektronikabenteuer.

Das Einzigartige an diesem Bastelbuch: alle elektrischen Teile sind bereits enthalten und die restlichen Materialien lassen sich in jedem Haushalt finden. Carmen Skupin will mit diesem Experimentierbuch Mädchen und Jungen für Elektronik begeistern.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Thomas Riegler
DAS GROSSE RETRO-RADIO-BAUBUCH

2012, 32seitiges Buch und alle Bauteile für ein Mittelwellenradio im Retro-Stil, ohne Löten, Franzis

Bestell-Nr. 3757 € 29,95

Das dekorative Retro-Gehäuse lässt Ihr fertiges Radio fast wie ein original Grundgerät Modell 2012 aussehen. Zusätzlich brauchen Sie nur noch eine 1,5-V-Batterie Typ AA (nicht enthalten), und schon kann es losgehen! Und im Begleitbuch: Alles, was zum Bau Ihres Radios und zum Verständnis seiner Technik notwendig ist, auf 30 Seiten mit großen, farbigen Abbildungen und Grafiken.



Ulrich E. Stempel
LERNPAKET STROM MIT WINDENERGIE
Grundlagen der Windenergie mit 20 Experimenten

2011, 21 Bauteile u. Buch, im Paket enthalten: Motor, Windflügel, Messinstrument, Steckplatine, Elkos, LEDs und viele weitere Spezialbauteile, Franzis

Bestell-Nr. 3256 früher € 49,95, jetzt nur € 29,95

Dieses Lernpaket vermittelt die Grundlagen zum Thema Windenergie und führt Sie mit spannenden Experimenten zu vielen interessanten und praktischen Einsatzmöglichkeiten. Die Versuche bauen aufeinander auf, so dass Sie mit geringem Zeitaufwand zum Ziel kommen. Zusätzlich zu den theoretischen Grundlagen können Sie selbst Versuche aufbauen und damit die technischen Vorgänge rund um die Windenergie praktisch nachvollziehen – und das alles ohne Löten.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Bequem bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Jede Menge Murks

Viele wissenschaftliche Studien lassen sich nicht reproduzieren. Das wirft Fragen zum Forschungsbetrieb auf – und zur Veröffentlichungspraxis von Fachzeitschriften.

Von Ed Yong

Es mutet wie Ironie an, dass ausgerechnet eine Studie über Vorahnungen bei vielen Psychologen das unguete Gefühl auslöste, ihr Fachgebiet befinde sich in Schwierigkeiten. Der Sozialpsychologe Daryl Bem von der Cornell University in Ithaca (New York) hatte eine Aufsehen erregende Untersuchung durchgeführt. Er präsentierte Studenten 48 Wörter und bat sie anschließend darum, alle zu notieren, die sie im Gedächtnis behalten hatten. Später erhielten die Studenten eine zufällige Auswahl der Wörter, verbunden mit dem Auftrag, die Begriffe abzutippen. Dabei zeigte sich ein verblüffender Effekt: Einige Teilnehmer konnten sich im ersten Teil des Experiments besonders gut an jene Wörter erinnern, die sie im zweiten Teil des Experiments übten. Die Wirkung ging also der Ursache voraus.

Bem veröffentlichte seine Ergebnisse zusammen mit acht weiteren Experimenten im »Journal of Personality and Social Psychology«. Er wollte damit Phänomene beweisen, die er als übersinnliche oder »Psi«-Effekte bezeichnete. Erwartungsgemäß stellten zahlreiche Wissenschaftler seine Behauptungen in Frage. Drei Teams versuchten unabhängig voneinander, die Effekte zu reproduzieren. Es gelang ihnen nicht. Als sie dieses Negativergebnis nun ihrerseits veröffentlichen wollten, stießen sie auf große Hürden: Zunächst wollte es niemand drucken. Für die Wissenschaftler war das ein Alarmsignal.

Positive Ergebnisse in der Psychologie sind wie Gerüchte – leicht zu verbreiten, aber schwer zurückzunehmen. Sie prä-

gen den Inhalt der meisten Fachzeitschriften, was kein Wunder ist, denn die Journale berichten mit Vorliebe über neue, spannende Studien. Versuche, diese zu reproduzieren, bleiben dagegen oft unveröffentlicht, insbesondere wenn sie scheitern. Zahllose Negativergebnisse finden ihren Weg nicht aus den Laborbüchern hinaus. »Es gibt Experimente, von denen jeder weiß, dass sie sich nicht nachvollziehen lassen, aber dieses Wissen gelangt nicht in die Fachliteratur«, meint Eric-Jan Wagenmakers, Kognitionswissenschaftler an der Universität von Amsterdam. »Ich kenne Studenten, die ihre gesamte Doktorandenzeit darauf verwendeten, ein bestimmtes Phänomen zu reproduzieren, daran scheiterten und schließlich die Hochschule verließen, weil sie nichts vorzuweisen hatten.«

Das Experiment am gewünschten Ergebnis ausrichten

Solche Probleme gibt es in allen Wissenschaftsbereichen. In der Psychologie werden sie jedoch durch einige tief verwurzelte Normen verschärft. Es ist zum Beispiel üblich geworden, einen Versuchsablauf so hinzubiegen, dass er praktisch ein Positivergebnis garantiert. Wenn dieses Resultat dann einmal veröffentlicht ist, versuchen nur wenige Forscher, den Versuch exakt zu wiederholen. Stattdessen führen sie »konzeptuelle Replikationen« durch, sie prüfen also ähnliche Hypothesen mit anderen Methoden. Kritiker warnen, dass dies dem Bau eines Kartenhauses auf schwankendem Grund gleiche.

Einige schwere Betrugsfälle haben in der Vergangenheit deutlich gemacht, wie verhängnisvoll sich solche Praktiken auswirken können. Nach verbreiteter Einschätzung fliegen gefälschte Ergebnisse oft deshalb nicht auf, weil es so schwierig ist, die entsprechenden Experimente exakt zu wiederholen. Doch seit einiger Zeit verstärken sich die Anstrengungen, diesen Missstand zu beheben. Viele Psychologen haben Initiativen ins Leben gerufen, um das Ausmaß des Problems zu erfassen, Reproduktionsversuche zu unterstützen und eine Plattform zu schaffen, auf der die Ergebnisse solcher Versuche veröffentlicht werden können. »Seit etwa einem Jahr sprechen viel mehr Leute darüber und nehmen Anstoß daran«, sagt Joseph Simmons, Psychologe an der University of

AUF EINEN BLICK

DIE JAGD NACH DEM EFFEKT

1 Fachzeitschriften veröffentlichen bevorzugt positive Forschungsergebnisse – also solche, die eine aufgestellte **Hypothese** bestätigen. Besonders ausgeprägt ist das in der Psychologie.

2 Viele dieser **Positiv-Studien** erweisen sich als nicht reproduzierbar. Die gescheiterten Wiederholungsversuche bleiben jedoch oft unveröffentlicht.

3 Verantwortlich dafür sind die Arbeitspraktiken von Wissenschaftlern, aber auch die **Auswahlkriterien der Journale**. Einige Forscher wollen nun mit verschiedenen Initiativen gegensteuern.

Pennsylvania (USA). »Ich hoffe, die Dinge wenden sich bald zum Besseren.«

Die Psychologie steht mit diesen Schwierigkeiten nicht allein da. Auch in der biomedizinischen Forschung sieht es nicht viel besser aus. In einem mittlerweile berühmten Artikel argumentierte der Epidemiologe John Ioannidis, der zurzeit an der Stanford School of Medicine (USA) arbeitet, dass der statistischen Logik zufolge »die meisten veröffentlichten Forschungsergebnisse falsch sind«. Der Sozialwissenschaftler Daniele Fanelli von der University of Edinburgh in Schottland untersuchte 4600 Studien aus diversen Wissenschafts-

zweigen und fand heraus, dass der Anteil der positiven Ergebnisse im Jahr 2007 um 22 Prozent höher lag als 1990. Vor allem die Psychologie und die Psychiatrie stechen heraus: Hier ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein veröffentlichtes Ergebnis positiv ausfällt, fünfmal so hoch wie in der Weltraumforschung, die am anderen Ende des Spektrums liegt. Und es zeichnet sich keine Besserung ab. Im Jahr 1959 belegte der Statistiker Theodore Sterling, dass 97 Prozent der Studien in vier wichtigen Psychologiejournalen statistisch signifikante Positivergebnisse gemeldet hatten. 1995 führte er die Analyse erneut durch und stellte keine Veränderung fest.



Wenn Experimente wiederholt werden, kommt oft etwas anderes heraus als beim ersten Mal.

SPEKTRUM/DEWISSENSCHAFT / MANFRED ZENTSCH

Einer der Gründe dafür, dass positive Resultate in der Psychologie so stark überrepräsentiert sind, sei die Bevorzugung »leicht abgedrehter« Studien, meint Chris Chambers, Psychologe an der Cardiff University in Wales. Die Ergebnisse müssten spannend, plakativ oder sogar unplausibel sein, um veröffentlicht zu werden. Simmons sieht die Ursache zum Teil im Auswahlprozess: »Beim Begutachten von Manuskripten fordern wir von den Autoren häufig den Nachweis, dass ihre Befunde neu oder interessant sind. Die Echtheit der Ergebnisse hingegen müssen sie nur selten belegen.«

Simmons gehört zu denen, die es wissen müssen. Kürzlich veröffentlichte er in der Fachzeitschrift »Psychological Science« eine nicht ganz ernst gemeinte Abhandlung, die angeblich bewies, dass der Beatles-Hit »When I'm Sixty-Four« die Zuhörer um 1,5 Jahre jünger macht. Simmons wollte damit demonstrieren, wie »unerträglich einfach« man statistisch signifikante Ergebnisse produzieren kann, um jede noch so schräge Hypothese zu untermauern. Viele Psychologen legen die Schlüsselfaktoren ihrer Studien, etwa die Zahl der Teilnehmer, die zu messenden Variablen und die Auswertungsverfahren, quasi nebenbei fest. Vielleicht tun sie das bloß aus Unachtsamkeit, aber es gibt ihnen die Freiheit,

Versuche und Daten so lange zu verbiegen, bis ein positives Ergebnis herauskommt.

Der Psychologe Leslie John von der Harvard Business School in Boston (USA) befragte etwa 2000 Kollegen und fand heraus, dass mehr als die Hälfte von ihnen bei wissenschaftlichen Untersuchungen zunächst die Signifikanz der Ergebnisse prüften, bevor sie entschieden, ob sie weitere Daten erheben sollten oder nicht. Das taten sie so lange, bis sich ein positives Ergebnis abzeichnete. Vier von zehn Befragten hatten selektiv Studien veröffentlicht, die »funktioniert hatten«. Die meisten waren der Meinung, dass diese Vorgehensweise vertretbar sei. »Viele tun das, weil sie es so gelernt haben«, sagt der Psychologe Brent Roberts von der University of Illinois in Urbana-Champaign (USA).

Kein Interesse an Wiederholungsversuchen

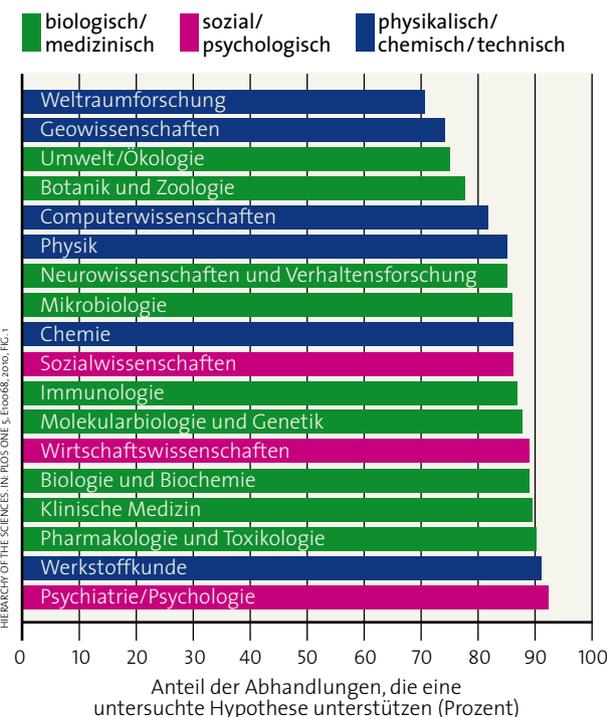
So liegt die ganze Beweislast bei denen, die die Studien reproduzieren wollen – eine mühsame und undankbare Aufgabe. Das sieht man beispielhaft an der eingangs erwähnten Studie von Daryl Bem. Die drei Forschergruppen, die erfolglos versucht hatten, seine Ergebnisse nachzuvollziehen, reichten ihre Negativergebnisse gemeinsam zur Publikation ein. Von der Redaktion des »Journal of Personality and Social Psychology« erhielten sie daraufhin die Auskunft, dass die Zeitschrift keine direkten Reproduktionen veröffentliche. Die Redaktionen von »Science« und »Psychological Science« äußerten sich ähnlich. Das »British Journal of Psychology« ließ die Abhandlung von Fachleuten prüfen, lehnte sie jedoch ebenfalls ab; Bem war einer der Gutachter. Am Ende erschien die Arbeit in »PLOS One«, einem Journal, das laut eigenem Bekunden technisch einwandfreie Studien veröffentlicht, nicht nur neue.

»Ich habe alles Mögliche getan, um das Reproduzieren meiner Studie zu unterstützen«, erklärt Bem, der zu seinen umstrittenen Ergebnissen steht und sämtliche einschlägigen Methoden und Tests ins Internet gestellt hat. Er fügt jedoch hinzu, dass eine einzelne publizierte Arbeit, die zu einem Negativergebnis komme, für ihn noch nicht aussagekräftig sei. »Es ist noch zu früh«, meint er, »es kann Jahre dauern, herauszufinden, warum eine Wiederholung gescheitert oder gelungen ist. Man braucht dafür eine Metaanalyse vieler Versuche.«

Der Kognitionspsychologe Stéphane Doyen von der Université Libre de Bruxelles stieß auf ähnliche Probleme, nachdem es ihm und seinen Kollegen nicht gelungen war, ein klassisches Experiment zu reproduzieren. John Bargh, Psychologe an der Yale University in New Haven (USA), hatte gezeigt, dass Menschen langsamer gehen, wenn sie zuvor unbewusst mit altersbezogenen Wörtern in Berührung kommen. Doyens Arbeitsgruppe scheiterte daran, dieses Ergebnis zu bestätigen, und wollte damit an die Öffentlichkeit gehen – kassierte aber von mehreren Fachzeitschriften eine Absage. Schließlich erschien auch ihre Arbeit in »PLOS One«. Daraufhin schrieb Bargh einen erzürnten Blogbeitrag, in dem er Do-

Das Positive betonen

Eine fachübergreifende Analyse der wissenschaftlichen Literatur im Jahr 2010 belegte die Tendenz, nur »positive« Studien zu veröffentlichen – also solche, die die geprüfte Hypothese stützen. Am stärksten ausgeprägt ist dieser Hang in der Psychiatrie und der Psychologie. Insgesamt wurden 2434 Studien untersucht.



Starke Wirkungen aus Fernost

Studien, die neue Thesen prüfen oder unbekannte Phänomene untersuchen, arbeiten oft mit relativ kleinen Stichproben. Deshalb kann der von ihnen gefundene Effekt in einem relativ breiten Bereich streuen. In die Fachpublikationen gelangen vor allem solche Arbeiten, bei denen ein deutliches Resultat herausgekommen ist, auch wenn dieses möglicherweise auf Zufall beruht. Folgeuntersuchungen, die das Ergebnis zu reproduzieren versuchen, stellen oft einen schwächeren Effekt fest – insbesondere, wenn sie mit größeren Stichproben arbeiten und ihr Resultat daher näher am wahren Mittelwert liegt.

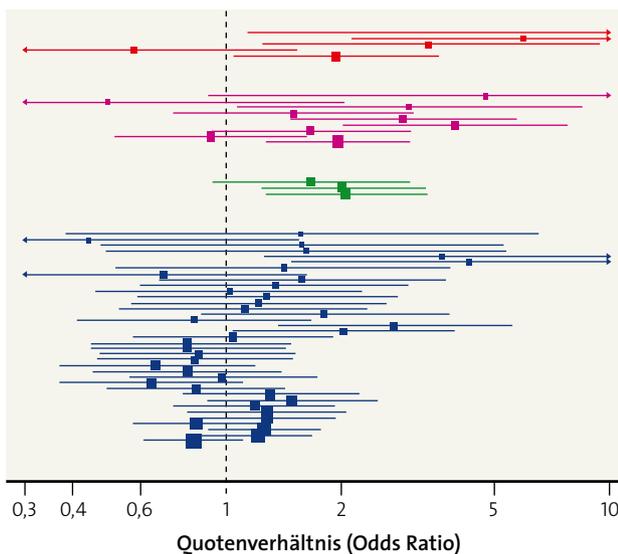
Doch nicht nur statistisch bedeutsame Variablen wie der Stichprobenumfang beeinflussen das Ergebnis einer Untersuchung. Auch die Nationalität der Forscher spielt eine Rolle, wie Zhenglun Pan vom Shandong Provincial Hospital (China) und seine Kollegen entdeckt haben. Sie analysierten zahlreiche Ar-

beiten, deren Ziel darin bestanden hatte, medizinische Studien aus der Fachliteratur zu reproduzieren. Das verblüffende Ergebnis: Bei Arbeiten von asiatischen Forschern kam oft ein größerer Effekt heraus als bei Untersuchungen, die Forscher aus westlichen Ländern durchgeführt hatten. Am deutlichsten war dies bei chinesischen Wissenschaftlern: Ihre Studien hatten die deutlichsten Resultate ergeben.

Die Gründe hierfür sind unklar. Vermutlich haben sie mit einer regional unterschiedlich stark ausgeprägten Bevorzugung von Positivergebnissen («Publikationsbias») zu tun, möglicherweise auch mit kulturellen Eigenheiten. fs

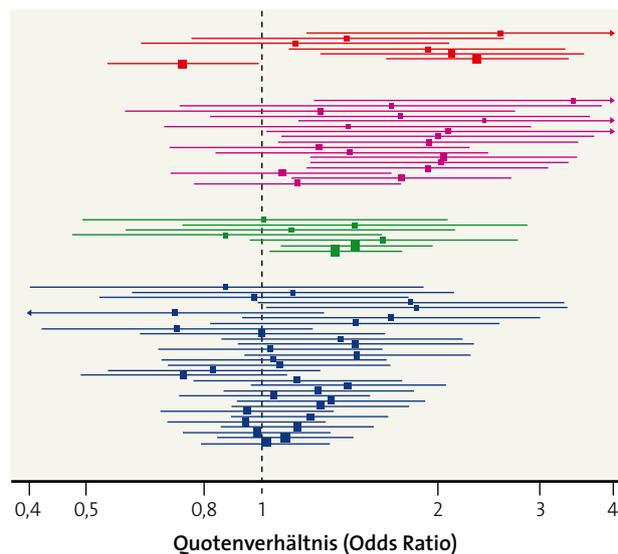
Pan, Z.: Local Literature Bias in Genetic Epidemiology: An Empirical Evaluation of the Chinese Literature. In: Public Library of Science Medicine, 2: e334, 2005

MTHFR-C677T-Genpolymorphismus und koronare Herzkrankheit



Forscher aus verschiedenen Ländern haben den Zusammenhang zwischen bestimmten Erbanlagen und Krankheiten untersucht. Jeder waagrechte Strich steht für eine Studie. Das Quadrat markiert den jeweils ermittelten Wert dafür, wie die Genvariante mit der Krankheit assoziiert ist. Quoten-

GSTM1-Gendeletion und Lungenkrebs



verhältnis = 1: nicht korreliert; > 1: positiv korreliert; < 1: negativ korreliert. Die Länge der Striche ist ein Maß für die Unsicherheit, die Größe des Quadrats steht für den Umfang der Studie. Orange und violett: chinesische Autoren; grün: andere asiatische Autoren; blau: Autoren aus anderen Ländern.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ILLUSTRATION: NACH PAN, Z.: LOCAL LITERATURE BIAS IN GENETIC EPIDEMIOLOGY (1), IN: PLOS MED 2: E334, 2005, FIG. 2

yen und seine Mitarbeiter als inkompetent bezeichnete. Später legte er sich auch mit dem Autor dieses Artikels an, der über die Kontroverse berichtet hatte. Heute erklärt Bargh seine heftige Reaktion wie folgt: Er habe die These, dass unbewusste Denkvorgänge eine wichtige Rolle spielen, wachsender Skepsis ausgesetzt gesehen und den Eindruck gewonnen, dass hier dem Fachgebiet geschadet werde.

Natürlich kann ein einzelner missglückter Wiederholungsversuch ein Forschungsergebnis kaum widerlegen. Sein Negativergebnis kann ganz banale Ursachen haben. Wenn

der zu prüfende Effekt beispielsweise sehr schwach ist, lässt er sich schon aus statistischen Gründen schwer nachweisen. Oder die Teilnehmer eines Wiederholungsexperiments unterscheiden sich von denen des Originalversuchs. Oder einem Team fehlen schlicht die handwerklichen Fähigkeiten, ein Experiment zu reproduzieren.

»Das Durchführen subtiler Versuche ähnelt in vielerlei Hinsicht der Regie bei einer Theateraufführung«, sagt Daniel Kahneman, nobelpreisgekrönter Psychologe an der Princeton University. Simple Details wie der Wochentag oder die

Farbe der Tapete können die Ergebnisse einer psychologischen Untersuchung beeinflussen, doch tauchen sie niemals im Methodenteil eines Fachartikels auf. Bargh argumentiert beispielsweise, Doyens Team habe die Versuchsteilnehmer zu vielen altersbezogenen Wörtern ausgesetzt, so dass diese auf den verborgenen Zweck des Experiments aufmerksam wurden. In Bahnungs- oder Primingstudien müsse man einen unbewusst einwirkenden Reiz äußerst genau justieren, erläutert Kahnemann: intensiv genug, dass er noch wirken kann, aber wiederum nicht so ausgeprägt, dass er den Versuchsteilnehmern auffalle. Ob das gelungen sei, zeige sich erst, wenn der gefundene Effekt in hunderten Experimenten bestätigt wurde.

Eine Prüfmethode, die nur bejahen kann

Dutzende Forscherteams ließen sich von John Barghs klassischem Experiment dazu anregen, eigene Primingversuche durchzuführen. Bei solchen Experimenten untersuchen die Wissenschaftler, ob ein vorangehender Reiz gewisse Gedächtnisinhalte aktiviert und dadurch die Verarbeitung nachfolgender Reize beeinflusst beziehungsweise den Gemütszustand oder das Verhalten prägt. Es zeigte sich beispielsweise, dass Versuchsteilnehmer ihre Gesprächspartner ernster nahmen und soziale Probleme als schwerwiegender empfanden, wenn sie vorher ein schweres Manuskript-Klemmbrett gehalten hatten. Und wurden Personen mit Begriffen konfrontiert, die mit Sauberkeit und Reinlichkeit

»Man beweist nicht mit B, dass A richtig ist. Man wiederholt dafür A«

assoziiert waren, beurteilten sie niederträchtige Taten anschließend nachsichtiger.

Dass unbewusste Denkvorgänge eine wichtige Rolle spielen, lässt sich also mit verschiedenen Experimenten und empirischen Methoden bestätigen. Solche konzeptuellen Replikationen sind für die Psychologie sehr nützlich. »Man sollte meinen, dass eine konzeptuelle Replikation schwerer wiegt

als eine exakte Wiederholung, denn sie ist ein stärkerer Beweis dafür, dass sich der Effekt verallgemeinern lässt«, sagt der Psychologe Eliot Smith von der Indiana

University Bloomington, USA, der das »Journal of Personality and Social Psychology« mitherausgibt. Andere Psychologen sind da skeptischer. »Man kann kein Konzept nachahmen«, meint etwa Chambers, »das ist zu subjektiv. Es ist völlig offen, wie ähnlich etwas sein muss, um als konzeptuelle Replikation zu gelten.« Außerdem erzeuge dieses Vorgehen eine »logische Doppelmoral«. Beeinflusst beispielsweise ein schweres Klemmbrett unbewusst das menschliche Urteilsvermögen, dann könnte man das als indirekte Bestätigung des Bargh-Experiments werten, demzufolge Menschen nach dem Priming mit altersbezogenen Begriffen langsamer gehen. Hat das Gewicht des Klemmbretts jedoch keinen Einfluss, dann würde niemand behaupten, Barghs Befund sei indirekt widerlegt worden.

Die konzeptuelle Replikation ermöglicht es also, Versuchsergebnisse angeblich zu bestätigen, aber nicht, sie zu entkräften. Auf diese Weise erlaubt sie den Forschern, ein Kartenhaus aus zweifelhaften Ergebnissen zu errichten, die sich gegenseitig stützen. »Sie ist die wissenschaftliche Verkörperung des Bestätigungsfehlers – also der Neigung, Informationen so auszuwählen, dass sie die eigenen Erwartungen erfüllen«, meint Brian Nosek, Sozialpsychologe an der University of Virginia. »Die Psychologie ist in gewisser Weise auf konzeptuelle Replikationen angewiesen, doch diese ersetzen keine direkten Reproduktionen. Man beweist nicht mit B, dass A richtig ist. Man wiederholt dafür A.«

In dem Umfeld, das die Publikations- und Forschungspraktiken der Psychologen erzeugen, können Fehlritte leicht unbemerkt bleiben. Im November 2011 wurde dem Sozialpsychologen Diederik Stapel von der niederländischen Tilburg University, der bis dahin als aufsteigender Stern seines Fachgebiets gegolten hatte, wissenschaftlicher Betrug in großem Umfang vorgeworfen, den er schließlich auch eingestand. Stapel hatte mehrere Aufsehen erregende Studien veröffentlicht, die unter anderem belegten, dass eine unordentliche Umgebung – etwa ein heruntergekommener Bahnhof – diskriminierendes Verhalten fördert. Es gab zahlreiche Faktoren, die eine Wiederholung der Versuche erschwerten, und das half ihm, seinen Betrug zu verstecken. Die wissenschaftliche Untersuchungskommission schrieb: »All diese äußerst stimmig wirkenden Resultate hätten eigentlich nachdenklich machen müssen, doch sie wurden begeistert

Reproduktion als Dienstleistung

Wo viele Menschen das gleiche Problem haben, dauert es meist nicht lange, bis jemand eine Geschäftsidee daraus entwickelt. So auch beim Prüfen von Forschungsergebnissen. Untersuchungen haben gezeigt, dass zahlreiche biomedizinische Arbeiten, die in der Fachliteratur erscheinen, sich nicht reproduzieren lassen. Nun bietet das US-Unternehmen »Science Exchange« an, wissenschaftliche Experimente gegen Gebühr zu wiederholen. Bestätigt sich der gefundene Effekt dabei, macht dies die Originalstudie vertrauenswürdiger.

Interessierte Forscher können ihre Arbeit bei »Science Exchange« einreichen. Das Unternehmen sucht dann per Zufallsprinzip Experten aus, die den Versuch unabhängig und im Blindversuch nachstellen. Die Ergebnisse werden an die Autoren der Originalstudie zurück übermittelt. Diese können das Datenmaterial als zusätzliche Publikation in einer Sonderausgabe der Fachzeitschrift »PloS One« veröffentlichen. Erfolgreich reproduzierte Studien erhalten ein Zertifikat. fs

Mehr unter: www.reproducibilityinitiative.org



aufgenommen ... Wer erfolglos versuchte, die Ergebnisse zu reproduzieren, ging davon aus, dass ihm einfach Herrn Stapels Begabung fehle.« Die Fälschungen betreffen mindestens 30 Fachartikel.

Stapels Geschichte gleicht derjenigen der Psychologen Karen Ruggiero und Marc Hauser von der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. Auch sie veröffentlichten jeweils stark beachtete Ergebnisse zu Diskriminierung und Moralverhalten. Ruggiero wurde im Jahr 2001 des Forschungsbetrugs überführt, Hauser befand man 2010 des Fehlverhaltens für schuldig. Beide wurden von Informanten aus ihrem engeren Umfeld bloßgestellt – wie übrigens auch Diederik Stapel. »Wenn der Wissenschaftsapparat sich wirklich selbst korrigiert, warum hat dieser Korrekturmechanismus dann bei keinem einzigen von den dreien funktioniert?«, fragt Nosek.

Viele Psychologen suchen nun nach neuen Wegen, um das Reproduzieren von Studien zu unterstützen. Im vergangenen Jahr haben Hal Pashler, Psychologe an der University of California in San Diego, und seine Kollegen die Website www.psychfiledrawer.org erstellt, auf der Psychologen unveröffentlichte Reproduktionsversuche publizieren können, egal ob diese erfolgreich waren oder nicht. Die Website stieß auf große Zustimmung, verfügt bisher (Dezember 2012) aber nur über 18 Einträge. Es gibt kaum Anreize für eine Veröffentlichung: Jeder Eintrag setzt die Wissenschaftler der Kritik ihrer Kollegen aus, trägt aber nicht dazu bei, ihre Publikationsliste aufzuwerten.

Wenn die Jungen die Alten kontrollieren

Der Sozialpsychologe Matthew Lieberman von der University of California, Los Angeles, schlägt einen anderen Ansatz vor: »Die führenden Hochschulen könnten von ihren Psychologiestudenten verlangen, eine Studie in ihrem Fachgebiet zu reproduzieren.« Auf diese Weise, meint er, könnten die Studenten ihre Fähigkeiten schulen und wertvolle Veröffentlichungen sammeln – und die Wissenschaft würde von der Fleißarbeit enorm profitieren.

Wagenmakers wiederum vertritt die Auffassung, dass Reproduktionsversuche ähnlich wie klinische Studien vorher angemeldet werden sollten, um das Zurechtbiegen von Daten zu erschweren. Zudem solle ihre Veröffentlichung unabhängig vom Ergebnis erfolgen. Der Kontakt zu den Autoren

des Originalversuchs, oder sogar eine Zusammenarbeit mit ihnen, könne späteren Streitereien um die eingesetzten Methoden vorbeugen.

Unterdessen bezweifeln einige Wissenschaftler immer noch, dass überhaupt ein Problem besteht. Selbst der kritische Sozialpsychologe Brian Nosek betont, dass es keine belastbaren Schätzungen zur Häufigkeit falscher Positivergebnisse gibt. Ende 2011 rief er ein Team von Psychologen zusammen, das sämtliche Studien zu reproduzieren versucht, die seit 2008 in den drei wichtigsten Psychologie-Fachzeitschriften veröffentlicht wurden. Die Wissenschaftler wollen sich so genau wie möglich an die Originalarbeiten halten und versuchen, mit deren Autoren zusammenzuarbeiten. Das Ziel lautet nicht, einzelne Forscher mit ihren Arbeiten an den Pranger zu stellen, sondern für das gesamte Forschungsgebiet »erste Hinweise auf die Erfolgswahrscheinlichkeit von Reproduktionen zu erhalten«, wie sich Nosek ausdrückt.

Manche Forscher wollen es gar nicht so genau wissen und sind an dem Ergebnis nicht interessiert. Psychologe Hal Pashler erwartet indessen, dass seine Befürchtungen bestätigt werden – dass sich also die informellen Florgespräche über nicht nachvollziehbare Studien und über zahllose fehlgeschlagene Versuche, deren Protokolle in Schubladen verschwinden, als wahr erweisen. »Dann kann es keiner mehr leugnen.« ~

DER AUTOR



Ed Yong lebt als freier Schriftsteller in London und betreibt den Blog »Not Exactly Rocket Science« (sinngemäß »Nicht wirklich geniale Wissenschaft«).

QUELLEN

- Bem, D.J.:** Feeling the Future: Experimental Evidence for Anomalous Retroactive Influences on Cognition and Affect. In: Journal of Personality and Social Psychology 100, S. 407–425, 2011
- Doyen, S. et al.:** Behavioral Priming: It's All in the Mind, but Whose Mind? In: PLoS One 7, e29081, 2012
- Fanelli, D.:** Negative Results are Disappearing from Most Disciplines and Countries. In: Scientometrics 90, S. 891–904, 2012
- Ioannidis, J.P.:** Why Most Published Research Findings are False. In: PLoS Medicine 2, e124, 2005
- Simmons, J.P. et al.:** False-Positive Psychology: Undisclosed Flexibility in Data Collection and Analysis Allows Presenting Anything as Significant. In: Psychological Science 22, S. 1359–1366, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178943

GEOMETRIE

Tierische Pflasterungen

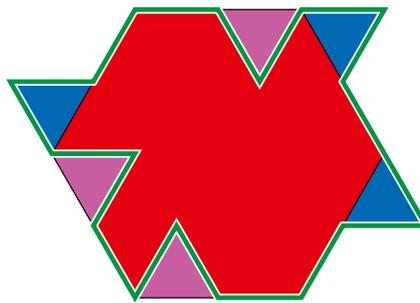
Peter Raedschelders hat nach dem Vorbild von Maurits C. Escher originelle und vor allem nichtperiodische Aufteilungen der Ebene in unendlich viele gleiche Teilstücke ersonnen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

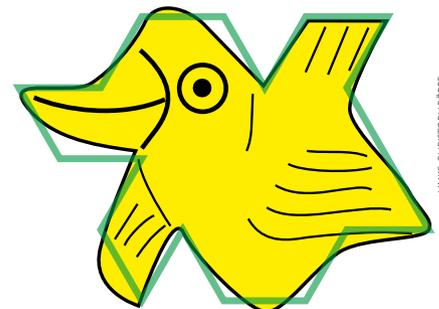
Für den Freund abstrakter Symmetrien sind die klassische Badezimmerkachelung mit Quadratfliesen und die Bienenwabenstruktur eine wunderbare Spielwiese. Man kann das Muster um bestimmte Winkel drehen, um zwei voneinander unabhängige Vektoren und deren sämtliche ganzzahlige Vielfache verschieben, an vielen verschiedenen Achsen spiegeln, und jedes Mal kommt das ganze unendliche Muster mit sich selbst zur Deckung. Selbstverständlich darf man diese verschiedenen Symmetrioperationen auch noch in beliebiger Reihenfolge hintereinander ausführen. Daraus ergibt sich eine Symmetriegruppe, die nicht nur über unendlich viele Elemente, sondern auch über eine interessante algebraische Struktur verfügt: der Gipfel der Reichhaltigkeit.

Vom künstlerischen Standpunkt dagegen sind dieselben Muster der Gipfel der Langeweile. Es ist allerdings durchaus eine fruchtbare Idee, die Ebene mit lauter gleichen – oder annähernd gleichen – Exemplaren einer Kachel lückenlos zu bedecken. Der niederländische Grafiker Maurits C. Escher (1898–1972) ist genau damit berühmt geworden. Die hervorstechenden Körperteile seiner fantasievollen Pferde, Reptilien, Engel und Teufel passen jeweils präzise in die Lücken des Nachbarn. Aber natürlich halten sich solche Figuren nicht an die geraden Grenzlinien der Quadrate und Sechsecke.

Dabei war zum Beispiel ein Escher-Kriechtier in einem frühen Entwurfsstadium ein regelmäßiges Sechseck.



Peter Raedschelders konstruiert seinen Pflasterstein (links), indem er einem regelmäßigen Sechseck (rot) drei kleine Dreiecke wegnimmt (violett) und an anderer Stelle hinzufügt (blau). Man kann an ein Exemplar des fertigen Steins (grüne Umrandung) ein weiteres, nach rechts oben parallelverschobenes ansetzen und so eine unendliche »Stange« aus Steinen bilden. In andere Richtungen ist eine solche Fortsetzung nicht möglich. Raedschelders macht den seltsam geformten, eckigen Stein gefälliger, indem er ihn zum Entchen abrundet (rechts).



LINKS: CHRISTOPH PÖPPE, RECHTS: CHRISTOPH PÖPPE UND PETER RAEDSCHELDERS

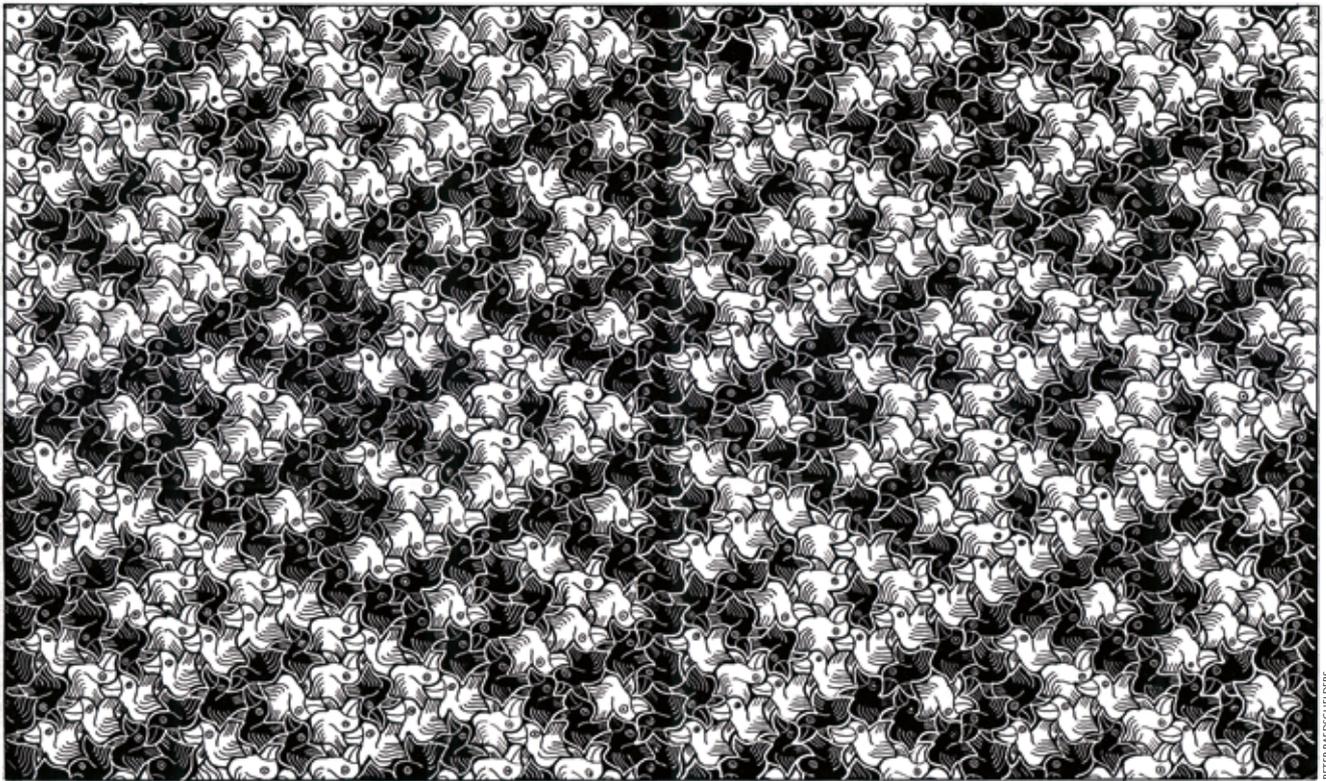
Um die gewünschte Form zu erzeugen, musste der Künstler die Kanten dieser Urform deformieren – und war dabei nicht gänzlich frei. Wenn er etwa eine Seite des Sechsecks ausbeulte, um dem Kopf vom Tier Platz zu machen, musste er eine andere Seite desselben Sechsecks auf genau dieselbe Weise einbeulen, damit der Kopf des Nachbartiers hineinpasste. In einem Interview von 1948 hat Escher selbst diesen Prozess beschrieben (siehe Weblinks, S. 68).

Dabei geht unweigerlich ein Stück Symmetrie verloren. Denn die Drehung, die zuvor eine Seite auf die andere abbildete, macht jetzt aus einer ausgebeulten eine eingebeulte; damit bildet diese Drehung das Muster nicht mehr auf sich selbst ab.

Quadrate und regelmäßige Sechsecke haben zwei beziehungsweise drei Paare paralleler Seiten. Wer die beiden

Partner eines solchen Paares auf verschiedene Weise ausbeult, zerstört damit die Translations-(Verschiebungs-)Symmetrie, die zuvor den einen Partner auf den anderen abbildete. Denn jetzt kann man nicht mehr gleiche Pflastersteine einfach parallelverschoben aneinanderlegen. Und das ist der erste kleine Schritt zu einem großen Ziel: einer nichtperiodischen Pflasterung der Ebene.

Berühmt geworden sind die beiden Pflastersteine von Roger Penrose. Sie heißen »Drachen« und »Pfeil« und sind so gebaut, dass man mit ihnen die Ebene lückenlos füllen kann, aber das so entstehende Muster niemals durch Translation – und sei es mit einem noch so langen Vektor – mit sich selbst zur Deckung kommt (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 112, und 7/1999, S. 14). Diese Aufsehen erregende Entde-



PETER RAEDSCHELDERS

ckung löste eine intensive Suche nach dem »Einstein« aus: einem Pflasterstein, der allein das Kunststück fertigbringt, für das Penrose noch zwei verschiedene Steine brauchte. Erst in jüngerer Zeit haben Joshua Socolar und Jean Taylor einen Stein gefunden, der einem Einstein schon sehr nahe kommt. Er entsteht durch Deformation eines regelmäßigen Sechsecks (Spektrum der Wissenschaft 5/2011, S. 73).

Nichtperiodische Entchen

In diesem Feld ist schon seit längerer Zeit Peter Raedschelders aktiv. Der belgische Künstler und Amateurmathematiker war im Hauptberuf Ingenieur bei Opel in Antwerpen, bis das dortige Werk geschlossen wurde. Auch er geht von einem regelmäßigen Sechseck aus. Dessen Seiten deformiert er, indem er auf manche von ihnen ein gleichseitiges Dreieck der halben Seitenlänge aufsetzt und von anderen ein ebensolches abzwackt. Das Ganze ist so gestaltet, dass jede »erweiterte« Seite an jede »verminderte« passt (Bild links oben). Aber einfach so periodisch aneinandersetzen kann man die Steine nur noch in einer Richtung. Um eine solche »Stange« nach rechts und links zu er-

»Enten« von Peter Raedschelders. Das im Original hochformatige Bild ist hier zum leichteren Vergleich mit den anderen Grafiken quergelegt. Um die zentrale Stange aus schwarzen Entchen gruppieren sich Dreiecke verschiedener Größe; jedes hat doppelt so lange Seiten wie das nächstkleinere.

weitern, muss man Steine in verdrehter Orientierung ansetzen. Die unmittelbaren Nachbarn einer Stange bilden aber ihrerseits keine Stange. Vielmehr wechseln sich ihre Orientierungen ab – und damit wird die Sache richtig interessant.

Es stellt sich nämlich heraus, dass die Stange selbst die gesamte Pflasterung der Ebene bis auf belanglose Verschiebungen entlang der Stange bereits eindeutig festlegt. Das ist im Kasten auf der nächsten Doppelseite für die Halbebene rechts der Stange beispielhaft ausgeführt. Für die linke Seite braucht man nicht eigens nachzudenken, denn der linke Rand der Stange ist gleich dem rechten, um 180 Grad gedreht.

Bei der so erzwungenen Pflasterung der Ebene treten auf einmal überraschende Strukturen zu Tage. Schräg liegende Stangen endlicher Länge aus gleich orientierten Steinen fügen sich mit Teilen der ursprünglichen Stange zu gleichseitigen Dreiecken verschiede-

ner Größe. Insbesondere fallen die beiden großen Dreiecke mit jeweils einer schwarzen, einer roten und einer hellvioletten Seite ins Auge.

Um die Struktur besser herauszuarbeiten – und aus künstlerischen Gründen –, hat Raedschelders die eckigen Steine nicht nur zu kleinen Enten abgerundet, sondern arbeitet auch mit einer reduzierten Farbgebung. Die »dunklen« Entchen (Orientierungen 1, 3 und 6) macht er schwarz, die »hellen« weiß. Dadurch springen die verschieden großen Dreiecke deutlich ins Auge (Bild oben).

Man findet lauter gleichseitige Dreiecke aus einer (schwarzen) vertikalen Seite und zwei schrägen Seiten, von denen die eine schwarz und die andere weiß ist. An der Spitze, wo die beiden schrägen Seiten sich treffen, kämpfen schwarze und weiße Entchen gegeneinander. Die Gewinnerin darf die Seite auf die doppelte Länge verlängern (an deren Ende sie auf ihre nächste Gegen-

rin trifft), während die Verliererin sich mit der erreichten Seitenlänge begnügen muss. Es bleibt ihr der Trost, dass irgendwo anders, in einem parallel gelegenen Dreieck, der Kampf mit dem genau entgegengesetzten Ergebnis ausgeht. Über die unendliche Ebene hinweg gesehen halten sich Schwarz und Weiß genau die Waage.

Die Tatsache, dass sich diese Dreiecke in beliebiger Größe (mit der Seitenlänge 2^n Entchen) finden, beweist, dass diese Pflasterung nichtperiodisch ist. Und wenn man mit diesem Pflasterstein nicht doch ein periodisches Muster legen könnte (Kasten unten), dann wäre das Entchen ein echter Einstein.

Magische Friedenstauben

Was dem Sechseck recht ist, das ist dem Quadrat nur billig. Auch dessen Seiten versteht Raedschelders so zu deformieren, dass zwar nach wie vor Pflastersteine aneinanderspazieren und die ganze Ebene füllen, aber eine einfache periodische Füllung ausgeschlossen ist. Sein Pflasterstein in Form einer Friedenstaube (Kasten rechts) ist so gebaut, dass man neben gedrehten auch gespiegelte

Varianten berücksichtigen muss. Das ergibt insgesamt acht verschiedene Sorten Täubchen. An jede Quadratseite eines Täubchens passen von diesen acht Anordnungen genau vier – welche vier, dafür gibt es keine einfache Regel, was die Sache unübersichtlich macht.

Überraschenderweise kann man acht mal acht Täubchen so im Quadrat anordnen, dass jede Sorte in jeder Zeile und jeder Spalte genau einmal vorkommt. Setzt man – je nach Sorte – die Zahlen von 1 bis 8 an die Stelle der Täubchen, so erhält man das, was unter dem Namen »lateinisches Quadrat« und als Vorstufe zum magischen Quadrat bekannt ist (Spektrum der Wissenschaft 12/2006, S. 102). Nur für die Diagonalen gilt die magische Eigenschaft nicht; wahrscheinlich ist sie auch durch eine andere Anordnung der Täubchen nicht erreichbar.

Stegosaurier

Künstlerisch wie mathematisch am anspruchsvollsten sind diejenigen Pflasterungen, die aus lauter unterschiedlich großen Versionen desselben Pflastersteins bestehen. Auch hier hat Escher

Vorbilder geliefert; so besteht sein Bild »Quadratlimit« aus einem zentralen Quadrat, umgeben von einem Rahmen aus Quadraten der halben Seitenlänge, um den wiederum ein Rahmen aus Quadraten mit nochmals halbierten Seitenlänge gelegt ist, und so weiter, bis theoretisch unendlich viele Quadrate innerhalb einer endlich großen quadratischen Fläche liegen. Escher hat die Quadrate zu (ziemlich rechtwinkligen) Fischen deformiert.

Raedschelders hat die Tatsache genutzt, dass eine unendliche Folge gleichschenkelig-rechtwinkliger Dreiecke ebenfalls eine Flächenfüllung ergibt (Bild S. 68 oben). Hier kommt jede Größe nur einmal vor; man gelangt von einem Pflasterstein zum nächstkleineren, indem man ihn um 135 Grad gegen den Uhrzeigersinn dreht und mit dem Faktor $1/\sqrt{2}$ verkleinert.

Raedschelders hat dann entdeckt, dass ein Stegosaurus – bis auf kleine Deformationen – auch nur ein gleichschenkelig-rechtwinkliges Dreieck ist (Bild S. 68 unten). Bemerkenswert ist, dass jedes dieser Urviecher zu seinem unmittelbaren Abkömmling kaum



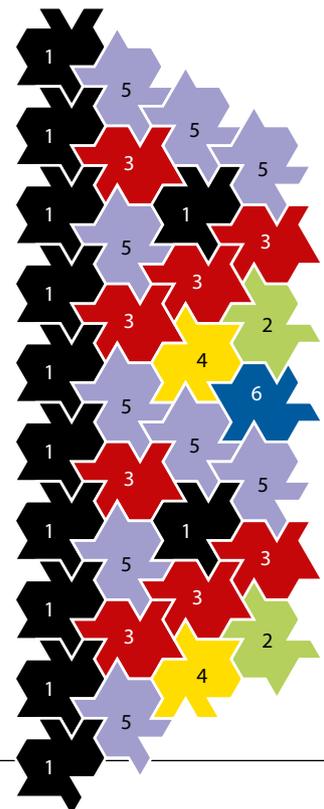
Alle meine Entchen – in sechs verschiedenen Sorten

Will man mit Raedschelders' Pflasterstein (der »Ente«) die Ebene ebenso lückenlos bedecken wie mit dem Sechseck, aus dem er entstanden ist, so muss man ihn in bis zu sechs verschiedenen Orientierungen verwenden (links; der Stein aus dem Bild auf S. 64 entspricht der Orientierung 3). In jeder Orientierung kann man beliebig viele Steine zu einer unendlichen »Stange« zusammensetzen wie hier die schwarzen Steine (rechts).

Indem man Periodizität in dieser einen Richtung erzwingt, hat man sie zugleich in jeder anderen Richtung vereitelt. Es stellt sich nämlich heraus, dass man rechts von der Stange nur die Steine 3 und 5 im Wechsel verlegen kann. Nennen wir die Stange selbst Reihe 0, ihre Nachbarin mit den Steinen 3 und 5 Reihe 1 und so weiter. Man findet durch Probieren, dass sich in Reihe 2 die vierteilige Abfolge 1, 3, 4, 5 auf ewig wiederholen muss.

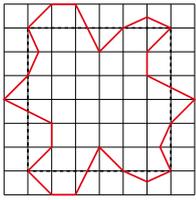
Man hat die Freiheit, Reihe 1 einen Stein höher oder tiefer zu verschieben; dort passt sie wieder an Reihe 0. Entsprechend passt Reihe 2 auch zwei Steine höher oder tiefer präzise an Reihe 1; entsprechende Möglichkeiten gibt es für jede weitere Reihe. Aber diese Freiheit bringt nichts. Jede dieser Verschiebungen hat denselben Effekt, als würde man das ganze Muster – oder den eigenen Standpunkt – um entsprechend viele Steine nach oben oder unten verschieben. Also betrachtet man ein ohnehin unendliches Muster an einer etwas anderen Stelle – sonst nichts.

Die Vermutung liegt nahe, dass für jede folgende Reihe ebenfalls eine periodische Abfolge erzwungen wird, und zwar mit der doppelten Periode der Vorgängerreihe. Damit hätte Reihe n die Periode 2^n (und keine kleinere).



CHRISTOPH POPPE NACH PETER RAEDSCHELDERS

Quadrate zu Friedenstauben



Die vier Seiten dieses Quadrats sind sämtlich durch denselben Streckenzug ersetzt (oben links). Daher passt die untere Seite nach rechts gedreht an die rechte und nach links gedreht an die linke Seite eines gleichartigen Quadrats. Die Oberseite ist allerdings ein Spiegelbild der Unterseite und passt daher nur an die rechte oder linke Seite eines gespiegelten Quadrats. Den Pflasterstein hat Peter Raedschelders mit wenigen Strichen zur Taube umgestaltet (oben rechts). Die acht verschiedenen Orientierungen der (gedrehten und gespiegelten) Taube sind durch verschiedene Farben gekennzeichnet (rechts).



PETER RAEDSCHELDERS

Wenn dem tatsächlich so ist (und man es beweisen kann), dann ist damit auch bewiesen, dass ein solches Muster nichtperiodisch ist, das heißt, nicht durch Translation auf sich selbst abgebildet werden kann. Denn zu jedem potenziellen Translationsvektor findet sich eine Reihe mit einer Periode, die länger ist als dieser Vektor und damit die Translationssymmetrie vereitelt.

Peter Raedschelders hat diese Beweisidee gar nicht erprobt. Vielmehr hat er sein Augenmerk auf die auffälligen farbigen Stangen gerichtet, die sich in dem Muster ergeben (links). Sie haben bemerkenswerterweise sämtlich Längen der Form $2^n - 1$: 1, 3, 7, ...

Die rote Stange mit acht

Entchen, die von der

zentralen schwarzen

Ente nach

rechts oben ab-

geht, und ihr violette

Spiegelbild nach unten

gehen über den gezeigten Bild-

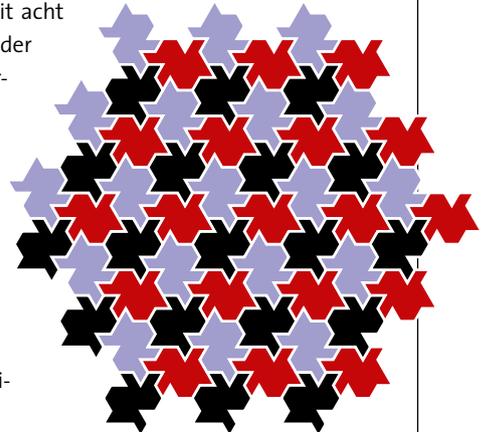
ausschnitt hinaus und haben jeweils 15

Elemente.

Ein echter »Einstein« ist die Raedschelders-Ente

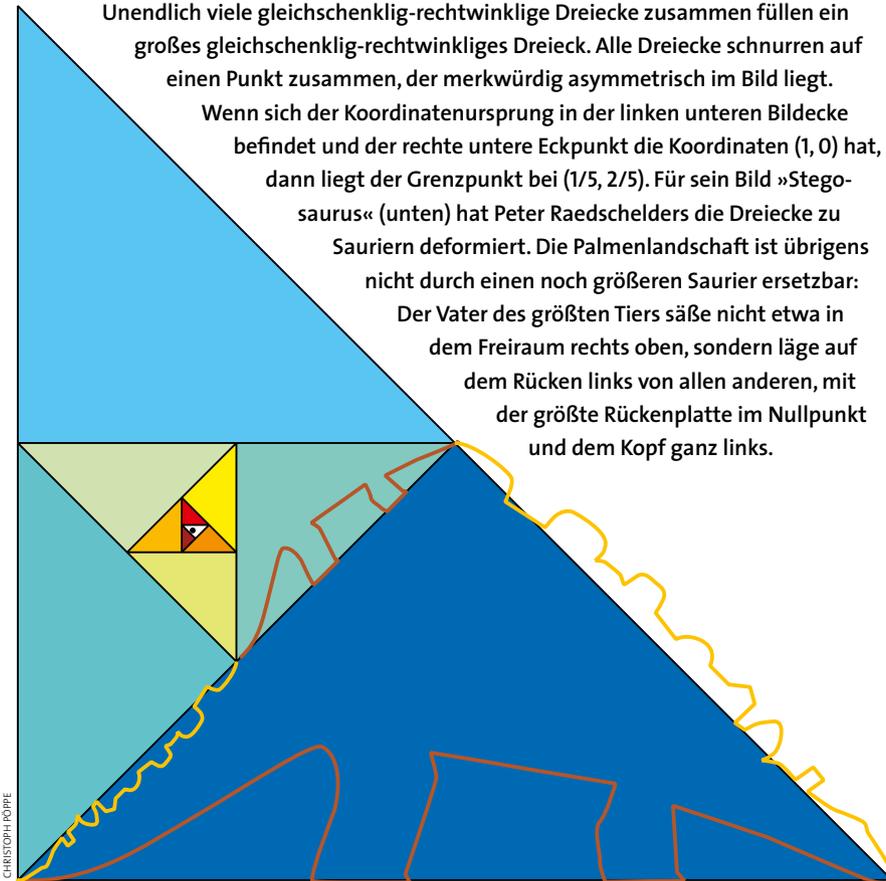
nicht. Dazu wäre erforderlich, dass sie überhaupt keine periodi-

sche Pflasterung zulässt. Aber eine solche gibt es (rechts).

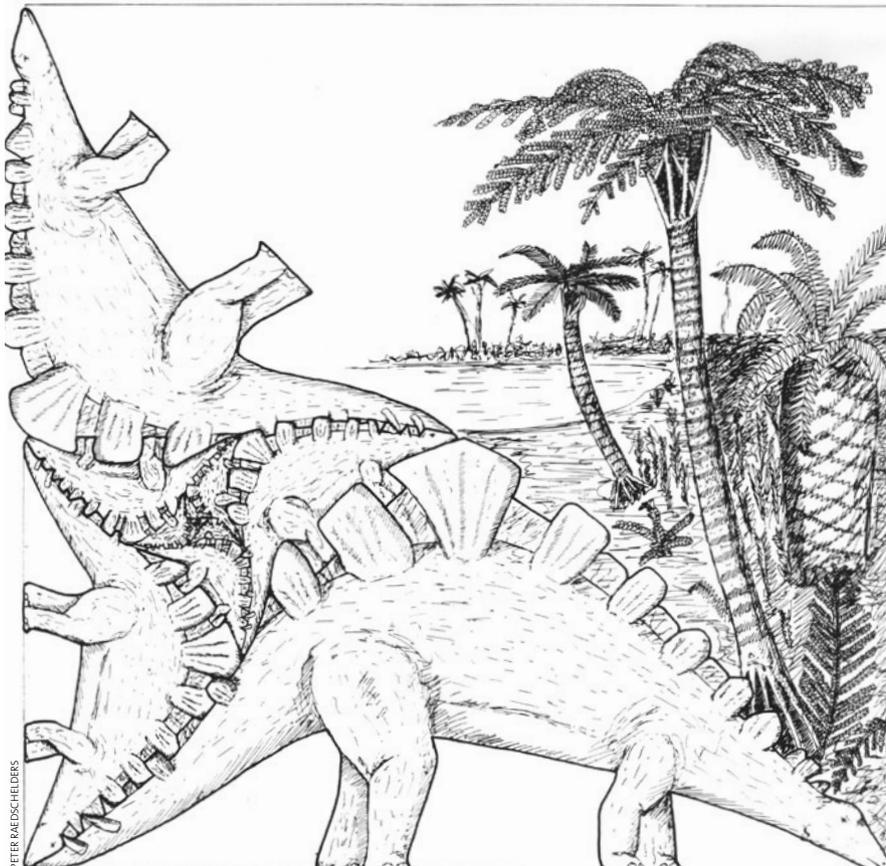


Unendlich viele gleichschenkelig-rechtwinklige Dreiecke zusammen füllen ein großes gleichschenkelig-rechtwinkliges Dreieck. Alle Dreiecke schnurren auf einen Punkt zusammen, der merkwürdig asymmetrisch im Bild liegt.

Wenn sich der Koordinatenursprung in der linken unteren Bildecke befindet und der rechte untere Eckpunkt die Koordinaten $(1, 0)$ hat, dann liegt der Grenzpunkt bei $(1/5, 2/5)$. Für sein Bild »Stegosaurus« (unten) hat Peter Raedschelders die Dreiecke zu Sauriern deformiert. Die Palmenlandschaft ist übrigens nicht durch einen noch größeren Saurier ersetzbar: Der Vater des größten Tiers säße nicht etwa in dem Freiraum rechts oben, sondern läge auf dem Rücken links von allen anderen, mit der größte Rückenplatte im Nullpunkt und dem Kopf ganz links.



CHRISTOPH PÖPPE



PETER RAEDSCHELDERS

Kontakt hat. Der Sohn berührt gerade mal mit der Schwanzspitze die oberste Rückenplatte des Vaters. Erst der Enkel küsst dem Großvater die Schwanzspitze und hakt sich mit seinen Rückenplatten bei ihm ein, während der Urenkel auf dem Urgroßvater reitet.

Damit das alles passt, muss der Rand des deformierten Dreiecks aus vier Teilen bestehen. Je zwei davon sind ein Paar aus einem großen Randstück und einer gedrehten und verkleinerten Form derselben. Das merkwürdige Sozialverhalten der Sauriergenerationen hat zur Folge, dass die Verkleinerungsfaktoren nicht $1/\sqrt{2}$, sondern einmal $1/2$ und einmal $1/(2\sqrt{2})$ betragen. \approx

DER AUTOR



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

QUELLE

Raedschelders, P.: Een onopgelost probleem in het domein van de vlakverdelingen. In: *Wiskunde & Onderwijs* 23, S. 139–169, 1997

WEBLINKS

<http://home.scarlet.be/~praedsch>
»Tilings, tessellations and other unusual prints«. Von Peter Raedschelders

www.3villagecsd.k12.ny.us/wmhs/Departments/Math/OBrien/escher.html
Das (englische) Interview mit M. C. Escher von 1948

www.morenaments.de/euc/
Ein Programm von Martin von Gagern zum Zeichnen von periodischen Flächenfüllungen mit verschiedenen Symmetriegruppen

<http://escher.epfl.ch/escher/>
»Escher Web Sketch«. Erfüllt einen ähnlichen Zweck mit etwas einfacheren Mitteln

www.tess-elation.co.uk/self-similar-tessellations
Aus »David Bailey's World of Escher-like Tessellations«. Erklärt insbesondere das Bildungsgesetz von »Quadratlimit«

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178945

DAMIT AUS NEUGIER WISSEN WIRD!



Ab 5.2.2013 im Handel

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert. Jetzt abonnieren und sparen: 4 Ausgaben pro Jahr für je € 5,50 inkl. Inlandsversand (statt € 6,50 im Einzelkauf)!

www.spektrum-neo.de/abo



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

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



NATURSCHUTZ

Herren über Leben und Tod

Um mit ihren begrenzten Mitteln das Bestmögliche zu erreichen, müssen Naturschützer zwangsläufig unpopuläre Entscheidungen treffen. Niemals wird es gelingen, allen bedrohten Organismen oder Ökosystemen gleichermaßen zu helfen. Aber wie kann man eine Auswahl treffen?

Von Michelle Nijhuis

Weit vor den Küsten Kaliforniens und Mexikos nistet eine kleine dunkelgraue Sturmschwalbe auf einigen Felsinseln im Pazifik – aber vielleicht nicht mehr lange. Denn außer den Möwen setzen ihr auch eingeschleppte Katzen, Ratten und Mäuse zu, ganz abgesehen von Ölverschmutzungen und vom steigenden Meeresspiegel. Höchstens 10 000 Tiere von *Oceanodroma homochroa*, dem Aschgrauen Wellenläufer oder Kalifornienwellenläufer, sind nach letzten Zählungen noch übrig. Ihre Anzahl ging in den vergangenen Jahrzehnten dramatisch zurück. Das gleiche Schicksal teilen einige andere Sturmschwalbenspezies.

Trotzdem beschloss die Wildlife Conservation Society der USA, sich um diesen Vogel nicht besonders zu kümmern. Im Winter 2008 waren die Mitglieder der Naturschutzvereinigung übereingekommen, ihre Anstrengungen auf eine kleine Auswahl von bedrohten Arten zu konzentrieren. Zuvor hatten Wissenschaftler der Gesellschaft nach eingehenden

Analysen unter Tausenden gefährdeten Vogel- und Säugtierarten der Welt ein paar hundert Kandidaten ausgewählt. Experten mit langjähriger Erfahrung in Freilandforschung und Naturschutz hatten dann zu entscheiden, welche davon von speziellen Schutzprogrammen profitieren sollten.

Dutzende Fachleute kamen damals in New York, im US-Bundesstaat Montana und in Buenos Aires in kleinen Gruppen zusammen. Ihre Aufgabe war, jede einzelne der aufgelisteten Arten zu bewerten – nach ihrem ökologischen, ökonomischen und kulturellen Rang sowie ihrem Potenzial als Logo im Naturschutz. Man stimmte offen mit roten, gelben und grünen Karten ab. Klafften die Meinungen allzu sehr auseinander, lieferten die Experten Informationen nach. Auf diese Weise hatten die meisten Gremien schon gegen Mittag gut die Hälfte der aufgeführten Arten von den Listen gestrichen.

Doch diese Rigorosität forderte ihren Tribut – und das in jeder einzelnen Arbeitsgruppe. Viele Teilnehmer saßen nur noch zusammengesunken da und starrten resigniert vor sich hin. Es war einfach schwer zu verdauen, dass zum Beispiel eine gefährdete Sturmschwalbe nicht wertvoll genug sein sollte, um in ein Schutzprogramm zu gelangen. Gegen das überwältigende Gefühl von Hilflosigkeit halfen die fundierten Argumente, die einzelne Teilnehmer nochmals vorbrachten, genauso wenig wie die Einsicht, dass dieser Entscheidungsprozess schlicht notwendig war.

John Fraser, Naturschutzpsychologe und einer der Moderatoren der Gremien, erinnert sich noch gut daran. Diese Erfahrung sei ein sehr wichtiger Aspekt solch eines Unterfangens. Erst da würde den Leuten so richtig bewusst, dass sie Verluste von ungeheurem Ausmaß quasi abnicken. Sie erkennen plötzlich die ganze Tragweite der Entscheidungen.

Zwangsläufig betreiben Umweltverbände und mit Schutzmaßnahmen befassete Regierungsstellen bei ihren Projekten immer eine Auslese. Das beschriebene Treffen machte das

AUF EINEN BLICK

SCHWERE ENTSCHEIDUNGEN

1 Angesichts **zunehmender Verluste** in der Natur und begrenzter **Ressourcen** ist es unumgänglich, bei den Schutzanstrengungen Prioritäten zu setzen. Verschiedene Strategien bieten sich dafür an.

2 Beim **Artenschutz** kann man entweder der ökologischen Bedeutung von gefährdeten Spezies Vorrang geben oder ihrer evolutionsbiologischen Einmaligkeit. Auch Werbewirksamkeit macht sich bezahlt, etwa bei Spendenaufrufen. Im Schlepptau solcher Strategien profitieren meist viele andere Organismen.

3 Damit konkurrieren Ansätze, vor allem reiche oder seltene **Ökosysteme** zu bewahren. Forscher entwickeln **Bewertungsschemata**, mit denen Schutzbestrebungen maximalen Erfolg versprechen.



Der Umweltschutz stößt an Grenzen. Nach welchen Kriterien soll er seine Prioritäten setzen? Was soll er bewahren? Darf er Arten wissentlich dem Untergang preisgeben?

nur besonders krass deutlich. Gerade heute, während der Druck auf die Umwelt wächst, werden die öffentlichen Gelder knapper. Viele Umweltforscher sehen denn auch inzwischen ein, dass die Situation Prioritätensetzung erfordert – »Triage«, wie sie auf Englisch sagen.

Das Wort kommt aus dem Französischen und bedeutet »Auslese, Auswahl«. Ursprünglich übernahm das Militärwesen es für Verfahren, mit denen sich nach Schlachten die Verwundeten sortieren und effektiv versorgen ließen. Später bezeichnete der Ausdruck allgemein Vorgehensweisen, um bei Katastrophen mit arg begrenzten Mitteln möglichst viele Menschen zu retten. Einsatzkräfte müssen sehr schnell entscheiden, in welche Kategorie die einzelnen Patienten fallen. Dabei wird unter anderem nach Dringlichkeit und auch Praktikabilität unter den gegebenen Umständen selektiert, was im Einzelfall oft hart, aus übergeordneter Sicht aber notwendig ist.

Unter völlig anderen Prämissen erließ der US-Kongress 1973 das Gesetz zu gefährdeten Arten, den Endangered Species Act. Es spricht allen bedrohten und gefährdeten Arten ein Recht auf Schutz zu, dem Weißkopfseeadler genauso wie dem winzigsten Käfer. Ausgenommen sind nur Schädlinge. In ihrem 1995 erschienenen Buch »Noah's Choice. The Future of Endangered Species« sprechen der Journalist Charles C. Mann und der Ökonom Mark L. Plummer vom Arche-Noah-Prinzip: Alle Arten sind grundsätzlich gleichwertig, jede kann und sollte gerettet werden, und dabei spielt die Bedeutung für uns Menschen keine Rolle. Im Vordergrund steht also eine grundsätzliche Hilfestellung, nicht der Kompromiss wegen begrenzter Mittel.

Wie schwer dieser Anspruch umzusetzen ist, zeigte sich in den USA in den 1980er Jahren, als Holz- und Fischindustrien versuchten, das Gesetz zu lockern, damit der Nördliche Fleckenkautz und einige Unterarten des Lachses nicht auf die Rote Liste kamen. Die Umweltschützer gewannen, aber die Auseinandersetzung hat viele von ihnen so misstrauisch gemacht, dass sie jegliche Änderungen an dem Artenschutzgesetz ablehnen, sogar solche, die dessen Effektivität steigern sollen. Denn sie fürchten, das Setzen von Prioritäten könnte der Gegenseite den Rücken stärken, weil die dann ein leichteres Spiel hätte, nicht genehme Arten von der Liste zu nehmen. Nach Ansicht dieser Naturschützer sollte man entspre-

chende unliebsame Entscheidungen, wenn sie denn sein müssen, besser ganz im Stillen fällen, ohne Beteiligung der Politik. Die Juraprofessorin Holly Doremus von der University of California in Berkeley bemerkt dazu: »Über Triage wollten Umweltschützer noch nie reden – obwohl sie wussten, dass solche Entscheidungen erfolgen.«

In diesen Kreisen ist das Konzept der Prioritäten bis heute ein heißes Eisen. Neben der Bedrohung von Naturschutzgesetzen sehen viele darin die Gefahr, dass die moralische Verantwortung für die Natur verloren geht. »Triage« gilt als Tabuwort, das man nicht ausspricht.

Notwendige Entscheidungen im Naturschutz transparenter gestalten

Jene Naturschützer, die auf offene Prioritätensetzung drängen, sind der Meinung, dass man Vorgänge, die es immer gab, hiermit endlich systematischer und transparenter gestaltet. Die schlechteste Option sei die Art und Weise, wie man solche Fragen heute in den USA handhabt, meint Tim Male, Vizepräsident der amerikanischen Naturschutzorganisation Defenders of Wildlife. Viele Entscheidungen würden ad hoc und somit überstürzt gefällt. Die Gelder kämen am ehesten denjenigen Arten zugute, die in die Schlagzeilen geraten, und ansonsten vor allem solchen von besonders gründlich erforschten Gebieten. Wir würden dabei gar nicht merken, wie sehr auch all das auf Triage beruht.

In den letzten Jahren haben Wissenschaftler verschiedene Ansätze unterbreitet, wie Prioritäten gesetzt werden müssten, um der Natur insgesamt optimal zu helfen. Da gibt es etwa den Vorschlag, die Bedeutung einer Art im Ökosystem zu veranschlagen – hierbei stünde die ökologische Funktion an erster Stelle. Vorrang hätten so genannte Schirmarten, deren Überleben das vieler anderer Spezies sichert – und deren wichtiger Beitrag zum Systemganzen mit ihrem Verschwinden verloren ginge. Ein Beispiel hierfür ist die Weißstämmige Kiefer (*Pinus albicaulis*), die in Höhenlagen des westlichen Nordamerika wächst. Ihre Bestände sind durch Klimaerwärmung und Schädlingsbefall stark geschrumpft. Das geht zu Lasten der Grizzlys, weil die in manchen Jahreszeiten hauptsächlich die fetthaltigen Kiefersamen fressen. Mit dem Konzept der Ökofunktion lassen sich komplette Ökosysteme besser schützen, als wenn man sich auf nackte Zahlen zu seltenen Arten konzentriert. Allerdings muss man das betreffende System gut verstehen, was bisher selten der Fall ist. Außerdem würden wahrscheinlich viele andere ebenfalls ökologisch wertvolle Spezies außer Acht gelassen, wenn Schirmarten Vorrang erhalten.

Die Londoner Zoologische Gesellschaft setzt dagegen das Programm EDGE of Existence (evolutionary distinct and globally endangered: evolutionär einzigartig und global gefährdet). Es gibt bedrohten Arten und Lebensformen den Vorzug, die sich genetisch als evolutionäre Besonderheit oder als Relikt abheben und oft keine näheren Verwandten mehr haben. Beispiele dafür wären etwa das Trampeltier oder zweihöckrige Kamel; der Langschnabel-Ameisenigel, ein Eier legendes

Stichwort Triage

Das französische Wort bedeutet Verlesen, Sichten, Auslesen, Aussortieren, Trennen. Es wurde zunächst im Militärwesen angewendet – für Kriterien, die Verwundeten nach Schlachten schnell so einzuteilen, dass möglichst viele überleben. Auch Katastrophenhelfer werden darin geschult. Im Zusammenhang mit Naturschutzmaßnahmen ist das Wort hier zu Lande noch wenig gebräuchlich, anders als im englischsprachigen Raum.

Gewinner und Verlierer

Es gibt verschiedene Kriterien, nach denen sich Naturschutzmaßnahmen ausrichten können. Jede Strategie setzt andere Prioritäten – und vernachlässigt dann zwangsläufig manche Arten oder Lebensräume. Inzwischen versuchen neuere Programme aber, mehrere davon zu kombinieren.

HOHE ÖKOLOGISCHE FUNKTION

Das Prinzip »Funktion zuerst« setzt auf Schlüsselarten in Ökosystemen. Dem Wolf kommt dabei eine bedeutende Rolle zu, dem Chinesischen Flussdelfin nicht.



BIOLOGISCH HERAUSRAGEND

Das Prinzip »Evolution zuerst« unterstützt genetische Besonderheit. Der Kalifornische Kondor ist ein rares Relikt der eiszeitlichen Vergangenheit. Das Gunnison-Beifußhuhn aus Colorado und Utah ist dagegen mit anderen Beifußhühnern nah verwandt.



ÖKOLOGISCHER REICHTUM

Das Prinzip »Hotspot« setzt auf artenreiche Ökosysteme mit vielen einmaligen Spezies. Wälder mit Mammutbäumen beherbergen viele einzigartige Tiere und Pflanzen, während Mangrovenwälder nicht besonders artenreich sind.



GEWINNER: VON OBEN NACH UNTEN: MINDEN PICTURES / TIM FITZ HARRIS; KONRAD WOTHE; MINDEN PICTURES / IVA MOJATUK & JOHN EASTCOTE; VERLIERER: VON OBEN NACH UNTEN: MINDEN PICTURES / NPL / GERRIT VON; MINDEN PICTURES / NPL / MARK CARWARDINE; MINDEN PICTURES / AKUJAMA NEZAKI

Säugetier Neuguineas; oder der bis zu 1,80 Meter lange Chinesische Riesensalamander. Das EDGE-Programm soll vorrangig genetische Vielfalt bewahren. Das würde letztlich dem Artenreichtum zugutekommen und den Spezies auch erlauben, sich dank eines vielseitigen Genpools an sich rasch verändernde Umwelten anzupassen. Allerdings besteht bei diesem Ansatz laut Martha Groom, Ökologin an der University of Washington, die Gefahr, es zu übersehen, wenn größere taxonomische Gruppen insgesamt bedroht sind. Dafür bietet das Programm keine Lösung.

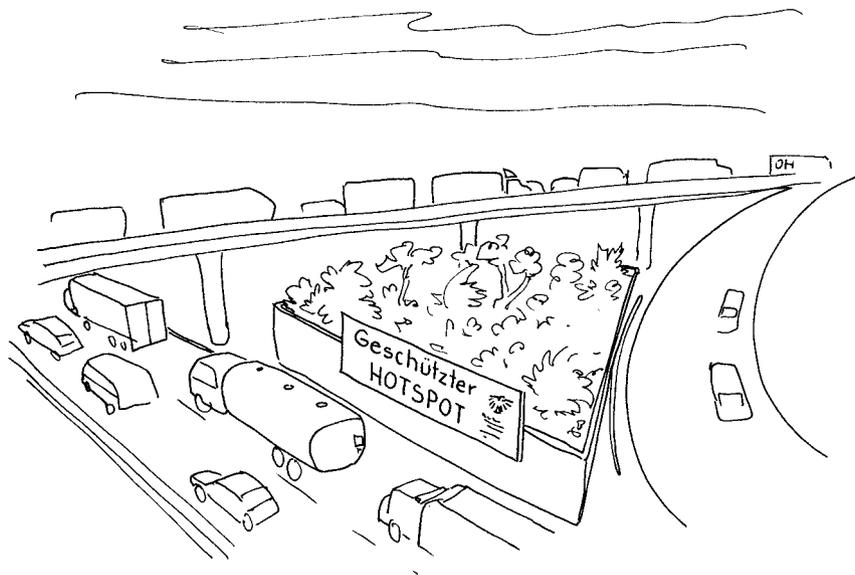
Warum auch Charisma zählt

Bei ihrer Auswahl unter den gefährdeten Arten hatte die amerikanische Wildlife Conservation Society denn auch mehrere Triage-Strategien kombiniert. Höher bewertet wurden zum einen größere Körpermaße und weitere Verbreitung – unter der Prämisse, dass Schutzmaßnahmen in dem Fall sicherlich etlichen weiteren Tieren und Pflanzen nützen. Zum anderen erhielten gleichfalls evolutionär markante, genetisch besondere Spezies oder Populationen eine hohe Einstufung. Und schließlich berücksichtigten die Experten auch eher subjektive Parameter wie den kulturellen Wert und das »Charisma« einer Spezies. Gerade Letzteres darf man beim Eintreiben von Geldern nicht unterschätzen. Laut Martha Groom, die in den Gremien in einer führenden Position mitwirkte, wählte die amerikanische Naturschutzgesell-

schaft den kombinierten Ansatz schon deshalb, weil für engere Blickwinkel das benötigte Wissen zu den einzelnen Arten gefehlt hätte – ganz abgesehen davon, dass sich vieles gar nicht quantifizieren lässt.

Manche Forscher machen sich dafür stark, nicht Arten, sondern besser gleich ganze Ökosysteme für Schutzprojekte auszuwählen, wegen der immensen Bedeutung der Beziehungen zwischen den Organismen. Ende der 1980er Jahre brachte der britische Ökologe Norman Myers von der University of Oxford in dem Zusammenhang das Konzept der Hotspots ins Gespräch. Gemeint waren damit gewissermaßen ökologische Brennpunkte: besonders artenreiche, bedrohte Gebiete der Welt mit vielen nur dort heimischen Pflanzen. Eine Forschergruppe der Organisation Conservation International mit Sitz in Washington erkor damals 25 solche Hotspots, deren Schutz erste Priorität haben sollte. In gewisser Weise werden hierbei zwei Prinzipien vereint: Sowohl Ökobeziehungen (somit ökologische Funktionen) als auch die genetische Vielfalt (nämlich evolutionäre Besonderheiten) erhalten Gewicht. Die Idee machte bald Schule. Heute fließt sie in viele Entscheidungen zum Umwelt- und Artenschutz ein.

Jedoch erfährt das Konzept der Hotspots zunehmend Kritik. Manche Fachleute halten es für zu eng, einmal weil es ein globales Problem zu stark auf ein paar einfache Vorstellungen herunterbricht, zum anderen weil es menschliche



Belange unzureichend berücksichtigt (siehe: »Mensch und Natur – keine Gegner«, SdW 9/2008, S. 69). Zu den Kritikern gehört Hugh Possingham von der University of Queensland in Brisbane. Damals, meint er, sei diese Idee genial gewesen, nur leider zu einseitig.

Als Alternative zu dem Hotspot-Konzept entwickelten Possingham und seine Kollegen für die Suche nach den bestmöglichen Schutzgebieten das frei zugängliche Softwareprogramm Marxan. Es unterstützt die Prioritätenfindung und wird inzwischen weltweit bei verschiedenen Großprojekten benutzt, unter anderem für das australische Great Barrier Reef, die Galapagosinseln und die Ostsee. Diese Software ist so ausgelegt, dass sie zugleich Kostenfaktoren von Schutzmaßnahmen und eine maximale Effektivität infolge der Auswahlkriterien berücksichtigt. Dabei bewertet sie, inwieweit in einem Gebiet nur dort heimische Arten leben, sowie unter anderem den Gefährdungsgrad des Ökosystems oder einzelner Spezies. Auch fließt ein, was die angepeilte Maßnahme über schon bestehende Reservate hinaus zusätzlich bringt, also wie viel mehr mit einer neuen Schutzzone zu erreichen ist. Mangrovenwälder zum Beispiel sind nicht besonders artenreich. Wenn man Hotspots deklariert, würden sie vermutlich durch das Raster fallen. Anders beim Marxan-Programm: Sie hätten dort die Chance auf eine hohe Einstufung, wo artenreichere Waldgebiete schon unter Schutz stehen – nämlich wegen der hierdurch größeren Gesamtzahl betroffener Arten in dem Gebiet.

Auf Dauer wird es sich nicht bewähren, im Artenschutz auf Gebiete mit definierten Grenzen zu setzen – zumal sich die Verbreitungsgebiete mancher Arten infolge des Klimawandels bereits verschieben und es oft alles andere als einfach ist, Schutzzonen überhaupt zu deklarieren und dann zu überwachen. Auch diesem Aspekt versucht Possingham zu begegnen – mit einem Bewertungsverfahren, das nicht nur die eingebrachten Mittel und den potenziellen Nutzen eines Projekts gegeneinander abwägt, sondern zudem dessen Erfolgswahrscheinlichkeit hinzuzieht. Entscheidungsträger können damit verschiedene Optionen besser einschätzen. Laut Possingham käme es ohnehin darauf an, bei der Prioritätenfindung nicht so sehr die Arten im Blick zu haben als vielmehr die konkreten Maßnahmen, schon weil so mancher Eingriff mehr als einer Spezies nützt.

Trotz Triage: Abgeschrieben wird keine Spezies

Das genannte Priorisierungsverfahren hat auch Neuseeland angewendet, um herauszufinden, wie man am besten bei 710 heimischen Arten vorgehen sollte, deren Bestände abnehmen. Dabei kam heraus, dass mit demselben Geld etwa anderthalb mal so viele Pflanzen und Tiere vor dem Aussterben gerettet werden können, wenn die preiswertesten und zugleich aussichtsreichsten Lösungen Vorrang erhalten, als wenn man in herkömmlicher Weise verfährt. Zwar gefällt es nicht jedem Experten, vor allem auf die Anzahl geretteter Arten zu schauen. Mancher würde es demgegenüber vorziehen, die Funktionen und Leistungen von Ökosystemen mehr zu betonen. Dennoch erfolgt derzeit ebenfalls in Australien eine Erhebung nach dem von Possingham vorgeschlagenen Prinzip. Desgleichen laufen entsprechende Gespräche mit dem Fish and Wildlife Service der Vereinigten Staaten.

Die Menschen denken, dass man mit einer Triage Arten abschreibt und sich geschlagen gibt, kommentiert Possinghams Kollegin Madeleine Bottrill von Conservation Inter-



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Artenvielfalt und
Artensterben« finden Sie unter

www.spektrum.de/artenvielfalt

national. Im Gegenteil würden aber dank veranschlagter Kosten und Gewinne die Vor- und Nachteile von Aktionen viel besser deutlich. Denn nun könnten die Verantwortlichen bezeichnen, was verloren zu gehen droht und was mit mehr Geldmitteln gerettet werden könnte. Das stärke die Verhandlungsposition der Naturschützer und komme Spendenaktionen zugute. Derselben Meinung ist Tim Male von Defenders of Wildlife. Öffentlich gemachte Priorisierungsschemata würden gerade nicht Naturschutzbestrebungen untergraben, sondern politisch wie auch praktisch Vorteile einbringen. Deswegen sollte man mehr als bisher das vorhandene Knowhow und damit bereits erzielte Erfolge betonen. Gelingende Projekte seien in der Politik und bei den Menschen die beste Werbung für Naturschutz.

Allerdings gehen Erfolge durch Triage immer mit Verzicht und Verlusten an anderer Stelle einher, und redlicherweise sollte man auch die Einbußen eingestehen. Richard Maloney vom Naturschutzamt Neuseelands meint augenzwinkernd, es würde uns allen sehr liegen, die positive Seite unserer Leistungen hervorzuheben. Aber kaum jemand im Artenschutz gäbe bereitwillig zu, dass er gleichzeitig ein halbes Dutzend Arten dem Untergang preisgibt, während er sich um eine bestimmte Spezies bemüht. Und sogar Maloney selbst möchte die betreffenden Arten von Neuseeland am liebsten nicht nennen. Weit unten auf den dortigen Prioritätenlisten steht etwa der Felsenpinguin, dessen Bestände in den letzten Jahrzehnten so stark geschrumpft sind, dass die Art heute als gefährdet eingestuft wird. Schuld daran hat neben dem Ökotourismus, der Meeresverschmutzung und dem Klimawandel vor allem die Überfischung der Meere, die den Pinguinen ihre Nahrungsgrundlage nimmt. Gegenmaßnahmen wären sehr langfristig anzusetzen und zudem reichlich aufwändig und kostspielig. Laut Maloney darf man die tiefe Einstufung dieser Meeresvögel allerdings keineswegs als ihr Todesurteil begreifen, sondern vielmehr als Aufruf an andere Gruppen und Verantwortliche, tätig zu werden.

Und nicht zuletzt: Wie soll man sich verhalten, wenn die Rettung einer Art oder eines Ökosystems mit den vorhandenen Mitteln und Möglichkeiten ohnehin aussichtslos erscheint? Gibt man dann sehenden Auges auf? Selbst in offenbar hoffnungslosen Situationen trägt im Naturschutz niemand gern die Verantwortung für eine solche Entscheidung.

Wie bei medizinischen Entscheidungen im Katastrophen- und Kriegsfall ist im Natur- und Artenschutz die Grenze nie wirklich eindeutig zwischen hoffnungslosen Fällen und solchen, die vielleicht doch noch eine Chance haben. In den 1980er Jahren lebten in freier Wildbahn nur noch rund zwei Dutzend Kalifornische Kondore. Manche Naturschützer wollten die Art aussterben lassen, die im Pleistozän in weiten Teilen Nordamerikas vorkam. Doch andere kämpften für ihren Erhalt. Man fing die letzten Vögel ein, vermehrte sie in Gefangenschaft und wilderte die Nachzuchten aus. Heute ziehen bereits wieder über 200 Kondore ihre Kreise – auch wenn die Art nach wie vor stark bedroht ist.

Der Ökologe Richard Hobbs von der University of Western Australia in Perth warnt davor, in scheinbar aussichtslosen Situationen zu schnell aufzugeben. Bei Triage-Entscheidungen im Naturschutz bestehe die Gefahr, kurzfristige ökonomische Belange über langfristige Umweltziele zu setzen. Sogar der Endangered Species Act enthält eine Klausel, nach der die strengen Vorgaben in Sonderfällen verletzt werden dürfen. Allerdings muss darüber ein spezielles Gremium entscheiden. Und es hat die Regeln erst in einem einzigen bedeutenderen Fall gelockert: Das US-Forstamt durfte im Lebensraum des Nördlichen Fleckenkauzes eine begrenzte Menge Holz gewinnen.

Der Klimawandel, die wachsende menschliche Bevölkerung und diverse andere globale Entwicklungen setzen der Biodiversität zunehmend zu. Immer mehr Arten und selbst Ökosysteme werden nur mit großem Einsatz unsererseits überleben können. So nützlich die erörterten Priorisierungsstrategien dabei sind – wir werden höchstwahrscheinlich nicht umhinkönnen, ein paar der aussichtslosesten, aufwändigsten Hilfsversuche aufzugeben, denn davon profitierten zahlreiche andere Arten. In diesem Sinn überarbeiten US-Juristen derzeit den Endangered Species Act, damit er politischem Druck weiterhin standhält. Das Ziel, jede Art zu retten, soll aber weiterhin Vorrang haben. Beladen wir also die Arche bis zum Rand. ~

DIE AUTORIN



Michelle Nijhuis ist Journalistin und lebt in Colorado. Sie schreibt in vielen Publikationen Beiträge über Wissenschaft und Umweltfragen. Im Jahr 2011 war sie Stipendiatin der philanthropischen Alicia-Patterson-Stiftung und beschäftigte sich mit Strategien zum Schutz stark bedrohter Arten.

QUELLEN

- Barnosky, A. S.:** Heatstroke: Nature in an Age of Global Warming. Island Press, 2009 / Shearwater, 2010
Joseph, L. N. et al.: Optimal Allocation of Resources among Threatened Species: A Project Prioritization Protocol. In: Conservation Biology 23, S. 328–338, April 2009
Mann, C. C., Plummer, M. L.: Noah's Choice: The Future of Endangered Species. Knopf, 1995

LITERATURTIPPS

- Kareiva, P., Marvier, M.:** Mensch und Natur – keine Gegner. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 68–75
Ohne Rücksicht auf menschliche Belange kann Naturschutz nicht funktionieren.
Marris, E.: Die »neuen« Ökosysteme. In: Spektrum der Wissenschaft 2/2010, S. 68–73
Auch vom Menschen veränderte Lebensräume sind wertvoll.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178947

Computersimulationen und das Schicksal der Menschheit

»Die Grenzen des Wachstums« zeigen auch und vor allem die Grenzen der mathematischen Modellierung auf.

Von Brian Hayes

Vor mittlerweile 40 Jahren löste ein kleines Buch mit dem Titel »Die Grenzen des Wachstums« einen gewaltigen Wirbel aus. Die Autoren berichteten darin über die Ergebnisse einer Computersimulation, die sie vollmundig als »erste Phase des Projekts zum Studium der Lage der Menschheit« deklarierten. Den Modellrechnungen zufolge war diese Lage düster bis aussichtslos: Unsere Zivilisation hatte noch ein knappes Jahrhundert zu leben; dann würden ihr Überbevölkerung, Hunger, Erschöpfung der Ressourcen und Umweltverschmutzung ein katastrophales Ende bereiten. Als junger Journalist war ich von dieser apokalyptischen Vision tief beeindruckt – und zugleich fasziniert von der Idee, man könne dem Schicksal der Menschheit mit mathematischen Berechnungen auf die Spur kommen.

Damals, 1972, hatte ich noch keine Chance, das zugehörige mathematische Modell in seinen Einzelheiten zu erkunden. 20 Jahre später konnte ich das nachholen. Mit einem eigenen Computer und vorgefertigter Software spielte ich verschiedene Szenarien des Modells durch; daraus wurde mein erster Beitrag zur Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«, aus der auch der vorliegende Artikel stammt. Das Modell bot ein sehr durchwachsenes Bild. In der Tat stellte es sich als schwierig bis unmöglich heraus, die Katastrophe abzuwenden. Nur eine einzige Stellgröße lieferte etwas weniger

düstere Ergebnisse: der nichtproduktive Konsum. Merkwürdigerweise führten sowohl sehr niedrige Werte – ein asketischer Lebenswandel für die ganze Menschheit – als auch sehr hohe – Luxusleben oder ab und zu ein Material fressender Krieg – zu einigermaßen stabilen Verhältnissen.

Kürzlich, wieder 20 Jahre später, bin ich nochmals in das Thema eingestiegen, diesmal allerdings in die Details: die 150 Gleichungen, welche die Entwicklung der simulierten Welt bestimmen. Der Befund hat mein Vertrauen in die Prognosefähigkeit des Modells nicht gefestigt.

Gleichwohl bleibt die Vorstellung, wir könnten mit Hilfe von Modellrechnungen etwas über das Schicksal unseres Planeten erfahren, überaus attraktiv. Schließlich gibt es nicht viele andere ernst zu nehmende Möglichkeiten, die Zukunft vorherzusagen. Aber was unterscheidet die modernen Methoden, die es in der Tat verdient haben, von den Politikern ernst genommen zu werden, namentlich die Klimamodelle, von denen des Bestsellers aus dem Jahr 1972?

Frühe Systemdynamik

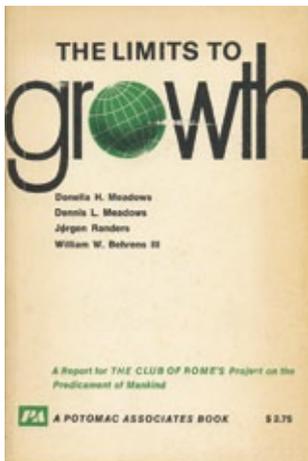
Das Buch »Die Grenzen des Wachstums« nennt als Verfasser Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jørgen Randers und William W. Behrens III. Außerdem wird ein Projektteam mit 17 Mitgliedern aufgeführt – aber der wichtigste Kopf hinter dem im Buch dargestellten Modell fehlt. Es handelt sich um Jay W. Forrester, der 1939 als Doktorand der Elektrotechnik ans Massachusetts Institute of Technology (MIT) kam und heute, fast ein Dreivierteljahrhundert später, immer noch dort aktiv ist, als emeritierter Professor. Forresters frühe Arbeiten befassen sich mit automatischer Steuerung und Servomechanismen. Unmittelbar nach dem Krieg baute er den größten digitalen Computer seiner Zeit und erfand wenig später das Bauteil, das bis Mitte der 1970er Jahre praktisch jedem Rechner als Arbeitsspeicher diente: den Magnetkern-RAM (Random Access Memory, Direktzugriffsspeicher).

1956 zog Forrester auf die andere Seite des Campus um, in die Sloan School of Management, und wandte dort seine Konzepte aus der Steuerungstechnik, insbesondere das der Rückkopplung, auf ökonomische Probleme an. So erklärte er

AUF EINEN BLICK

DÜSTERE PROGNOSE IM ZWIELICHT

- 1 Den Voraussagen von »Die Grenzen des Wachstums« liegt ein **mathematisches Modell namens World3** zu Grunde, welches das Weltgeschehen in 150 Gleichungen abbildet.
- 2 World3 enthält so viele Vergrößerungen, willkürlich gewählte Zahlenwerte und ungerechtfertigte Annahmen, dass es **als Prognoseinstrument unbrauchbar** ist.
- 3 Gleichwohl hat das Buch wesentlich dazu beigetragen, dass die **Begrenztheit der irdischen Ressourcen** und das **Konzept der Nachhaltigkeit** ins öffentliche Bewusstsein gedrungen sind.



Nach 40 Jahren sieht das Buch »Die Grenzen des Wachstums« ziemlich alt aus – auch weil Brian Hayes regen Gebrauch von seinem Exemplar des amerikanischen Originals gemacht hat.

das zyklische Auf und Ab von Beschäftigung und Arbeitslosigkeit als ein Phänomen der Übersteuerung, verursacht dadurch, dass die Firmen zu spät oder zu heftig auf Veränderungen der Verkaufszahlen reagieren. Rückkopplungsschleifen und die Gefahr von Übersteuerungen wurden die Leitmotive einer Theorie, die Forrester »Systemdynamik« taufte und auf neue Felder anwandte. Seinem Buch »Industrial Dynamics« über Unternehmensführung folgte »Urban Dynamics« über die Verwaltung von Städten.

Im Jahr 1970 nahm Forrester an einem Treffen des Club of Rome teil, einer Art »unsichtbarer Akademie« ohne feste Strukturen, deren Mitglieder sich der Suche nach neuartigen Zugängen zu sozialen und Umweltproblemen widmeten. Auf dem Heimflug skizzierte er mit Hilfe seiner Systemdynamik ein Modell für die Weltwirtschaft und das Ökosystem der Erde, das er in wenigen Wochen zu einem funktionsfähigen Prototyp namens »World2« ausarbeitete. Der Club of Rome bot ihm daraufhin an, seine weitere Arbeit finanziell zu unterstützen, aber Forrester zog es vor, seine Forschungen unabhängig fortzusetzen. Ein Jahr später veröffentlichte er seine Resultate in dem Buch »World Dynamics«. Derweil scharte Forresters Kollege und früherer Student Dennis

Meadows für das Projekt des Club of Rome eine Gruppe von Mitstreitern um sich und entwickelte gemeinsam mit ihnen eine eigene Version des Modells: »World3«.

Die Welt als Anlage aus Behältern und Ventilen

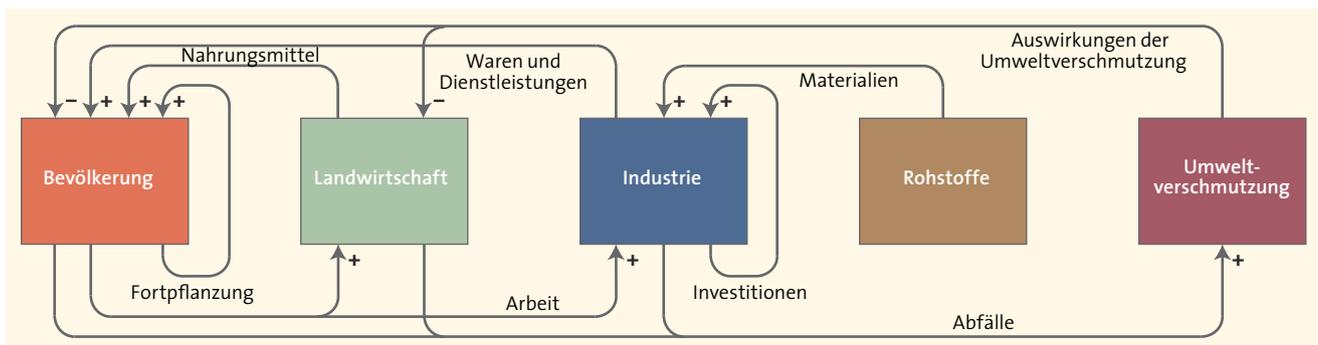
Ein Diagramm eines systemdynamischen Modells sieht auf den ersten Blick aus wie die schematische Darstellung einer Ölraffinerie. Diverse Behälter sind durch ein Gewirr von Rohren miteinander verbunden. Ventile regeln die Durchflussraten durch diese Rohre; sie werden ihrerseits gesteuert durch Signale, die vom Füllstand bestimmter Vorratsbehälter oder von den Strömungen an anderen Stellen des Modells abhängen.

Das Modell World3 ist in fünf Hauptabteilungen gegliedert: Bevölkerung, Landwirtschaft, Industrie, Rohstoffe und Umweltverschmutzung (Bild unten). Was im Bereich Bevölkerung in den Behältern steckt und durch die Rohre strömt, sind Menschen unterschiedlicher Altersgruppen, und die Ventile entsprechen den Geburts- und Sterberaten sowie dem zeitlichen Prozess, der Menschen von einer Altersgruppe in die nächste überführt. Im Landwirtschaftssektor steht der Inhalt eines Behälters für Anbaufläche; Zufluss ist zu interpretieren als Urbarmachung von Acker- und Weideland, Abfluss als dessen Verlust durch Erosion oder Bebauung. In der Abteilung Industrie ist die wichtigste »Zustandsgröße« das Kapital; es wird zwar in Dollar ausgedrückt, steht aber für Produktionsmittel aller Art. Der Zufluss besteht hier aus Investitionen, der Abfluss aus Wertminderung durch Abnutzung.

Greift man einen kleinen und isolierten Ausschnitt des Leitungsgewirrs heraus, so ist dessen Verhalten häufig einigermaßen durchschaubar. So hat der Sektor Rohstoffe keinen Zufluss, denn er umfasst ausschließlich nicht erneuerbare Ressourcen wie Erze oder fossile Brennstoffe. Das Ventil, das den Abfluss regelt, wird durch die Größe Gesamtbevölkerung mal Pro-Kopf-Verbrauch an Rohstoffen gesteuert.

Dagegen passt das komplette Labyrinth aus Behältern, Röhren und Ventilen nur noch mit Mühe auf eine Zeitungs-

Das in den »Grenzen des Wachstums« vorgestellte Modell World3 umfasst fünf Hauptsektoren mit zahlreichen gegenseitigen Abhängigkeiten, die hier nur ausschnittsweise gezeigt sind. In den Sektoren »Bevölkerung« und »Industrie« gibt es selbstverstärkende Rückkopplungsschleifen, denn Menschen und Kapital pflügen sich umso stärker zu vermehren, je mehr davon schon da ist.



seite. Dessen Funktion mit bloßem Auge zu erfassen, ist völlig aussichtslos. Deswegen packt man es ja in den Computer, damit der alle Füllstände und Flussraten zugleich nachverfolgt.

Die Simulation World3 umfasst den Zeitraum von 1900 bis 2100. Lässt man sie mit den von den Autoren vorgegebenen Standardwerten für alle Parameter durchlaufen, so sind die nicht erneuerbaren Rohstoffe Mitte des 21. Jahrhunderts aufgebraucht, woraufhin der Füllstand der Behälter Industrie, Nahrungsmittel und Bevölkerung drastisch zurückgeht (Kasten rechts). Mit der doppelten Ausgangsmenge an Rohstoffen ändert sich zwar das Ergebnis, aber nicht gerade zum Besseren: Durch die erhöhte industrielle Aktivität wächst die Umweltverschmutzung so ungehemmt, dass sie nicht nur dem Wachstum, sondern auch dem Überleben abträglich ist. Wir sterben dann einige Jahrzehnte später, und zwar nicht an Erschöpfung der Rohstoffe, sondern – direkt oder indirekt – an einer selbst verursachten Vergiftung. Einerlei, wie wir die Anfangsbedingungen setzen: Das Modell läuft in eine Übersteuerung, und ihr folgt der Zusammenbruch.

Hauen und Stechen um World3

»Die Grenzen des Wachstums« erschien in einer Zeit erwachenden Umweltbewusstseins. Ein Jahrzehnt zuvor war Rachel Carsons »Stummer Frühling« (»Silent Spring«) erschienen. Garrett Hardin hatte mit seinem Essay »Tragedy of the Commons« die Tragik der Allmende ins öffentliche Bewusstsein gehoben: Es ist für jeden rational, ein Gemeingut wie Luft, Wasser oder eine saubere Umwelt zum eigenen Vorteil zu nutzen, aber für alle schädlich, weil daraufhin das Gemeingut zusammenbricht. Paul R. Ehrlichs »Bevölkerungsbombe« (»The Population Bomb«) machte auf die damals schon explosionsartig wachsende Weltbevölkerung aufmerksam, und Barry Commoners »The Closing Circle« verbreitete Grundprinzipien der Ökologie, die heute ins allgemeine Bewusstsein übergegangen sind. Ein empfängliches Publikum hatte die »Grenzen des Wachstums« bereits ungeduldig erwartet – und kaufte zehn Millionen Exemplare.

Neben der breiten Zustimmung blieb lautstarke Kritik nicht aus. Am sorgfältigsten argumentierte eine Gruppe an der University of Sussex in England; ihre Schrift »Models of Doom« ist umfangreicher als das kritisierte Buch. Der prominente Umweltwissenschaftler Vaclav Smil verwarf das gesamte Unternehmen später als »eine Übung in Falschinformation und Verschleierung«.

Die Hauptvorwürfe gegen das Modell World3 kamen bemerkenswerterweise aus zwei entgegengesetzten Richtungen. Erstens unnötige Kompliziertheit: Nur um zu demonstrieren, dass exponentielles Wachstum nicht unbegrenzt fortgesetzt werden kann, braucht man nicht 150 Gleichungen; eine genügt vollauf. Zweitens unzulässige Vereinfachung durch Zusammenfassung von Dingen, die nicht zusammengehören. So erfasst das Modell alle Rohstoffe der Industriegesellschaft – Kohle und Öl, Eisen und Aluminium, Diamanten und Kies – in einer summarischen Größe, die in abstrakten »Rohstoffeinheiten« gemessen wird. Ein einziger Zahlenwert

für Umweltverschmutzung erfasst alles von Rückständen an Pflanzenschutzmitteln bis zu radioaktivem Abfall. Andere Größen sind wenig aussagefähige globale Durchschnittswerte. So lässt sich dem Nahrungsmittelverbrauch pro Kopf nicht entnehmen, ob Millionen von Menschen vom Hungertod bedroht sind. Immerhin berücksichtigt ein späteres, von Mihajlo Mesarovic und Eduard Pestel entwickeltes Modell des Club of Rome regionale Unterschiede in der Verteilung.

Ein anderer Angriffspunkt der Kritik betrifft die Eingabedaten des Modells. Das sind sowohl die Anfangswerte, zum Beispiel der Gesamtvorrat an nicht erneuerbaren Rohstoffen im Jahr 1900, als auch die numerischen Konstanten, mit denen die Stärke der Wechselwirkungen ausgedrückt wird, etwa der Einfluss der Umweltverschmutzung auf die Landwirtschaft. Die Autoren der »Grenzen« und ihre Mitstreiter haben sich zwar bemüht, realistische Werte für diese Größen zu finden, aber es blieben gewaltige Unsicherheiten, die nicht weiter statistisch analysiert wurden.

Sowohl Forrester als auch die »Grenzen«-Gruppe verfassten daraufhin Entgegnungen, die an starken Worten und ätzendem Spott den Kritikern nicht nachstanden. Von ihren Modellen nahmen sie nichts zurück. Auch in den aktualisierten Fassungen von 1992 und 2004 haben die Autoren am Modell nur geringe Änderungen vorgenommen und bleiben bei ihren ursprünglichen Schlussfolgerungen.

In jüngster Zeit scheint World3 in der öffentlichen Gunst wieder zuzulegen. Der Umweltwissenschaftler Charles A.S. Hall und der Meeresökologie John W. Day jr. erklärten 2009 das Modell im Wesentlichen für zutreffend. In einem 2011 veröffentlichten Buch fordert der italienische Chemiker Ugo Bardi die Rehabilitierung der »Grenzen des Wachstums«. Haben Dennis Meadows und seine Kollegen der herben Kritik zum Trotz doch Recht gehabt?

Alte Sprachen – für Computer

Nach 40 Jahren intensiver Auseinandersetzung war nicht zu erwarten, dass eine erneute Überprüfung von World3 irgendwelche Überraschungen zu Tage fördern würde. Dennoch ließ mir das Gefühl, das Modell noch nicht wirklich verstanden zu haben, keine Ruhe, und ich entschloss mich, es in seine Einzelteile zu zerlegen und wieder zusammenzusetzen.

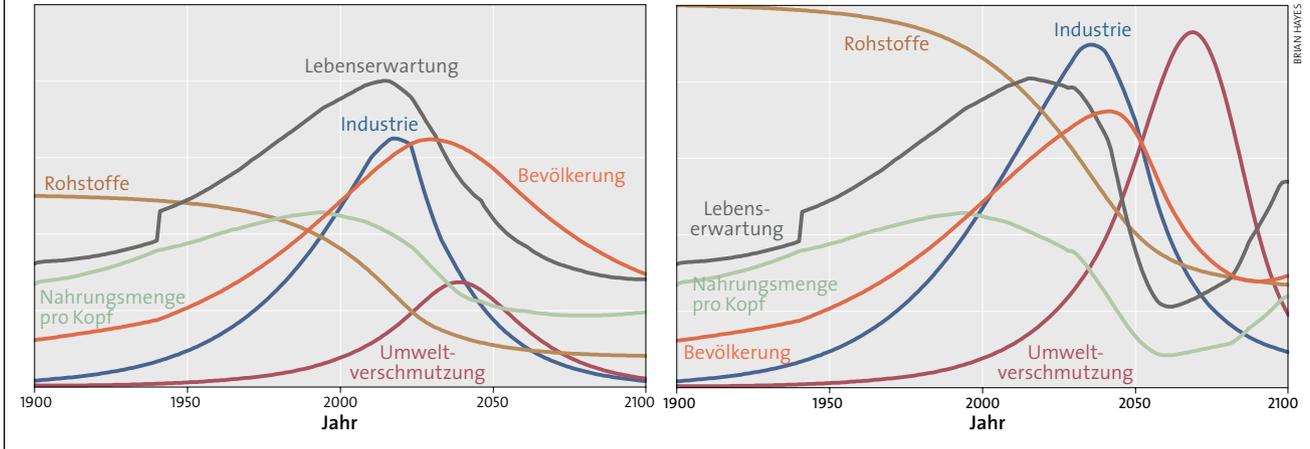
Für meinen Artikel von 1993 hatte ich mit einem Simulationspaket namens Stella II gearbeitet, das über eine komfortable Benutzeroberfläche verfügt und obendrein bereits eine vorgefertigte Version von World3 enthält. Stella II und Konkurrenzprodukte wie Modelica, Simgua und Vensim stehen auch heute noch zur Verfügung. Aber diesmal wollte ich der Maschine auch diesen Deckel noch abnehmen und die Zahnräder darunter einzeln begutachten.

Das ursprüngliche Modell World3 ist in einer Sprache namens DYNAMO geschrieben, die Phyllis Fox und Alexander Pugh in den frühen 1960er Jahren am MIT entwickelt hatten. Das DYNAMO-Programm für World3 ist in dem umfangreichen technischen Anhang zu dem 1972er Werk veröffentlicht. Um es zu verstehen, entschloss ich mich, es Zeile für

Verhungern oder vergiftet werden?

Mit den Anfangsgrößen, die den besten Schätzungen der Modellierer entsprechen, wachsen im Modell World3 Bevölkerung und wirtschaftliche Aktivitäten das ganze 20. Jahrhundert lang, brechen aber vor der Mitte des 21. ein, weil die nicht erneuer-

baren Rohstoffe nahezu erschöpft sind (links). Verdoppelt man deren Ausgangsmenge, so kommt der Zusammenbruch etwas später und wird nicht durch Rohstoffknappheit, sondern durch eine Umweltkrise verursacht.



Zeile in die moderne, dem Internet angepasste Sprache JavaScript zu übersetzen. Das Ergebnis meiner Schreibübung kann man auf <http://bit-player.org/limits> nachlesen.

DYNAMO stammt noch aus der Fortran-Ära, als Programme dem Computer auf Lochkarten eingegeben wurden und Speicherplatz so knapp war, dass Variablenamen nur sechs Zeichen lang sein durften. Das zwang die Programmierer, kryptische Namen wie »FIALD« zu verwenden und sich irgendwie zu merken, dass darunter so etwas wie »Fraction of Inputs Allocated to Land Development« zu verstehen war. Wer diese archaischen Denkhindernisse überwindet, findet eine interessante Programmiersprache vor, die außer den Systemdynamikern kaum jemand kennt. Sie ist im Wesentlichen deklarativ statt prozedural; das heißt, der Programmierer sagt der Maschine nicht, was sie der Reihe nach zu tun hat, sondern trifft Aussagen (»Deklarationen«) in Form von Gleichungen darüber, wie die einzelnen Variablen miteinander zusammenhängen. In welcher Reihenfolge diese Gleichungen (genauer: Zuweisungen) auszuwerten sind, regelt der DYNAMO-Compiler hinter den Kulissen.

Das Programm zu World3 umfasst etwa 150 Gleichungen. Zu jedem Behälter des Systemdiagramms gehört eine »Bestandsgleichung«, zu jedem Ventil eine »Ratengleichung«. Eine Bestandsgleichung berechnet den aktuellen Füllstand im Behälter aus dem Wert zu einem früheren Zeitpunkt sowie den aktuellen Zu- und Abflussraten. Das sieht in DYNAMO wie folgt aus:

$$V.K = V.J + DT * (IN.JK - OUT.JK)$$

Dabei ist V eine Bestandsvariable, IN und OUT sind Ratenvariablen für Zu- und Abfluss, und DT ist das »Integrationsintervall«, die Schrittweite der Simulation. Der Zustand der Welt wird immer nur zu Zeitpunkten berechnet, von denen

jeder den Abstand DT zum nächsten hat. Die Endungen K , J und JK sind Zeitmarken: $V.J$ und $V.K$ stehen für die Bestände von V in aufeinander folgenden Zeitpunkten, und $IN.JK$ ist die Zuflussrate für den Zeitraum dazwischen.

Nicht nur die Bestände hängen von den Zu- und Abflussraten ab, sondern auch umgekehrt. Was durch ein Loch im Eimer abfließt, wird nicht nur durch die Größe des Lochs bestimmt, sondern auch durch den Wasserstand im Eimer. Die dadurch entstehenden Rückkopplungseffekte machen das Modell erst interessant – und die Berechnung problematisch. Wenn der Bestand die Rate bestimmt und die Rate den Bestand, was rechnet man dann zuerst aus? DYNAMO bricht den Zirkel auf, indem es Raten und Bestände im Wechsel berechnet: Der Bestand zum Zeitpunkt t_0 bestimmt die Rate im Zeitraum t_0 bis t_1 , die ihrerseits den Bestand zum Zeitpunkt t_1 festlegt und so weiter. Einige Konflikte sind nicht so einfach zu lösen; hier bringt DYNAMO selbsttätig die Gleichungen in eine geeignete Reihenfolge.

Die Nebendarsteller haben die problematischsten Rollen

Neben den Beständen und Flussraten, die im Rampenlicht jedes systemdynamischen Modells stehen, gibt es eine ganze Reihe von Komparsen. Unter den 150 Gleichungen des Modells World3 sind nur 12 Bestands- und 21 Ratengleichungen; alle übrigen sind »Hilfsgleichungen« unterschiedlicher Art. Und in deren Gestrüpp findet sich der größte Teil der Komplexität – und auch der Fragwürdigkeit.

Bei den Bestands- und Ratengleichungen hat der Modellierer nicht viele Freiheiten. Die Bevölkerungszahl kann sich nur durch Geburten und Todesfälle ändern; Rohstoffe kann man ebenso wenig aus dem Hut zaubern wie landwirtschaftliche Nutzfläche. Solche Beschränkungen, die letztendlich

auf physikalische Erhaltungssätze hinauslaufen, gibt es für die Hilfsgleichungen nicht; sie beschreiben eher Informationsflüsse als Materialbewegungen und können nahezu jede mathematische Form annehmen.

Die Wege der Information in World3 bilden ein großes, weit verzweigtes Netz. Jeder Knoten ist irgendwie mit jedem verbunden, aber World3 ist nicht unbedingt eine »kleine Welt« in dem Sinn, dass zwischen zwei beliebigen Knoten ein Weg mit höchstens sechs Zwischenstufen existiert. So gibt es – im Modell wie in der Realität – eine Beziehung zwischen dem Dienstleistungsanteil an dem Behälter »Industrie« und der Bevölkerungszahl: Je mehr Geld die Menschen für Dienstleistungen ausgeben, desto mehr wenden sie auch für das Gesundheitswesen – einen Teil des Dienstleistungssektors – auf, was wiederum ihre Sterblichkeit mindert. Der entsprechende Weg im Netz der Hilfsgleichungen erfordert allerdings ungefähr ein Dutzend Schritte (Kasten rechts).

In vielen der Hilfsgleichungen stehen spezielle Konstanten oder Koeffizienten, manchmal sogar ganze Listen. Zum Beispiel ist die Funktion, die aus den Pro-Kopf-Ausgaben für Dienstleistungen die Pro-Kopf-Ausgaben im Gesundheitswesen bestimmt, mit Hilfe einer Liste von neun Zahlenwerten definiert. Das gesamte Modell enthält mehr als 400 Konstanten, Koeffizienten, Listeneinträge und Anfangswerte. Sie sind nicht durch irgendwelche Gesetzmäßigkeiten bestimmt, sondern müssen aus empirischen Erkenntnissen über die reale Welt gewonnen werden. Das allerdings ist ein schwieriger und fehlerträchtiger Prozess: Woher soll man wissen, ob der Wert 20 Jahre den Zeitverzug bei der Wirkung von Gesundheitsaufwendungen für die Lebenserwartung (Kasten) besser wiedergibt als etwa 24 Jahre? Im Endeffekt hat der Modellierer beträchtliche Freiheiten, durch geeignete Wahl der Konstanten den Ausgang der Simulation zu beeinflussen. Genau das macht aber das Ergebnis wenig überzeugend.

Eine weitere Quelle für Komplikationen ist das Zusammenwirken der Hilfsvariablen. Im Modell hängt die Lebenserwartung nicht nur von der Variable »Gesundheitsaufwendungen« ab, sondern auch von den Zahlenwerten für »Ernährung«, »Umweltverschmutzung« und »Überbevölkerung«. Aber wie werden diese vier Größen zu der Variable »Lebenserwartung« verrechnet? Die Mathematik hält eine schier unendliche Vielfalt von Funktionen bereit, aber die nächstliegenden – und beliebtesten – Kandidaten sind Addition und Multiplikation. Welche von beiden man wählt, macht allerdings einen dramatischen Unterschied.

Nehmen wir an, die Variable für die Gesundheitsausgaben fällt auf null. Bei einer Addition wäre das nichts Besonderes, bei einer multiplikativen Verknüpfung jedoch würde die Lebenserwartung selbst auf null sinken. Das ist offensichtlich absurd. Es wäre für die Menschheit sicher unbekömmlich, auf die Segnungen der Medizin zu verzichten, aber sie würde daraufhin nicht auf der Stelle aussterben. Was tut World3 hier? Es multipliziert, wendet aber auf das Ergebnis eine »abschneidende« Funktion an, die dafür sorgt, dass die Lebenserwartung immer zwischen 20 und 80 Jahren bleibt.

Ich erwähne dieses Detail nicht etwa, um eine der Möglichkeiten für falsch und die andere für richtig zu erklären. Ich will nur aufzeigen, wie viele subtile Entscheidungen in die Grundlagen des Modells eingeflossen sind.

Beim Durcharbeiten des Programms erkannte ich noch viele Möglichkeiten zur Verfeinerung. So macht es für die demografischen Effekte des Gesundheitswesens einen Unterschied, ob die medizinischen Dienstleistungen jungen Menschen (Impfungen) oder alten (Pflegeheime) zugutekommen. Solche und viele ähnliche Erweiterungen könnten sicherlich in das Modell aufgenommen werden; aber würde es dadurch verbessert? Wo sollte man dann aufhören? Welches ist ein geeignetes Maß an Komplexität?

Modelle für Modelle

Schon sehr kleine Modelle können überraschend reichhaltiges Verhalten zeigen. Ein Beispiel ist das Räuber-Beute-Modell, das Alfred J. Lotka und Vito Volterra unabhängig voneinander in den frühen 1920er Jahren entwickelten. Mit seinen nur zwei Gleichungen und vier Parametern ist es im Grunde, die zyklischen Veränderungen der Bestände von Raub- und Beutetieren, zum Beispiel Wölfen und Elchen, zu erklären. Je nach Wahl der Parameter strebt deren Anzahl gegen einen Gleichgewichtszustand oder schwankt – auf Grund von Rückkopplungen und Übersteuerungseffekten – heftig und einigermaßen periodisch hin und her.

Das Lotka-Volterra-Modell ist unter anderem deshalb so reizvoll, weil es so einfach ist. Aber es wäre naiv anzunehmen, jedes interessante Phänomen in der Welt ließe sich in maximal zwei Gleichungen pressen. Wer die menschliche Gesellschaft und das Ökosystem Erde beschreiben möchte, muss wahrscheinlich ein paar Variable mehr einführen.

An dieser Stelle ist ein Vergleich mit den globalen Klimamodellen hilfreich, die Stoff- und Energiekreisläufe für die Atmosphäre und die Ozeane, die Dynamik der Eisschilde und die Chemie der Luft beschreiben. Sie haben einiges mit World3 gemeinsam, vor allem die Grobstruktur: Bestandsgrößen wie Luft, Wasser und Wärmeenergie strömen nach bestimmten physikalischen Gesetzen von Behälter zu Behälter – allerdings sind es viel mehr Behälter. In beiden Fällen geht es darum, die Entwicklung dieser Größen Zeitschritt für Zeitschritt zu verfolgen, mit dem Ziel zu erfahren, was nach einigen Jahrzehnten geschieht. Und Rückkopplungseffekte spielen hier wie dort eine wesentliche Rolle.

Es gibt sogar historische Verbindungen. Das MIT begann etwa 1970, sich ernsthaft mit derartigen globalen Zirkulationsmodellen zu beschäftigen. Initiator war Carroll Wilson von der Sloan School of Management, der auch Forrester den Kontakt zum Club of Rome vermittelte.

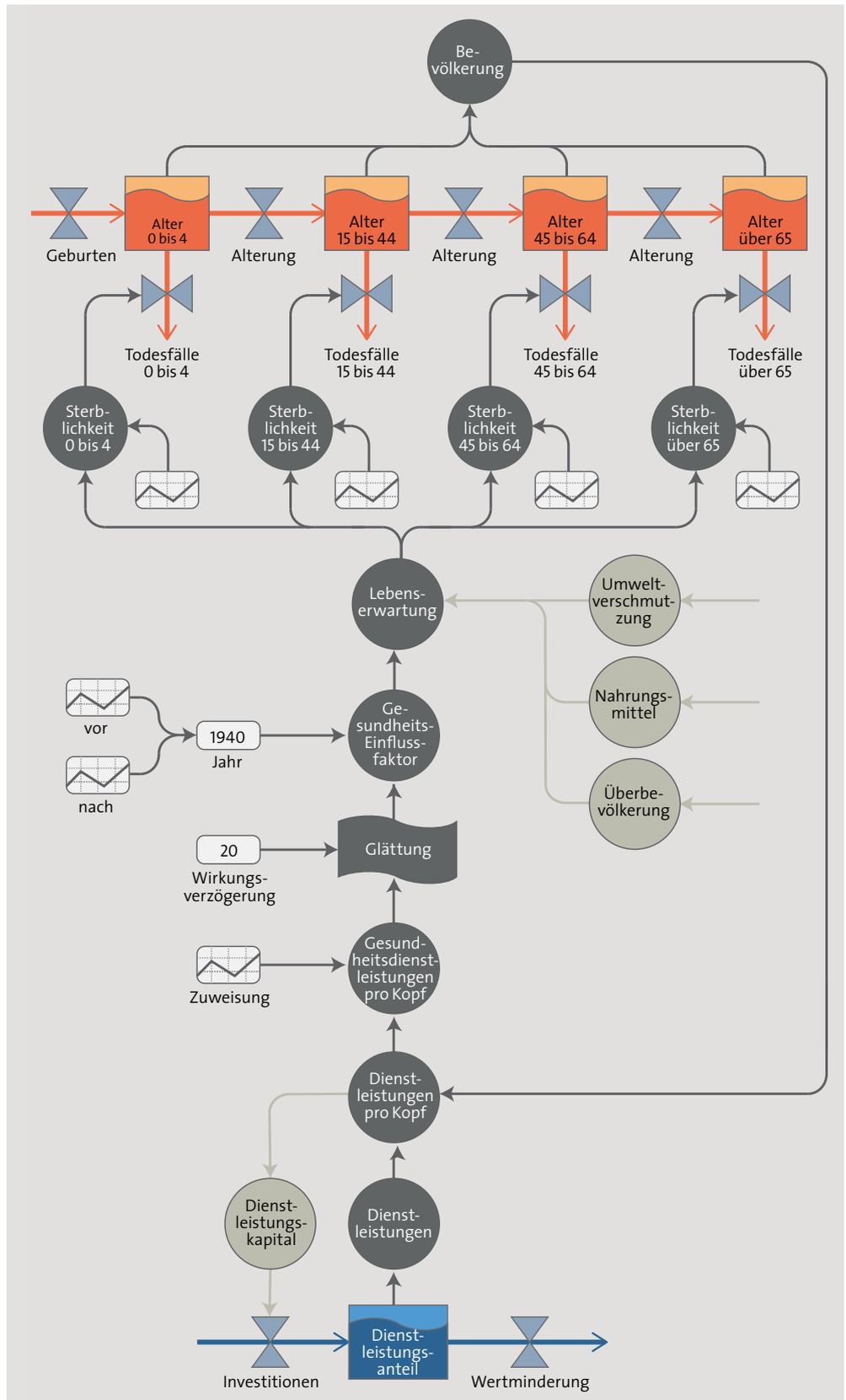
Die Unterschiede überwiegen jedoch diese Ähnlichkeiten. Während das »Grenzen«-Team eine eher lockere Haltung zur Praxis der Datensammlung hatte – und statistischen Methoden geradezu feindselig gegenüberstand –, betreibt die Gemeinde der Klimawissenschaftler die Erfassung von Daten, die sorgsame Verifizierung ihrer Herkunft und die Quantifi-

Das Modell World 3 – Blick ins Detail

Neben den Behältern (rechteckige Kästen) und den durch Ventile (doppelte Dreiecke) gesteuerten Flüssen zwischen den Behältern enthält das Modell zahlreiche Verbindungen, die im Wesentlichen als Informationsflüsse zu verstehen sind (graue Bild-elemente). Der im Bild gezeigte Ausschnitt aus dem umfangreichen Netz beschränkt sich auf die Verbindung zwischen dem Dienstleistungskapital (blauer Behälter unten) und der Bevölkerung (nach Altersgruppen aufgeteilt auf die roten Behälter oben). Sie wird durch die dunkelgrau gezeichneten Knoten vermittelt.

Eine entscheidende Variable ist die Lebenserwartung. Sie bestimmt die Sterberate in jeder der vier Alterskategorien und wird ihrerseits wesentlich vom Gesundheits-Einflussfaktor bestimmt; dieser wiederum hängt einerseits von den Gesundheitsausgaben pro Kopf ab, andererseits von einem Effizienzfaktor, der beschreibt, wie stark sich diese Ausgaben tatsächlich auf die Gesundheit auswirken. So würde die Entdeckung eines neuen Impfstoffs, dessen Anwendung für relativ wenig Geld viele Lebensjahre einbringt, den Effizienzfaktor in die Höhe treiben.

Viele dieser Einflussgrößen enthalten zahlenmäßige Konstanten (zum Beispiel die 20 Jahre Verzögerung, mit denen sich Änderungen im Gesundheitswesen auf die Lebenserwartung auswirken) oder Funktionen, die ihrerseits als Listen von Zahlen ins Programm eingehen (dargestellt durch die kleinen Funktionsdiagramme). Der oben genannte Effizienzfaktor verwendet für die Jahre bis 1940 eine andere Liste als für die Zeit danach. Daher macht just in diesem Jahr die modellierte Lebenserwartung – wider jede Realität – einen Sprung nach oben (Kasten S. 79).



zierung der unvermeidlichen Ungenauigkeiten mit leidenschaftlichem Eifer. Ihre Modelle beruhen nicht auf groben Schätzungen oder Mutmaßungen, sondern auf jahrzehntelang akribisch zusammengetragenen Messreihen – die »Infrastruktur des Klimawissens«, wie Paul Edwards es in seinem Buch »A Vast Machine« nennt.

Auch in der Größe liegen die beiden Vorhaben weit auseinander. Bei World3 haben ein Dutzend Leute ein bis zwei Jahre vor sich hin gearbeitet. Klimamodellierung dagegen ist »Big Science«. Mehrere hundert Wissenschaftler, organisiert in teils kooperierenden, teils konkurrierenden Gruppen, nehmen die größten und schnellsten Computer der Welt in Anspruch, während ihnen ihre Institute, die Politiker und – nicht zu vergessen – die Öffentlichkeit argwöhnisch auf die Finger schauen, und das seit etwa 40 Jahren.

Klimamodelle beschreiben vorwiegend physikalische und chemische Vorgänge, die wissenschaftlich sehr gut verstanden sind. Wir wissen viel über Absorptions- und Emissionsspektren von Molekülen in der Atmosphäre, und wir verstehen genau, wie ein Luftvolumen auf Erwärmung oder Druckveränderung reagiert. Dagegen gibt es für sozialen und ökonomischen Druck – also das, was die Dynamik von World3 beherrscht – nichts, was der allgemeinen Gasgleichung vergleichbar wäre. In diesem Sinn ist das Klimaproblem leichter.

Andererseits sind die Klimamodelle weit anspruchsvoller. Wo World3 nur verspricht, »die elementaren dynamischen Tendenzen des Systems zu illustrieren«, erwartet man von den Klimaforschern präzise quantitative Vorhersagen, zum Beispiel das Anwachsen der mittleren globalen Temperatur auf ein Zehntelgrad genau.

Grenzen der »Grenzen«

Nachdem ich mich im Abstand von jeweils 20 Jahren dreimal in »Die Grenzen des Wachstums« vertieft habe, fühle ich mich berechtigt, einige Meinungen zu äußern.

Zunächst: Die Hauptbotschaft des Buchs verdient es, gehört zu werden. Es gibt Grenzen, und jedes exponentielle Wachstum wird an diese Grenzen stoßen. Eine Gesellschaft, die ihr Wohlergehen nach der Steigerungsrate ihres Bruttoinlandsprodukts bemisst, befindet sich auf dem Weg in die Katastrophe. Allerdings glaube ich im Gegensatz zu den Autoren der »Grenzen«, dass wir fähig sind, die Probleme zu bewältigen, bevor die Welt in Hunger, Chaos, Gewalt und Umweltgiften versinkt.

Das mathematische Modell hinter dem Buch ist dagegen in meinen Augen eher ein Mittel der Polemik als eines der wissenschaftlichen Forschung. Forrester und die »Grenzen«-Gruppe haben wiederholt erklärt, die von ihren Computerprogrammen gezeichneten Diagramme sollten nicht als konkrete Vorhersagen über die Zukunft betrachtet werden, sondern nur als Hinweise auf »dynamische Tendenzen« oder »Verhaltensformen«. Diesen Vorsichtsklauseln zum Trotz ist das Buch voll von Ankündigungen mit starken Worten: »Sollten die gegenwärtigen Wachstumstrends unverändert anhalten ..., dann werden die Grenzen für das Wachstum auf diesem

Planeten irgendwann in den nächsten 100 Jahren erreicht.« Und für klare Ratschläge an die Politik waren den Autoren die Ergebnisse ihrer Studie, mag man sie Vorhersagen nennen oder nicht, allemal gut genug. So empfahl Forrester in den 1970er Jahren in einer Stellungnahme vor einem Ausschuss des amerikanischen Kongresses allen Ernstes, die Investitionen in Industrialisierung und Nahrungsmittelproduktion zu kürzen, um so das Bevölkerungswachstum einzudämmen.

Vielleicht hat Forrester ja damals dem Kongress einen guten Rat erteilt, und wir werden eines Tages bereuen, dass wir ihm nicht gefolgt sind. Aber ein mathematisches oder naturwissenschaftliches Argument muss schon die höchsten Anforderungen erfüllen, damit es eine Entscheidung mit derart drastischen Konsequenzen rechtfertigen kann.

In einer unveröffentlichten Arbeit über das Überprüfen von Modellen der Systemdynamik schrieben Forrester und einer seiner Studenten: »Die Validierung eines Modells hat letztendlich zum Ziel, dass ihm so viel Vertrauen entgegengebracht wird, dass es als Grundlage für politischen Wandel dienen kann.« Für World3 steht dieser Nachweis bis heute noch aus. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

- Cole, H. S. D. et al. (Hg.):** Models of Doom: A Critique of the Limits to Growth. Universe Books, New York 1973
- Edwards, P. N.:** A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming. MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 2010
- Hall, C. A., Day, J. W.:** Revisiting the Limits to Growth after Peak Oil. In: American Scientist 97, S. 230–237, 2009
- Hayes, B.:** Computing Science: Balanced on a Pencil Point. In: American Scientist 81, S. 510–516, 1993. Online unter <http://bit-player.org/bph-publications/AmSci-1993-11-Hayes-Limits-to-growth.pdf>
- Meadows, D. et al.:** Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. DVA, München 1972
- Meadows, D. et al.:** Die neuen Grenzen des Wachstums. Die Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunftschancen. DVA, München 1993
- Meadows, D. et al.:** Grenzen des Wachstums – Das 30-Jahre-Update: Signal zum Kurswechsel. Hirzel, Stuttgart 2011
- Mesarovic, M., Pestel, E.:** Menschheit am Wendepunkt. 2. Bericht des Club of Rome zur Weltlage. DVA, München 1982

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178949

© American Scientist
www.americanscientist.org



Bernd-Olaf Küppers
Die Berechenbarkeit der Welt
Grenzfragen der exakten Wissenschaften
Hirzel, Stuttgart 2012. 307 S., € 32,-

PHILOSOPHIE

Gedanken über die Natur

Der Naturphilosoph Bernd-Olaf Küppers erklärt
Fundamentalfragen der Naturwissenschaft.

Wer wie ich in einer Redaktion arbeitet, wird täglich mit Meldungen aus der Wissenschaft geflutet, die sich bei näherer Betrachtung fast durchweg als geistige Umweltverschmutzung herausstellen: winzige, banale, oft werblich gefärbte »Fortschritte«. Das wenige Nichttriviale herauszufiltern, ist für Wissenschaftsjournalisten zu einer Hauptbeschäftigung geworden.

Da tut es richtig gut, wenn ein Naturphilosoph wie Bernd-Olaf Küppers sich nach seiner Emeritierung von der Universität Jena zurücklehnt und Fragen Revue passieren lässt, um die es eigentlich geht: Was ist Leben? Ist absolutes Wissen möglich? Gibt es unlösbare Welträtsel? Ist Zeitlichkeit erklärbar? Wohin führt uns die Wissenschaft?

Der Autor hat für diese Publikation Beiträge aus mehreren Jahrzehnten aktualisiert und Redundanzen entfernt. Damit kann man erfreut feststellen, dass es bei solchen Grundfragen nicht um ephemere Tagesaktualitäten geht. Vielmehr erinnert uns die Lektüre daran, warum wir uns eigentlich für Wissenschaft interessieren: als nachvollziehbaren Zugang zur Welt, der im spekulativen Gewaber und Gewoge nach dem Verlässlichen sucht.

Eindrucksvoll setzt sich Küppers gleich in seinem ersten Beitrag mit dem legendären Ignorabimus-Streit auseinander, den Emil Du Bois-Reymond 1872 vom Zaun brach. Darin hatte der Berliner Physiologe Probleme

aufgelistet, die von den Naturwissenschaften niemals gelöst werden könnten. Das provozierte Forscher damals wie heute. Die Behauptung, dass etwas für die Wissenschaft prinzipiell unmöglich sei, ist riskant und sehr oft einfach falsch. Erfrischend zu sehen, wie Küppers die Spur vom 19. Jahrhundert über Haeckel, Hilbert und Gödel bis heute zieht und dabei beleuchtet, welche Grenzen unserem Wirklichkeitsbild tatsächlich gezogen sind.

So erinnert er am Beispiel der gödel-schen Unvollständigkeitssätze in der Mathematik daran, dass »Wahrheit etwas Umfassenderes ist als bloße Beweisbarkeit«. Und die Quantenphysik zeigt nicht nur, dass die menschliche Sprache für die physikalische Wirklichkeit nur begrenzt taugt. Sie modifiziert auch unseren Begriff vom Kausalgesetz: Quantensysteme sind nur statistisch vorhersagbar. Nichtlinearitäten setzen der Berechenbarkeit auch klassisch-chaotischer Systeme enge Grenzen.

Viele Menschen neigen dazu, Grenzen zwischen belebter und unbelebter Materie zu ziehen. Ein sinnloses Unterfangen, das nur Tautologien hervorbrächte, denn die physikalischen Prinzipien vom Ursprung des Lebens lassen sich weit gehend erklären, allerdings »um den Preis eines eingeschränkten Lebensbegriffes«.

Auch wehrt sich der Naturphilosoph gegen die schon rituelle Kritik an dem »mechanistischen« und »reduktionis-

tischen« Weltverständnis der exakten Wissenschaften. Diese versuchten das Ganze aus dem Verhalten der Teile zu erklären und könnten deshalb das Ganze nicht mehr begreifen – nicht analytisch zerlegendes, sondern ganzheitliches und vernetztes Denken sei geboten. Eine solche Sicht zeichne jedoch »ein völlig falsches Bild der Wissenschaft«, schreibt Küppers. Dem Mantra der alternativen Wissenschaft hält er entgegen, dass dem Begreifen im Sinn der Wissenschaft eine »analytische Zerlegung in Ursachen und Wirkungen« vorausgehen muss. Andernfalls würde »die strenge Methode der Kausalzerlegung durch die hermeneutische Methode unverbindlichen Weltverstehens ersetzt«. Die analytische Einsicht in das Ganze« muss dann »der bloßen Ansicht des Ganzen weichen«.

Auch sei beispielsweise die Physik nichtlinearer Systeme längst dem simplen mechanistischen Weltbild entwachsen. Letztlich sei die Ganzheitsdebatte ein Relikt der Romantik, und die Gefahr gehe in Wahrheit nicht vom analytischen, sondern eher vom ganzheitlichen Denken aus, da dieses »wesentlich zur politischen Indoktrinierung und Ausbildung totalitärer Systeme beigetragen hat«.

Von Du Bois-Reymonds ursprünglich sieben Welträtseln bleiben am Ende laut Küppers nur noch zwei übrig: das vernünftige Denken und die damit verbundene Sprache sowie das Rätsel der Willensfreiheit.

In weiteren der insgesamt zehn Kapitel ergründet der Naturphilosoph Themen wie »Was ist Leben?«, Sprache und Verstehen, Information und Komplexität, Schönheit und Ordnung, Einheit und Vielheit, Zeitlichkeit und Irreversibilität. Überrascht hat mich seine Analyse der Geschichtlichkeit: Lässt sich das Weltgeschehen in Formeln fassen? – Eine alte Frage, der alle Wissenschaften, die sich mit der Zukunft der Menschheit befassen, nur allzu gern auf die Spur kämen.

Was lässt sich aus Sicht der exakten Wissenschaften dazu sagen? Laut Küppers jedenfalls mehr, als man beim Anblick der erratischen menschlichen

Geschichte erwarten würde. Freilich gilt es zuvor, Begriffe wie Erklärung, Verstehen, Vorhersage aus ihrer Labordefinition etwas herunterzuschrauben und sich in einem ersten Schritt von der Komplexität historischer Prozesse zu verabschieden. »Erst danach wird man Schritt für Schritt die ursprüngliche Komplexität des Problems wiederherstellen ..., um so schließlich zu einem immer differenzierteren Bild des geschichtlichen Geschehens zu gelangen...«

Es ist spannend zu sehen, wie der Autor das Phänomen der Geschichtlichkeit analysiert und hierfür die chaotischen Systeme der Naturwissenschaft als ein »interessantes Modell« erkennt. Die Rolle der Randbedingungen, wie sie in der Kosmologie oder auch in der Evolution des Lebens wesentlich in die Beschreibung eingehen, sieht er anwendbar auf die Formen menschlichen Handelns.

Nicht jeder Exkurs fasziniert so wie die genannten. So frage ich mich, wie jemand, der nicht zufällig theoretische Physik studiert hat, im Abschnitt »Information« den Parcours an Formeln und Gleichungen heil übersteht. Auch Küppers' historische Ausführungen zu Versuchen des 19. Jahrhunderts, sich absolute Erkenntnis der Natur durch reines Nachdenken zu verschaffen und auf Empirie weit gehend zu verzichten, sind zwar an sich interessant, erwecken aus heutiger Sicht jedoch eher ungläubiges Staunen darüber, wie man sich so verbohrte der Wirklichkeit verweigern konnte. Manche Grafik, wie etwa die zur Fettsäuresynthese, wäre besser entfallen, da sie in der vorliegenden Form unzugänglich und nur verwirrend ist.

Diese Kritik soll einem positiven Gesamturteil keinen Abbruch tun. Küppers' stets klare und eingängige Sprache und vor allem die Wahl der Themen machen dieses Buch zu einem herausragenden Beitrag zum Stand der Welterkenntnis.

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist habilitierter theoretischer Physiker und Editor-at-Large bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Hanns Hatt, Regine Dee

Das kleine Buch vom Riechen und Schmecken

Knaus, München 2012. 224 S., € 14,99

PHYSIOLOGIE

Dufte!

Wir riechen nicht nur mit der Nase, sondern auch mit einer Vielzahl von Zellen in ganz anderen Regionen unseres Körpers.

Die Augen können wir schließen, die Ohren zuhalten – aufhören zu atmen und damit zu riechen können wir auf Dauer nicht. Die Nase ist ein zentrales Sinnesorgan, und das nicht nur wegen ihrer exponierten Stellung im Gesicht. Mit ihren rund 30 Millionen Riechzellen ist sie rund um die Uhr aktiv, auch im Schlaf. 350 verschiedene Düfte können wir unterscheiden, oft kombiniert zu Aromen – für Kaffee, ein Parfum oder gar »unser Zuhause«. Die Eindrücke wandern direkt ins Hirn, ohne Umweg über das Bewusstsein. Häufig finden wir einen anderen Menschen »dufte« oder können ihn »nicht riechen«, noch bevor unser Verstand ein Wörtchen mitzureden hat. Manche Düfte regen zudem die Ausschüttung von opiumähnlichen, körpereigenen Stoffen an, die uns glücklich machen, unsere Motivation steigern oder sogar Schmerz vertreiben.

Der Bochumer Zellphysiologie Hanns Hatt widmet sich seit Jahren diesem bemerkenswerten Sinn und weiß seine Erkenntnisse zusammen mit der Wissenschaftsjournalistin Regine Dee in allgemein verständliche Worte zu fassen. Nach »Das Maiglöckchen-Phänomen« und »Niemand riecht so gut wie du« ist das vorliegende Buch bereits das dritte Werk des Autorenpaars.

Selten hat mir ein Buch so gefallen wie dieses! Daran dürfte der journalistische Sachverstand der Mitautorin einen erheblichen Anteil haben. Dank kurzer Kapitel und einer erstklassigen

Sprache kann man das Buch getrost statt eines Krimis als Nachtlektüre konsumieren – und jeden Abend Erstaunliches erfahren.

Zum Beispiel, dass Duftstoffmoleküle offenbar nicht nur die Riechzellen in der Nase anregen. Rezeptoren dafür sind in vielen Organen im Inneren unseres Körpers zu finden. Welche Funktionen sie dort genau erfüllen, ist bislang kaum erforscht.

Hatts Forschergruppe entdeckte in der Prostata Rezeptoren, die genauso funktionieren wie die Riechzellen für Veilchenduft in der Nase. In der Vorsteherdrüse des Mannes spielt ein testosteronähnlicher Stoff die Rolle des Duftmoleküls; durch Aktivieren des Rezeptors erzeugt er ein Signal, welches das Wachstum der Zellen stoppt. Besonders viele Rezeptoren fand die Arbeitsgruppe in Krebszellen der Prostata. Auch diese stellten in Gegenwart des Veilchendufts ihr Wachstum ein – zumindest im Reagenzglas. Duftstoffe könnten daher eines Tages die Krebstherapie revolutionieren, hofft Hatt.

Spermien sind ebenfalls mit derartigen Rezeptoren ausgestattet. Sie folgen mit Elan der Spur eines Lockstoffs, der von der Eizelle ausgesandt wird und nach einer synthetischen Variante des Maiglöckchendufts riecht. Dieser – im Labor reproduzierbare – Effekt hat als »Maiglöckchen-Phänomen« mittlerweile große Bekanntheit erlangt. Seitdem fanden die Bochumer Forscher um Hanns Hatt Duftrezeptoren auch

in der Leber, im Herzen, in der Haut und selbst im Darmtrakt – was erklären könnte, warum Kräuter oder Gewürze sich so stark auf die Verdauung auswirken.

Hatt zeigt, dass Düfte uns stimulieren oder entspannen können, uns erfrischen oder erregen – oder manipulieren. Sie können uns sogar attraktiv, schlank oder jung erscheinen lassen. So berichtet der Bochumer Forscher von Studien, nach denen Frauen um ganze sechs Kilo leichter geschätzt wurden, wenn sie ein Parfüm mit blumigen Duftnoten benutzten. Und jede Frau, die um Jahre jünger wirken möchte, sollte sich ein paar Tropfen Pampelmusenduft auftupfen.

In der Hoffnung, das wirke auch beim Mann, irrte ich tagelang durch Drogerien auf der Suche nach einem Shampoo, das nach Pampelmuse duftet – leider ohne Erfolg. Dieses Erkenntnis scheint sich bei den Kosmetikerherstellern noch nicht durchgesetzt zu haben. Oder sie trauen der (leicht mit

der Pampelmuse zu verwechselnden) Grapefruit eine ähnliche Wirkung zu – was von den Bochumer Forschern wohl erst noch zu prüfen wäre.

Laut Hatt können ein paar Tropfen Pfefferminzöl sogar als Schlankmacher dienen: Auf ein Taschentuch getropft und beschnüffelt, beugen sie Heißhungerattacken vor und können den Appetit auf süße oder fette Speisen mindern.

Besonders spektakulär ist die Tatsache, dass viele der untersuchten Düfte sogar dann wirken, wenn sie unterhalb der bewussten Wahrnehmungsschwelle liegen. Selbst Menschen und Tiere, die durch Krankheit oder Unfall »nasenblind« geworden sind, reagieren auf unterschwellige Mengen an Duftstoffen wie Gesunde.

Hatt weiß auch zu berichten, dass in einigen Staaten der Erde Epilepsiepatienten regelmäßig von Hunden begleitet werden. Offenbar sind einige der Vierbeiner mit der bekanntermaßen höchst empfindsamen Nase in der Lage, den sich verändernden Körper-

geruch eines Patienten vor einem Anfall wahrzunehmen und ihn zu warnen. Einige trainierte Hunde dienen Diabetikern als lebende Alarmanlagen. Sie erschnüffeln deren Blutzuckerspiegel und geben bei Über- oder Unterzuckerung Laut.

Das ganze Buch handelt von solchen und ähnlichen Anekdoten. Trotz des harten wissenschaftlichen Kerns sind sie durchweg verständlich geschrieben und vielfach im Alltag anwendbar. So geben die Autoren Tipps, wie man mit Aromen besser einschlafen kann oder sich wach hält. Hatt glaubt sogar, man könne mit einem einfachen Riechtraining, bei dem man mehrmals täglich an fünf bis zehn Düften schnuppert, die Symptome der Demenz hinauszögern. Weitere kleine Trainingsprogramme für Nase und Gaumen runden das überaus gelungene Buch ab.

Gerhard Samulat

Der Rezensent hat Physik studiert und ist Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

AKTUELLES AUS DEM LESERSHOP



Sammelkassette

Die Sammelkassette von **Spektrum der Wissenschaft** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).



Jahrgangs-CD-ROM SdW 2012

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert).

Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); Lieferung: Februar 2013. ISBN 978-3-943702-22-4

www.spektrum.de/lesershop



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

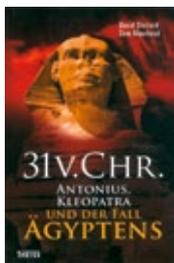
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



David Stuttard, Sam Moorhead

31 v. Chr.

Antonius, Kleopatra und der Fall Ägyptens

Aus dem Englischen von Cornelius Hartz.

Theiss, Stuttgart 2012. 184 S., € 24,95

GESCHICHTE

Ehrenrettung Kleopatras

Ein neues Buch lüftet den propagandistischen Schleier um die ägyptische Königin und die dramatischen Geschehnisse im Machtkampf zwischen Marcus Antonius und Octavian.

Das Jahr 31 v. Chr. hat den Lauf der Geschichte dramatisch verändert und damit dem Weltgeschehen eine gänzlich neue Richtung gegeben. Stefan Zweig hat solche Momente in seinen »Sternstunden der Menschheit« anschaulich beschrieben. Aber es gibt auch kaum ein historisches Ereignis, das derart verfälscht dargestellt wurde.

Die Ereignisse kulminierten am 2. September in der Seeschlacht von Actium an der griechischen Küste. Octavian (63 v.–14 n. Chr.) besiegte seinen Rivalen Marcus Antonius (82–30 v. Chr.) und dessen Gemahlin, die ägyptische Königin Kleopatra (69–30 v. Chr.). In der Folge mussten sich die Geschlagenen nach Alexandria zurückziehen.

Dort holte Octavian sie nach siegreichem Feldzug ein Jahr später ein, woraufhin sich beide im Abstand weniger Tage das Leben nahmen.

»Das Böse, das die Menschen tun, lebt nach ihnen fort; das Gute wird so oft mit ihren Knochen begraben«, heißt es bei Shakespeare. Und so war es auch mit Kleopatra, der letzten Königin auf dem Pharaonenthrone. Um ihren Ruf und den ihres Ehemanns zu ruinieren, setzten Octavian und seine willigen Helfer im Senat eine beispiellose Diffamierungskampagne in Gang. Kaum war die Nachricht vom Tod der Königin vom Nil am Tiber eingetroffen, hatte Roms Dichter Horaz auch schon seine berühmte Ode auf den Sieger verfasst

und diesen mit Lobeshymnen überschüttet.

Entsprechend negativ fiel das Urteil über die Verlierer aus. Marcus Antonius ging in die Geschichte als Schwächling und willenloses Werkzeug einer machtbesessenen Frau ein – wenig schmeichelhaft in der patriarchalischen Gesellschaft Roms. Kleopatra dagegen wurde als skrupellose, unmoralische und machtgierige Herrscherin hingestellt, ein nymphomanisches Luxusflittchen, das in Eselsmilch badete, in Essig gelöste Perlen schlürfte und an Sklaven die Wirkung tödlicher Gifte erproben ließ. Und das sind nur einige der zahlreichen Legenden, die sich um ihr Leben ranken.

Die vor mehr als 2000 Jahren gezündeten Nebelkerzen haben Literatur, Kunst und Geschichtsschreibung gleichermaßen nachhaltig beeinflusst und trüben noch heute unser Urteil. Die »Hurenkönigin vom Nil«, wie sie der römische Dichter Properz diffamierte, wurde in der Folgezeit zur Sünderin, über die sich der ehrbare Bürger hemmungslos erregen durfte, zur Trash-Figur von akademischer Malerei (Bild links), Film und Trivilliteratur oder zur tragischen Heldin wie in Shakespeares »Antony and Cleopatra«.

Erst die jüngste Geschichtsschreibung hat dank neuen Quellen wichtige Aspekte herausgearbeitet. Kleopatra war in erster Linie die kluge, politisch taktierende Königin von Ägypten. Ihr Schicksal war es, dass sie im Zentrum weltgeschichtlicher Auseinandersetzungen zwischen der aufstrebenden, pragmatischen Weltmacht Rom und dem im Verfall begriffenen uralten Pharaonenreich stand, dessen letzter regierender Pharaos sie war.

Im vorliegenden Buch rekonstruieren Sam Moorhead, Berater für britische Altertümer am British Museum in London, und der Journalist und Regisseur David Stuttard kenntnisreich, anschaulich, unterhaltsam und wohlthuend nüchtern die hochdramatischen Ereignisse zwischen der Ermordung Cäsars an den Iden des März 44 und dem Selbstmord Kleopatras im August 30 – jenen Zeitraum also, in dem nicht



In der Malerei des 19. Jahrhunderts wurde die Figur der Kleopatra zunehmend erotisch aufgeladen: »Tod der Kleopatra« (1874) von André Rixens (1846–1924).

AKG IMAGES / ERICH LESSING (AUSSEE-BISALCUSTINS, TOULOUSE)



Josef Gaßner, Harald Lesch

URKNALL, WELTALL UND DAS LEBEN

Vom Nichts bis heute Morgen
2012, 352 S. m. 123 Abb., geb.,
Komplett Media

Bestell-Nr. 3766
€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Den Urknall, das Weltall und das Leben verstehen? Vielleicht ist das zu hoch gegriffen – aber eines können Harald Lesch und Josef M. Gaßner versprechen: Sie erklären die Geheimnisse des Kosmos so verständlich wie nur möglich. Die beiden Gelehrten plaudern miteinander über Fragen wie: Woher wissen wir das alles? Wie konnte Alles aus dem Nichts entstehen? Was war vor dem Urknall? Warum gibt es Sterne und Galaxien? Wie ist das Leben entstanden? Was sind Neutrinos, Higgs und LHC? Gibt es Leben auf fernen Planeten? Wo ist die Grenze der wissenschaftlichen Erkenntnis? Ist noch Platz für Gott in unserem Weltbild?

Lieferbar auch als Hörbuch unter: www.science-shop.de/artikel/1167971 – oder rufen Sie uns einfach an!



Peter M. Higgins

DAS KLEINE BUCH DER ZAHLEN

Vom Abzählen bis zur Kryptographie
2012, VIII, 354 S. m. 35 Abb., kart.,
Spektrum

Bestell-Nr. 3748
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Peter Higgins verarbeitet Jahrhunderte des Fortschritts zu einer erbaulichen Erzählung, die das Geheimnisvolle der Zahlen hervorhebt und erklärt, wie die verschiedenen Arten von Zahlen aufgetaucht sind und weshalb sie nützlich sind. Das Buch enthält viele historische Anmerkungen und interessante Beispiele, und es behandelt einfache Zahlenrätsel und Zauberkünste ebenso wie Verbindungen zu Problemen des Alltags.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Udo Gansloßer, Kate Kitchenham

FORSCHUNG TRIFFT HUND

Neue Erkenntnisse zu Sozialverhalten, geistigen Leistungen und Ökologie

2012, 240 S. m. 250 Farbbabb., geb., Kosmos
Bestell-Nr. 3751
€ 29,99 (D), € 30,90 (A)

Immer mehr Forschungsprojekte in Europa und den USA befassen sich mit dem Haushund, seiner Entwicklung, seinem Verhalten, seiner Intelligenz und seinen Emotionen. Dr. Udo Gansloßer und Kate Kitchenham berichten über die Forscher und ihre Arbeit, fassen die interessantesten Ergebnisse zusammen und geben damit Hundehaltern Anleitung für ein besseres Verständnis ihres Vierbeiners.



Richard Dawkins

DER ZAUBER DER WIRKLICHKEIT

Die faszinierende Wahrheit hinter den Rätseln der Natur

2012, 270 S. m. zahlr. Abb., geb., Ullstein

Bestell-Nr. 3752
€ 26,99 (D), € 27,80 (A)

Seit jeher hat die Menschheit versucht, sich die rätselhafte Natur durch Mythen begreiflich zu machen. Auf den Herbst folgt der Winter, weil Hades, Persephone in sein Reich entführt hat und die blühende Natur mit ihr; in Wirklichkeit gibt es unterschiedliche Jahreszeiten, weil die Erdachse geneigt ist. Und die Welt entstand auch nicht, weil der indische Gott Vishnu seinem Diener Brahma ihre Erschaffung auftrug, sondern durch den Urknall. So wunderbar die Mythen sind, weitaus spannender ist die wissenschaftliche Betrachtung. Genau das tut Dawkins, indem er die Wahrheit hinter den Rätseln erklärt. Ein faszinierendes, üppig illustriertes Buch, das den Zauber der Wirklichkeit feiert.



Thomas Eversberg

HOLLYWOOD IM WELTALL

Waren wir wirklich auf dem Mond?

2012, 174 S. 40 Farbbabb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3647
€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Der Astrophysiker Thomas Eversberg setzt sich mit den bekanntesten Verschwörungstheorien der Mondlandungsleugner auseinander und analysiert diese in farbigen Detailaufnahmen und mit vielen vom Buch aus abrufbaren Filmsequenzen. Dabei geht er sowohl auf die ältesten gut bekannten, aber auch die aktuellsten Zweifel an der Mondlandung ein und bietet seinen Lesern so einen spannenden Krimi aus Physik, Politik und Geschichte. Thomas Eversberg arbeitet im Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und weiß daher, wovon er schreibt.



Joachim Wambsganz

UNIVERSUM FÜR ALLE

70 spannende Fragen und kurzweilige Antworten

2012, 439 S. m. zahlr. Farbbabb., geb.,
Spektrum

Bestell-Nr. 3646

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Heidelberger Astronomen erklären Ihnen hier die Rätsel des Universums. Die Artikel basieren auf der Vortragsreihe *Uni(versum) für alle!* – Halbe Heidelberger Sternstunden: Von April bis Juli 2011 gab es jeden Tag eine »Astronomische Mittagspause« in der Heidelberger Peterskirche mit einem 15-minütigen Kurzvortrag. In diesem Buch sind alle 70 Vorträge zu allen erdenklichen Themen der Astronomie für Sie zusammengestellt.

Alle Vorträge wurden gefilmt und stehen auf YouTube zur Verfügung. Mit dem jeweiligen QR-Code werden Sie zum passenden Video geleitet oder Sie gehen direkt zum YouTube-Kanal von *Spektrum der Wissenschaft*: www.spektrum.de/universumfueralle



STEPHEN HAWKINGS GROSSER ENTWURF

Eine neue Erklärung des Universums

2012, Laufzeit: circa 135 Minuten,
Polyband

Bestell-Nr. 3761 € 17,99

In dieser Dokumentation blickt der populäre Astrophysiker über den Tellerrand der Wissenschaft hinaus und geht bedeutenden philosophischen Fragen auf den Grund: Beruht unsere Existenz auf einer höheren Macht? Was ist der Sinn des Lebens? Wie lauten die kosmischen Gesetze? Spektakuläre 3-D-Computeranimationen und faszinierende Bilder machen die Reise zu den größten Rätseln des Weltalls perfekt. Technische Angaben: Sprachen: Deutsch und Englisch; Untertitel: keine; Ton: Dolby Digital 5.1; Bild: 16:9 (1,78:1); Medium: DVD 9; Region: 2 PAL; FSK-Freigabe: INFO-Programm.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



W. Engländer, H.-H. Bergmann

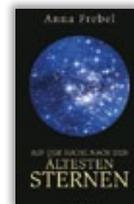
DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD

220 Vögel, Filme und Stimmen

2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box,
INFO-Prgr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

Bestell-Nr. 1859
€ 49,99 (D), € 49,99 (A)

220 Vogelarten mit ihren Rufen und Gesängen erfreuen uns durch wunderschöne Bilder in Filmen, die Vögel singen dabei schnabelsynchron! Ein Sprecher erklärt jede Darstellung, das Begleitbuch informiert noch ausführlicher.



Anna Frebel

AUF DER SUCHE NACH DEN ÄLTESTEN STERNEN

2012, 352 S., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3684
€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Mit Mitte zwanzig entdeckte Anna Frebel während ihrer Promotion den ältesten bis dahin bekannten Stern. Seitdem ist sie als »stellare Archäologin« den metallarmen Sternen auf der Spur. Diese ältesten bekannten Objekte überhaupt geben über die ersten Sterne im Universum und die Entstehung der chemischen Elemente Auskunft – dadurch werden sie ein Schlüssel zum Verständnis des gesamten Universums. In ihrem Buch gibt Anna Frebel Einblicke in diesen Aspekt der Astronomie und berichtet anschaulich von ihrer konkreten Arbeit mit den Teleskopen in fernen Gegenden der Welt. Ein faszinierender Blick in die Tiefe des Alls und ein lebensnaher Bericht darüber, wie Naturwissenschaft heute betrieben wird.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



Franz M. Wuketits

Zivilisation in der Sackgasse. Plädoyer für eine artgerechte Menschenhaltung

Mankau, Murnau 2012. 262 S., € 19,95

Man glaubt es nicht: Der Wiener Ethologe und Philosoph Franz M. Wuketits, Autor zahlreicher populärer Bücher, schimpft wie ein alter Mann am Stammtisch auf die heutige Welt. Ganz oben auf seiner Abschlusliste stehen Wirtschaft und Politik. Autoritäten und Entscheidungsträger sind für ihn grundsätzlich egoistisch und schlecht, Gesetze haben sie nur gemacht, um persönliche Freiheiten einzuengen, und überhaupt ist das Leben in der Kleingruppe das einzig erstrebenswerte. Über die Erklärungen der modernen Gesellschaft und ihres Werdens durch Sozial-, Geschichts-, Wirtschafts-, Rechts- oder Systemtheorien verliert Wuketits kein Wort. Sicher haben wir ein steinzeitliches Erbe, und manche modernen Errungenschaften können uns überfordern. Aber viele von Wuketits' polemischen und giftigen Folgerungen sind schlicht falsch, dumm und uninformiert, allen voran die über das erst heute unterdrückte Individuum. Was er als Gegenwehr gegen die aufgedrückten Zwänge empfiehlt, ist lächerlich. Zu hoffen bleibt, dass er keine Bücher mehr schreibt. ADELHEID STAHNKE



Martha M. Robbins, Christophe Boesch (Hg.)

Menschenaffen. Begegnung mit unseren nächsten Verwandten

Aus dem Englischen von Eva Schweikart. Hirzel, Stuttgart 2013. 184 S., € 24,90

»Die Berichte aus den ersten Monaten unseres Projektes [hätten] besser in ein Abenteuer-Reisemagazin gepasst ... als in eine wissenschaftliche Zeitschrift«, schreibt das amerikanische Biologen-Ehepaar Crickette Sanz und David Morgan. In der Tat: Die erste Stufe der Verhaltensbiologie, die Feldforschung, ist weit unterhaltsamer als die spätere wissenschaftliche Aufbereitung. Zehn Wissenschaftler, mehrheitlich vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, haben im afrikanischen Regenwald das Leben der Schimpansen, Bonobos und Gorillas verfolgt und in Tagebucheinträgen dokumentiert – und ich habe das in einem Rutsch durchgelesen. Die wissenschaftlichen Zusammenhänge liefert in jedem Beitrag ein informativer Kasten nach. ELKE REINECKE



Herbert Bruderer

Konrad Zuse und die Schweiz. Wer hat den Computer erfunden?

Oldenbourg, München 2012. 224 S., € 39,80

»Immerhin besaß ... Zürich durch die ratternde Z4 ein, wenn auch bescheidenes, Nachtleben«, lästerte deren Erbauer, der Computerpionier Konrad Zuse (1910–1995), der den Relaisrechner von 1950 bis 1955 an die ETH Zürich vermietet hatte. Aber was für ein Nachtleben! Der damals leistungsfähigste Computer auf dem europäischen Festland erforderte mit seinen störanfälligen Relais und seinem externen Speicher auf gelochten Filmstreifen viel Zuwendung. Herbert Bruderer vom Departement für Informatik der ETH hat mit viel Mühe die Aussagen der wenigen Überlebenden aus jener heroischen Anfangsphase zusammengetragen. Ergänzt wird die Geschichte durch eine Materialsammlung zu der hochumstrittenen Frage »Wer hat den Computer erfunden?«, verschollen geglaubte Unterlagen zu einem Nachfolgemodell der Z4, dem Rechenlocher M9, und Belegen für die Vermutung, der große Zuse habe den großen Turing 1947 in Göttingen getroffen. CHRISTOPH PÖPPE



Udo Rauchfleisch

Mein Kind liebt anders. Ein Ratgeber für Eltern homosexueller Kinder

Patmos, Ostfildern 2012. 184 S., € 14,99

Homosexualität ist keine Krankheit oder Sünde, sondern eine der Heterosexualität gleichwertige sexuelle Orientierung: Mit dieser Einsicht tun sich vor allem konservative Väter zuweilen noch schwer. Udo Rauchfleisch, Psychoanalytiker und emeritierter Professor für Klinische Psychologie, räumt deshalb in seinem Elternratgeber zunächst mit allerlei verstaubten Vorurteilen über Schwule und Lesben auf. Etwaige Umpolungsversuche verurteilt er als »unethisch« und warnt davor, auf die sexuelle Orientierung von Kindern abwertend zu reagieren, denn das schade deren Selbstwert- und Identitätsgefühl. Der Autor erläutert den Coming-out-Prozess, sensibilisiert für häufige Probleme und schildert gute Beispiele für offenes und wertschätzendes Verhalten. Dabei trifft er stets den richtigen Ton – ohne erhobenen Zeigefinger oder Missionierungsdrang. CHRISTIANE GELITZ

nur das hellenistische Nachfolgereich der Ptolemäer, sondern auch die römische Republik zu Grabe getragen wurde. Leben und Wirken der Königin vom Nil, ihre Sozialisation in einem von Mord und Totschlag geprägten höfischen Umfeld, ihre Verwurzelung in der altägyptischen Kultur und Herrschertradition und ihre politischen Ziele werden ebenso behandelt wie der blutige römische Bürgerkrieg, der nach Cäsars Ermordung ausbrach und in dem Antonius und Octavian um dessen politisches Erbe kämpften.

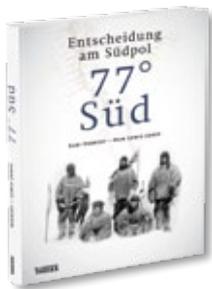
Die Autoren gleiten nicht, wie so häufig bei diesem Thema, in die Diktion der Boulevardpresse ab, sondern orientieren sich eng an Fakten und Quellen – und vermögen diesen manch interessante Detail abzugewinnen. Nicht romantische Liebe à la Romeo und Julia,

so Moorhead und Stuttard, sondern machtpolitisches Kalkül habe die Beziehungen Kleopatras erst zu Cäsar, dann zu Antonius geprägt. Nicht die schöne Nase der Ptolemäerin hat die Politik bestimmt, dafür aber ihr ausgeprägtes Gespür für das politisch Machbare, zu dessen Realisierung sie ihre weiblichen und intellektuellen Reize gezielt einzusetzen wusste. »Männlich kämpfte sie mit den Waffen einer Frau«, dichtete der deutsche Lyriker Durs Grünbein. Für ihr vorrangiges Ziel, die Souveränität Ägyptens zu bewahren, versuchte Kleopatra die mächtigsten Männer Roms zu instrumentalisieren. Doch Cäsars Ermordung und Antonius' Scheitern bei Actium machten ihr einen Strich durch die Rechnung, zumal sie den siegreichen Octavian nicht für sich gewinnen konnte.

Die Schlacht von Actium besiegelte nicht nur das Schicksal Kleopatras, sondern auch das Ende der römischen Republik. Octavian, vormals Gleicher unter Gleichen einer privilegierten Senatsaristokratie, schwang sich nach Actium zum »Princeps«, zum ersten Mann im Staat auf, zum absoluten Alleinherrscher, zum Kaiser über Rom und dessen Imperium. In die Geschichte ist er als Augustus eingegangen. Dieser politische Systemwechsel von der Republik zur Monarchie macht Actium zu einem jener epochalen Augenblicke, welche die Geschichte der Menschheit maßgeblich veränderten.

Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist; er lebt in der Nähe von Mainz.



Kari Herbert, Huw Lewis-Jones

77° Süd

Entscheidung am Südpol

Aus dem Englischen von Simone Gruber

und Frank M. von Berger.

Theiss, Stuttgart 2012. 192 S., € 29,95

ANTARKTIS

Der letzte weiße Fleck

Zum Jubiläum der Südpoleroberung erzählen Kari Herbert und Huw Lewis-Jones die Geschichte jener Männer, die seit drei Jahrhunderten die Antarktis zu bezwingen versuchen.

Vor genau 100 Jahren geht durch die zivilisierte Welt eine Welle der Begeisterung und der Trauer zugleich: Während der norwegische Forscher Roald Amundsen sich am 8. März 1912 der Eroberung des geografischen Südpols rühmt, kehren sein Kollege und Rivale Robert Falcon Scott und dessen Begleiter nicht von ihrer Reise zurück. Erst im Jahr darauf finden Mitglieder seiner Expedition die gefrorenen Leichen.

Der Wettlauf zwischen Amundsen und Scott und dessen tragischer Aus-

gang ist die wohl bekannteste Geschichte um den Südpol, die wissenschaftlichen Entdeckerdrang mit persönlichen Schicksalen verknüpft. In »77° Süd« ist sie eine unter vielen. Zusammen erzählen sie von der mühsamen und langwierigen Entdeckung und Erschließung des letzten unbekanntes Kontinents, von den ersten Segelfahrten jenseits des südlichen Polarkreises durch James Cook 1773 bis zur 1956 gebauten und immer wieder erweiterten Amundsen-Scott-Südpolstation, die wenige hun-

dert Meter vom Pol entfernt liegt. Die britische Publizistin Kari Herbert und ihr Ehemann, der Historiker Huw Lewis-Jones, wollten ein umfassendes Gesamtbild zeichnen, ohne sich auf die beiden Schwergewichte der Polarforschung festzulegen. Das ist ihnen gelungen. Das Buch ist eine Ode an all jene Männer und Frauen, die sich seit dem 18. Jahrhundert bis heute in die unwirtliche Eiswüste aufmachen, um zu erkunden, zu entdecken oder sich selbst zu finden.

Beeindruckend sind die zahlreichen historischen Bilder und die Fotografien von Herbert Ponting, der Scott auf seiner Terra-Nova-Expedition in den Jahren 1910 bis 1912 begleitete. Auflockernd wirken die zahlreichen Auszüge aus Augenzeugenberichten und Logbüchern, die den Leser direkt an den ersten Sichten der vergletscherten Küste oder den letzten Stunden von Scott und seinen Männern teilhaben lassen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Dabei wird vor allem eines klar: Wer sich lange mit dem Südpol auseinandergesetzt hat, gerät leicht ins Schwärmen. Davon bleiben weder die Forscher noch die beiden Autoren verschont: Ihr lebhafter Schreibstil steht in erfrischendem Gegensatz zum sachlich-historischen Inhalt des Buchs. So färbt die

Begeisterung der Autoren für ihr weißes Wunderland nach wenigen Seiten auf den Leser ab. Ihr Werk ist eher eine gut recherchierte Nacherzählung als die bloße Aufbereitung der harten Fakten.

Wer sich nur diese aneignen will, ist anderweitig besser beraten. Allen ande-

ren – auch jugendlichen – Interessierten ist dieses Buch wärmstens zu empfehlen.



Karin Kneissl
Testosteron macht Politik
Braumüller, Wien 2012.
152 S., € 22,90

POLITIKWISSENSCHAFT

Aufstand der zornigen jungen Männer

Die Publizistin und ehemalige Diplomatin Karin Kneissl versucht, politisches Geschehen mit dem Hormonstatus der Beteiligten zu erklären.

In manchen Gesellschaften gibt es einen Überschuss an jungen Männern, die ohne Perspektive und ohne soziale Anerkennung leben, da sie sich nicht sinnvoll in die Gesellschaft einbringen können und auch sonst keine Möglichkeit haben, sich zu verwirklichen. Getrieben durch ihre hormonelle Energie, die kein Ventil findet, neigen sie eher dazu, einen Umsturz anzuzetteln. Da sie sich zumeist im Kampf um Status und Anerkennung befinden, sind junge Männer ohnehin grundsätzlich die besseren Revolutionäre. Das ist die Grundthese, mit der Karin Kneissl den Zusammenhang von Politik, Geschichte und der *Conditio humana* zu ergründen versucht. »Politische Entscheidungen folgen oft nicht rationalen Überlegungen. Gefühle, Begierden und Ängste werden in der politischen Analyse unterschätzt oder völlig ausgeblendet.«

Karin Kneissl war bis 1998 als Juristin im diplomatischen Dienst Österreichs tätig und ist seither freischaffende Publizistin und unabhängige Korres-

pondentin für mehrere Tageszeitungen. Daneben unterrichtet sie in Wien und Beirut internationale Beziehungen.

In ihrem Buch versucht sie, historische Revolutionen unter dem Aspekt des hormonellen Status der handelnden Individuen zu analysieren. Dabei geht sie auch auf die aktuellen Revolutionen im arabischen Raum ein, die sie ebenfalls als ein Aufbegehren von zornigen jungen Männern versteht.

Im arabischen Kulturkreis sind Würde und Status des Mannes insbesondere durch eine Heirat bestimmt. Die aber bleibt für einen Großteil der jungen Männer ein unerreichbares Ziel. Andere Wege, ihre Sexualität auszuleben, stehen ihnen auf Grund der strikten Moral und der sozialen Kontrolle nicht zur Verfügung, wodurch sich dieses natürliche Bedürfnis zur Obsession auswächst.

Daher versucht die Autorin eine naturwissenschaftliche Bestandsaufnahme betreffend Sexualhormone und deren Effekte. Ihr Bemühen um ein differenziertes Bild in Ehren; aber man

erkennt doch, dass dies nicht ihr eigentliches Metier ist.

Ein weiteres Thema sind die demografischen Entwicklungen in Asien und mögliche Konsequenzen für die Zukunft. Kneissl sieht ein gewaltiges Potenzial für zukünftige Unruhen, Aufstände oder gar Kriege, da sich der Frauenmangel zu einer immensen Frustrationsquelle für junge Männer entwickelt. Auch das erledigt geglaubte Thema Frauenraub wird wieder aktuell. Kneissl verweist hierzu auf den Roman von Amin Maalouf (»Le Premier Siècle après Béatrice«, Paris 1992), der viele Entwicklungen der Gegenwart vorwegnimmt und mögliche Folgen illustriert.

In den letzten beiden Kapiteln reflektiert Kneissl wiederholt die Natur des Menschen, und zwar evolutionsbiologisch, neurophysiologisch, psychologisch, pädagogisch und philosophisch. Sie gibt dabei zu, dass ihr Buch mehr Fragen aufwirft, als es beantwortet, und dass die empirische Basis noch mehr als dürftig ist. Entsprechend versteht sie ihr Werk als einen Aufruf, die bisher sträflich vernachlässigten Forschungen in diese Richtung zu intensivieren.

Das Buch ist informativ und flüssig geschrieben. Es richtet sich vor allem an Sozialwissenschaftler, die häufig dazu neigen, die Naturbedingtheit des Menschen beiseitezuschieben und nicht in ihre Überlegungen miteinzubeziehen. Aber auch politisch interessierten Bio- und Anthropologen ist das Buch zu empfehlen.

Wilhelm Richard Baier

Der Rezensent ist promovierter Biologe und pädagogischer Mitarbeiter an der Österreichischen Urania für die Steiermark, einer universitätsnahen Volkshochschule in Graz.

NEHMEN SIE UNS MIT!

Ausgewählte Magazine aus dem Verlagshaus **Spektrum der Wissenschaft** nun auch für iPad und Android-Tablets



alle Artikel
im Volltext

Lesemodus

zoombare
Bilder und
Grafiken

Videoclips
& Weblinks

Lesenzeichen

Suchoptionen



www.spektrum.com/kioskapp



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Die Erde war schuld

»Vor kurzem hat Dr. Bruno Müller in einer Abhandlung das Aussterben verschiedener Tierformen auf die Schwerkraftzunahme zurückgeführt. Nach der Schrumpfungstheorie müssen wir eine fortgesetzte Volumenabnahme unseres Erdkörpers an-

nehmen. Im Laufe der Erdgeschichte muss diese zu einer ganz gewaltigen Verkürzung des Erdhalbmessers und zu einer Schwerkraftzunahme geführt haben. Diese kann nicht ohne nachhaltigen Einfluss auf die Entwicklung der Organismen geblieben sein. Den Ammoniten ist die Schale nach und nach zu schwer geworden. Am wenigsten waren die Kolosse der Riesensaurier imstande, ihre massigen Skelette zu ertragen. Sie mussten aussterben.« *Prometheus* 1217, S. 331, 1913

Deutscher Senkrechtstarter

»Einen neuartigen Flugapparat hat der Dresdner Ingenieur Otto Baumgärtel konstruiert. Er steigt senkrecht hoch und besitzt automatische Stabilität und Sturmsicherheit. Durch geringe Neigung des Apparates mittels Schwerpunktsverlegung wird ohne besonderen Propeller eine sehr schnelle Vorwärtsbewegung erzielt. Für militärische Zwecke ist wichtig, daß der Apparat in der Luft stillstehend schweben kann und während des Betriebes fast unsichtbar ist. Der Apparat ist mit einer zum Patent angemeldeten Vorrichtung versehen, die ein gefahrloses Landen aus beliebiger Höhe gestattet, wenn etwa der Motor versagt.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik* 7, S. 141, 1913

Schulärzte schlagen Alarm

»Die Schulärzte haben Krankheitserscheinungen beobachtet, die ihre Ursache im frühzeitigen Rauchen haben oder doch durch diese Unsitte verschlimmert werden. Abgesehen davon, dass die Schuljugend durch den Ankauf von Zigaretten zu Geldausgaben verleitet wird, die nicht selten zu unerlaubten Handlungen führen und so das Kind auch sittlich gefährden, hat das Rauchen schwere gesundheitliche Nachteile. Übelbefinden, Mangel an Esslust, Verdauungsstörungen, schlechter Ernährungszustand, Blutarmut stellen sich ein. Nervöse Unruhe, Herzklopfen, verminderte körperliche und geistige Leistungsfähigkeit, Katarrhe der Luftwege werden hervorgerufen. Wer es mit seinen Kindern gut meint, möge mahnend einwirken, damit der Schädigung der heranwachsenden Generation vorgebeugt werde.« *Gesundheit* 3, S. 90–91, 1913



Einer der ersten Flugschrauber hebt ab.

Ein Fluss holt Luft

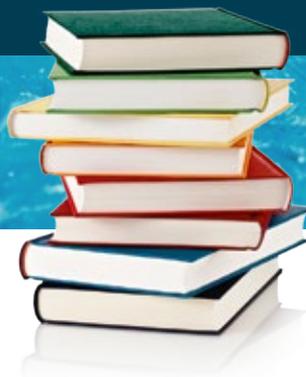
»Der erste Fluß in Deutschland, der eine besondere Einrichtung zur künstlichen Belüftung seines Wassers erhalten hat, dürfte die Lippe sein. Bei belasteten Flüssen kann es in Zeiten der Niedrigwasserführung und bei hohen Wassertemperaturen, die die biologischen Vorgänge beschleunigen, zu einem vollkommenen Sauerstoffschwund und damit zu einem Umschlagen des aeroben biologischen Lebens in das anaerobe kommen. Die Belüftungsvorrichtung besteht aus einer auf Schwimmern ruhenden, am Ufer verankerten Rohrbrücke und einem Rohrsystem, das unter dem Wasserspiegel in durchlöchernten Verteilerrohren endet. Durch dieses können mit Hilfe einer Turbine stündlich etwa 12 000 m³ Luft in das durchfließende Wasser gepreßt werden. Diese Menge genügt, um einen ausreichenden Sauerstoffgehalt sicherzustellen. Die Belüftung stellt eine wirksame Hilfe für die durch die ständig wachsende Verschmutzung gefährdeten Flüsse dar.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik* 3, S. 95, 1963

Mit Kälte gegen Parkinson

»Über eine neue Operationsmethode, mit der in zahlreichen Fällen die Symptome der Parkinsonschen Krankheit beseitigt werden können, berichtet Dr. Irving S. Cooper, Neurochirurg am St.-Barnabas-Krankenhaus in New York. Bei diesem Verfahren wird ein dünner, durch flüssigen Stickstoff auf minus 200 Grad Celsius gekühlter Stab unter Röntgenkontrolle in das Stammhirn eingeführt. Den ›Herd‹,



an dem die für den Parkinsonismus typischen unkontrollierbaren Bewegungen ausgelöst werden, findet der Arzt durch Beobachtung der Zitterbewegungen der Finger des Patienten. Ein plötzliches Verschwinden zeigt an, daß das Instrument die kritische Stelle erreicht hat, an der nun durch Einfrieren das Thalamus-Gewebe zerstört wird.« *Naturwissenschaftliche Rundschau* 2, S. 69, 1963



Eiskalte Angebote

Science-Shop Spezial 1/2013



KOMPAKTTLEXIKON DER BIOLOGIE, 3 BÄNDE
 Unveränd. Nachdr. d. Ausg. v. 2001/02, 495 S., 528 S., 501 S., m. zahlr. Abb., Softcover, Spektrum Akademischer Verlag
Bestell-Nr. 1615
frühere Ausg. € 99,-, jetzt nur € 59,85 (D), € 61,80 (A)

Das Kompaktlexikon der Biologie vermittelt in rund 15.000 Stichwörtern in drei Bänden einen umfassenden Überblick über das Spektrum der modernen Biologie. Es gibt grundlegende und aktuelle Informationen zu den klassischen Disziplinen der Wissenschaft, so zur Systematik der verschiedenen Organismengruppen, ihren Bauplänen und ihrer Lebensweise, wie auch zu brandaktuellen Entwicklungen, z. B. aus den Bereichen Bio- und Gentechnologie.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Rekorde der Natur – zwei große Bände jetzt zum Sonderpreis:



Richard Jones
REKORDE DER INSEKTENWELT
130 Extreme
 2010, 287 S. m. 134 Farbfotos, geb., Haupt
Bestell-Nr. 3784 früher € 39,90, jetzt nur € 19,90 (D), € 20,50 (A)

130 Rekordhalter der Insektenwelt werden mit Bild und Text vorgestellt und lassen uns über ihre Vielfalt, Einzigartig- und Außergewöhnlichkeit staunen.



Dominic Couzens
REKORDE DER VOGELWELT
130 Extreme
 2010, 288 S. m. 134 Farbfotos, geb., Haupt
Bestell-Nr. 3785 früher € 39,90, jetzt nur € 19,90 (D), € 20,50 (A)

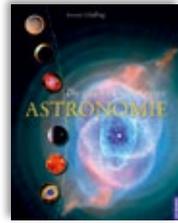
Einige Rekordhalter der Vogelwelt sind den meisten Menschen bekannt – wie z. B. der größte Vogel, der Strauß. Die Vogelwelt hat jedoch einige weitere spektakuläre Leistungen vorzuweisen, die faszinieren!

Weitere Schnäppchen finden Sie unter: www.science-shop.de/eiskalt



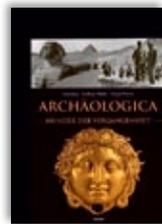
Jürgen Hårdler
BETRIEBSWIRTSCHAFTSLEHRE FÜR INGENIEURE Lehr- und Praxisbuch
 4., aktualisierte Auflage 2010, 620 S., kart., Carl Hanser
Bestell-Nr. 3780
früher € 34,90, jetzt nur € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Dieses Grundlagenwerk bietet einen Überblick über das Gesamtspektrum der Betriebswirtschaftslehre in kurz gefasster Form mit vielfältigen Schnittstellen zum Ingenieurwesen. Es wendet sich vorrangig an Studierende von Bachelor- und Masterstudiengängen der Ingenieur- und Wirtschaftsingenieurwissenschaften an Fachhochschulen, Universitäten und Berufsakademien, für die die »Betriebswirtschaft« eher Neben- als Hauptfach ist. Aber auch für im Beruf stehende Praktiker ist das Buch ein willkommenes Nachschlagewerk.



Govert Schilling
ASTRONOMIE – DIE GRÖSSTEN ENTDECKUNGEN
 2009, 240 S. m. zahlr. farb. Fotos u. Illustr., geb., Kosmos
Bestell-Nr. 2856
früher € 49,90, jetzt nur € 24,99 (D), € 25,70 (A)

Vor über 400 Jahren hat eine Erfindung die Astronomie revolutioniert: Das Teleskop. Generationen von Forschern haben damit den Nachthimmel beobachtet und durch ihre Entdeckungen das Weltbild der Menschheit geprägt. Dieser Bildband präsentiert die 100 wichtigsten Entdeckungen der Astronomie.



Mark Rose, Eti Bonn-Muller, Giorgio Ferrero
ARCHÄOLOGICA
Wunder der Vergangenheit
 2010, 288 S. m. zahlr. meist farb. Fotos, geb., Weltbild, Lizenz White Star
Bestell-Nr. 3782
früher € 38,-, jetzt nur € 14,99 (D), € 15,40 (A)

Dieser großformatige Band, der eine Vielzahl zeitgenössischer Fotos von den Grabungsstätten und den dort gemachten Funden enthält, schildert die Ereignisse rund um die wichtigsten archäologischen Entdeckungen aller Zeiten, von den Wüsten Ägyptens und den Wäldern Mittelamerikas bis hin zu den antiken Städten im Mittelmeerraum und den Palästen des Mittleren Ostens.



Dietrich H. W. Grönemeyer
GRÖNEMEYERS NEUES HAUSBUCH DER GESUNDHEIT
 2008, 608 S. m. zahlr. farb. Abb. u. Illustr., geb., Rowohlt
Bestell-Nr. 3783
früher € 19,90, jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Viele Krankheiten sind vermeidbar. Das Hausbuch räumt mit Halbwissen über die Volkskrankheiten auf, gibt wichtige Tipps zur Vorsorge und Selbsthilfe und informiert über gängige Behandlungsmethoden.



Manfred Reitz
DAS LEBEN AUF DER BURG
Alltag, Fehlen und Turniere
 2004, 208 S. m. 60 meist farb. zeitgenöss. Abb., geb., Thorbecke
Bestell-Nr. 3790
früher € 24,90, jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Manfred Reitz lässt die mittelalterliche Geschichte am Beispiel der Burg lebendig werden: Dabei verfolgt er das Leben der Menschen durch Jahreszeiten und Tagesablauf und berücksichtigt Freizeit und Mode ebenso wie Landwirtschaft und Krieg. Dieses Buch macht junge und alte Leser zu kundigen Burgenbesucher, die die Spuren der Vergangenheit mit neuen Augen entschlüsseln.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Joachim Hecker
DAS HAUS DER KLEINEN FORSCHER
Spannende Experimente zum Selbermachen
 2. Aufl. 2007, 205 S., m. zahlr. farb. Abb., ab 4 J., geb., Rowohlt Berlin
Bestell-Nr. 3791 früher € 19,90, jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

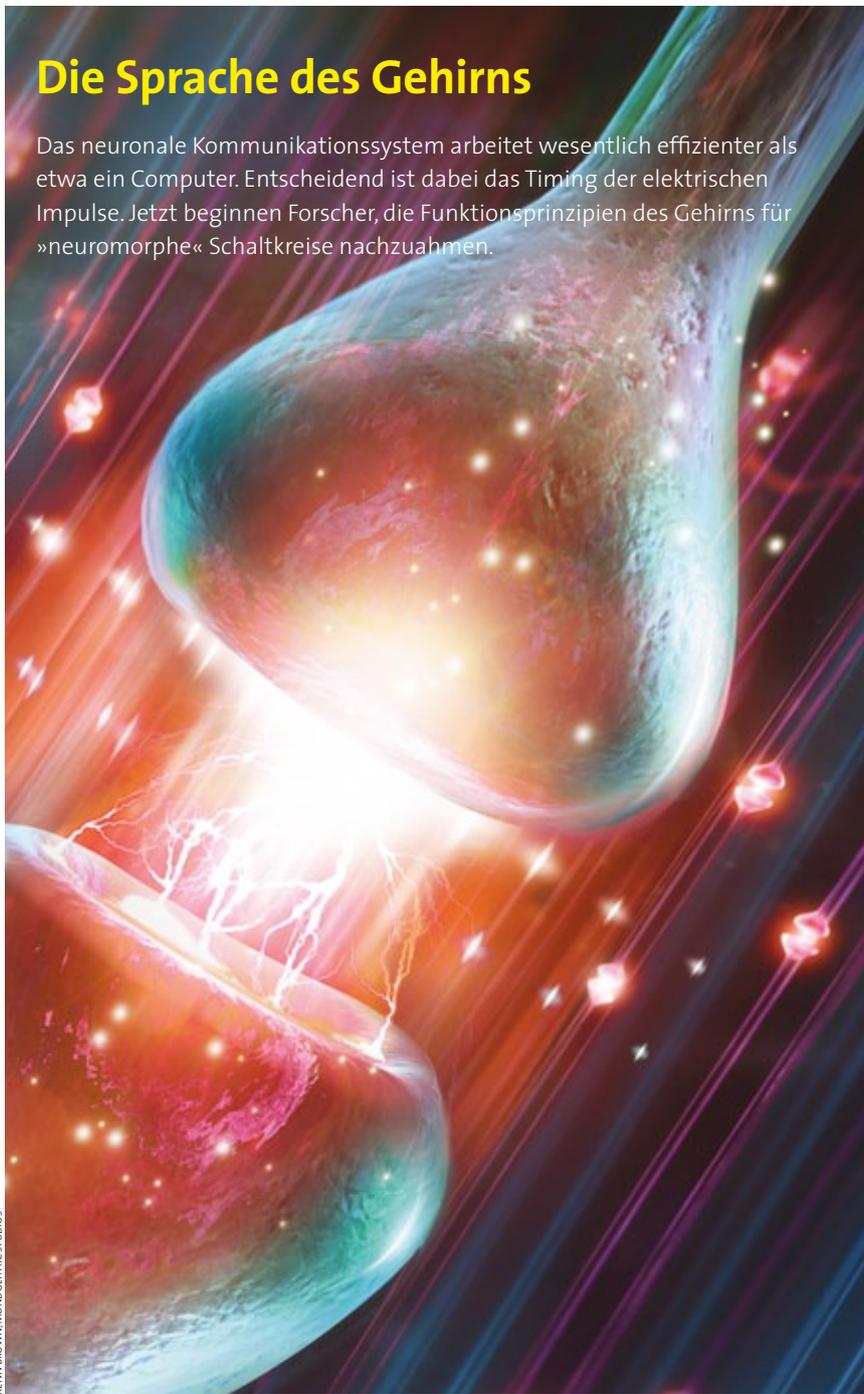
Schon Vierjährige werden mit großem Spaß selber experimentieren, Schulkinder eigenständig mit dem Buch arbeiten können. Die Erklärungen bringen selbst Erwachsene zum Staunen. Ein wunderbar illustriertes Experimentierbuch, das Wissenschaft und Spiel fantasievoll verbindet und (nicht nur) Kinder klüger macht. »Das Haus der kleinen Forscher versteht es, Forschergeist in Kinderköpfen zu entfachen.«

Bundesbildungsministerin Annette Schavan

Die Sprache des Gehirns

Das neuronale Kommunikationssystem arbeitet wesentlich effizienter als etwa ein Computer. Entscheidend ist dabei das Timing der elektrischen Impulse. Jetzt beginnen Forscher, die Funktionsprinzipien des Gehirns für »neuromorphe« Schaltkreise nachzuahmen.

KENN BROWN / MONDOLOTHIC STUDIOS



DREAMSTIME / SHANGHAI PARK

Renaissance der Akupunktur

Die traditionelle chinesische Medizin (TCM) galt in China selbst als Teil einer Krankheit, die es zu heilen galt. Doch gegen die Intentionen der chinesischen Politiker verbreitete sich die TCM ab den 1970er Jahren im Westen als Hoffnung auf eine ganzheitliche, natürliche und sanfte Heilkunde – für China ein ungewollter Exportschlager. Wie kam es dazu?



DREAMSTIME / ARBEIDERSWERK

Die Rückkehr kalter Winter

Passend zur globalen Erwärmung wurden die Winter bis vor Kurzem immer milder. Doch in den letzten Jahren hat sich dieser Trend umgekehrt – paradoxerweise wegen des Abschmelzens der arktischen Meereisdecke.

Heimliche Verräter

Im Alter verlieren Zellen ihre Teilungsfähigkeit. Bisher betrachteten Forscher das als Schutzmaßnahme gegen unkontrolliertes Wuchern, sprich: Krebs. Nun aber zeigt sich, dass seneszente Zellen schädliche Stoffe absondern, die nicht nur den körperlichen Verfall fördern, sondern sogar die Entstehung von Krebs begünstigen.

Schriften in Altamerika

Maya, Mixteken und Olmeken – viele präkolumbische Kulturen entwickelten Schrift- und Kalendersysteme. Heute künden davon nur noch Reste etwa auf Monumenten. Gemeinsamkeiten, die sich bei verschiedenen Kulturen wiederfinden, helfen bei der Entzifferung. Doch nach wie vor geben die Texte Rätsel auf.

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 SPEKTRUM- ABO

- SPAREN:** 12 Ausgaben für nur € 7,- je Heft (inkl. Inlandsversand) anstatt € 7,90 im Einzelkauf)
- 2 IN 1:** Zur Printausgabe erhalten Sie drei Tage vorher die Digitalausgabe
- ARCHIV:** Komplettzugriff auf das *Spektrum der Wissenschaft*-E-Paper-Heftarchiv

**Für Ihre Abobestellung erhalten Sie zudem noch ein Präsent Ihrer Wahl!
Weitere Prämien im Aboshop**



BAUMEISTERSPIEL

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Das Spiel fördert Kombinatorik, Denk- und räumliches Vorstellungsvermögen.



DER LOOPSHOPPER

von Reisen Thel verbindet Eleganz beim Einkaufen mit viel Funktion: Zwei äußere Stecktaschen sowie eine innere mit Reißverschluss. Der Korb ist auf Grund der gepolsterten Aluminiumgriffe sicher und bequem zu tragen. Fassungsvermögen: 25 Liter



DAS BUCH

»Die großen Fragen – Physik« behandelt grundlegende Probleme und Konzepte in der Wissenschaft, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben.

www.spektrum.de/abo



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

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



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

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

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

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

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

www.academia-net.org

Spektrum DER WISSENSCHAFT EXTRA

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Biotechnologie im Umbruch



- Stammzellen und Krebs
- Pro und kontra Pflanzengentechnik
- Synthetische Biologie

www.spektrum.de/mnt

Forum MENSCH NATUR TECHNIK
Eine Kooperation von **Spektrum** DER WISSENSCHAFT und  VolkswagenStiftung



INTERVIEW
4 Wurzel des Übels

Lange glaubten Mediziner, alle Zellen eines Tumors seien mehr oder weniger gleichgeartet. Doch es mehren sich die Anzeichen dafür, dass sie eine Art Hierarchie bilden. An ihrer Spitze steht eine entartete Stammzelle, die immer wieder von Neuem Krebsgewebe hervorbringt. Andreas Trumpp vom Deutschen Krebsforschungszentrum Heidelberg erläutert das Konzept der Krebsstammzelle – und was es für die künftige Behandlung von Tumoren bedeutet.



10 Pflanzen nach Maß

Christian Jung, Caroline Möhring

Seit rund 30 Jahren nutzen Forscher die Biotechnologie zum Züchten von Nutzpflanzen – durchaus mit Erfolg. So lassen sich heute Pflanzen schnell aus einzelnen Zellen hochziehen. Und das zunehmende genetische Wissen erleichtert es, gezielt auf erwünschte Merkmale hin zu züchten. Die großen Hoffnungen, die viele Experten auf den direkten Gentransfer setzten, haben sich dagegen bislang kaum erfüllt. Denn solche Eingriffe in das Erbgut der Pflanzen erwiesen sich als unerwartet schwierig.



INTERVIEW
18 »Die Technologie wurde viel zu schnell von der Industrie angewendet«

Gerade in Deutschland stehen viele Menschen gentechnisch veränderten Nutzpflanzen sehr kritisch gegenüber. Zu Recht, meint Angelika Hilbeck von der ETH Zürich. Die Agrarökologin hält mit ihrer Kritik an Herstellerfirmen nicht zurück: Die industrielle Pflanzengentechnik sei aus Profitgier völlig falsch angegangen worden.



22 Organismen aus dem Baukasten

Sven Panke

Die synthetische Biologie sieht sich als logischer Nachfahre der bisherigen Biotechnologie. Ihr großes Ziel: Zellen planmäßig zu konstruieren. Doch der Weg dahin ist weit. Helfen sollen bewährte Prinzipien aus den Ingenieurwissenschaften. Auf diese Weise konnten Forscher bereits komplette Stoffwechselwege zusammenbauen, um wichtige Substanzen herzustellen. Aber auch biologische Schaltkreise werden aktuell entwickelt.



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Der lange Weg zur synthetischen Biologie

Mitte der 1980er Jahre lief im ZDF eine Serie über Biotechnologie, die sich etwas hochtrabend »Studienprogramm« nannte. Zu der Zeit stand ich kurz vor dem Abitur, und die Wahl des Studienfachs rückte näher. Vielleicht hat die Sendereihe, die ich mit großem Interesse verfolgte, ja mit dazu beigetragen, dass ich mich für das Studium der Biochemie entschied.

Seit jener Zeit hat die Biotechnologie enorme Fortschritte gemacht. Vor allem kam mit der Gentechnik ein neuer Zweig hinzu, der heute das Feld zu weiten Teilen dominiert, aber auch viel Kritik in der Öffentlichkeit hervorruft. Dabei ist Biotechnologie keine Erfindung unserer Zeit. Ihre Anfänge liegen einige tausend Jahre zurück: Schon der Einsatz von Hefe beim Bierbrauen und Brotbacken war nichts anderes als eine biotechnische Methode – wenn auch die Menschen damals noch nicht verstanden, was dabei passiert.

Das hat sich grundlegend geändert. Nicht nur haben Forscher viel über die biologischen Mechanismen herausgefunden – die Entwicklung der letzten 20 Jahre war atemberaubend. Doch erst jetzt nähert sich die Biotechnologie dem Ziel, eine zuverlässige biologische Ingenieurwissenschaft zu werden.

Genau diese Idee steckt nämlich hinter der »synthetischen Biologie«, die Organismen mit präzise vorgegebenen Funktionen maßzuschneidern versucht (siehe S. 22). Doch

der Weg dahin ist weit, da sich biologische Systeme als äußerst komplex erweisen. Dies müssen auch die Pflanzenzüchter erfahren, die mittels Gentransfer Nutzpflanzen neue Eigenschaften verleihen wollen (S. 10). Wirklich gelungen ist das bisher nur in wenigen Fällen – und die finden sich zudem im Brennpunkt scharfer öffentlicher Kritik (S. 18).

Mediziner greifen ebenfalls zunehmend auf biotechnische Verfahren zurück, um Krankheiten zu erforschen und neue Therapien zu entwickeln. Besonders aktiv ist derzeit die Stammzellforschung, von der man sich Heilung chronischer Erkrankungen, ja sogar die Züchtung von Ersatzorganen verspricht. Nun kristallisiert sich heraus, dass Stammzellen womöglich auch bei Krebs eine entscheidende – und fatale – Rolle spielen (S. 4).

Dieses SPEKTRUM EXTRA entstand in enger Kooperation mit der VolkswagenStiftung, an deren Forum »Mensch Natur Technik« (siehe Kasten unten sowie unter www.spektrum.de/mnt) die Autoren und Interviewpartner mitwirken.

Herzlich Ihr

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Forum MENSCH NATUR TECHNIK 2013



**Die Zellen-Zauberer:
Was verbirgt sich hinter der Stammzellforschung?**

7.2.2013, 19.00 Uhr, Schloss Herrenhausen,
Hannover

Mit Prof. Dr. Axel Haverich, Prof. Dr. Michael Brand,
Prof. Dr. Andreas Trumpp und Prof. Dr. Norbert Paul

Moderation: Prof. Dr. Carsten Könneker

**Farbe der Hoffnung?
Grüne Gentechnik und ihre Versprechen**

11.4.2013, 19.00 Uhr, Schloss Herrenhausen,
Hannover

Mit Prof. Dr. Christian Jung, Dr. Angelika Hilbeck,
Prof. Dr. Stefan Vidal und Prof. Dr. Michael Schmitz

Moderation: Dr. Daniel Lingenhöhl

**Evolution reloaded:
Von den Möglichkeiten der künstlichen Biologie**

30.5.2013, 19.00 Uhr, Schloss Herrenhausen,
Hannover

Mit Prof. Dr. Sven Panke, Prof. Dr. Nediljko Budisa,
Dr. Jakob Schweizer und Prof. Dr. Horst Bredekamp

Moderation: Dr. Joachim Schüring

Wurzel des Übels

Lange glaubten Mediziner, Tumoren bestünden aus mehr oder minder gleichrangigen Zellen. Doch immer mehr Belege deuten auf einen hierarchischen Aufbau hin. An der Spitze steht dabei eine entartete Stammzelle, die das Tumorgewebe hervorbringt und immer wieder erneuert. Was wissen Forscher heute über Krebsstammzellen? Ein Gespräch mit **Andreas Trumpp** vom Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg.



BEIDE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP RÖTBE

PROFESSOR DR. ANDREAS TRUMPP leitet die Abteilung »Stammzellen und Krebs« im Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg. Zudem ist er Geschäftsführer des Heidelberger Instituts für Stammzell-Technologie und Experimentelle Medizin (HI-STEM).

Medikamente oder Strahlen können eine Krebserkrankung in vielen Fällen wirksam zurückdrängen. Oft schlägt sie aber später erneut zu. Woran könnte das liegen?

ANDREAS TRUMPP: Es mehren sich die Hinweise darauf, dass so genannte Krebsstammzellen den Tumor zurückkehren lassen.

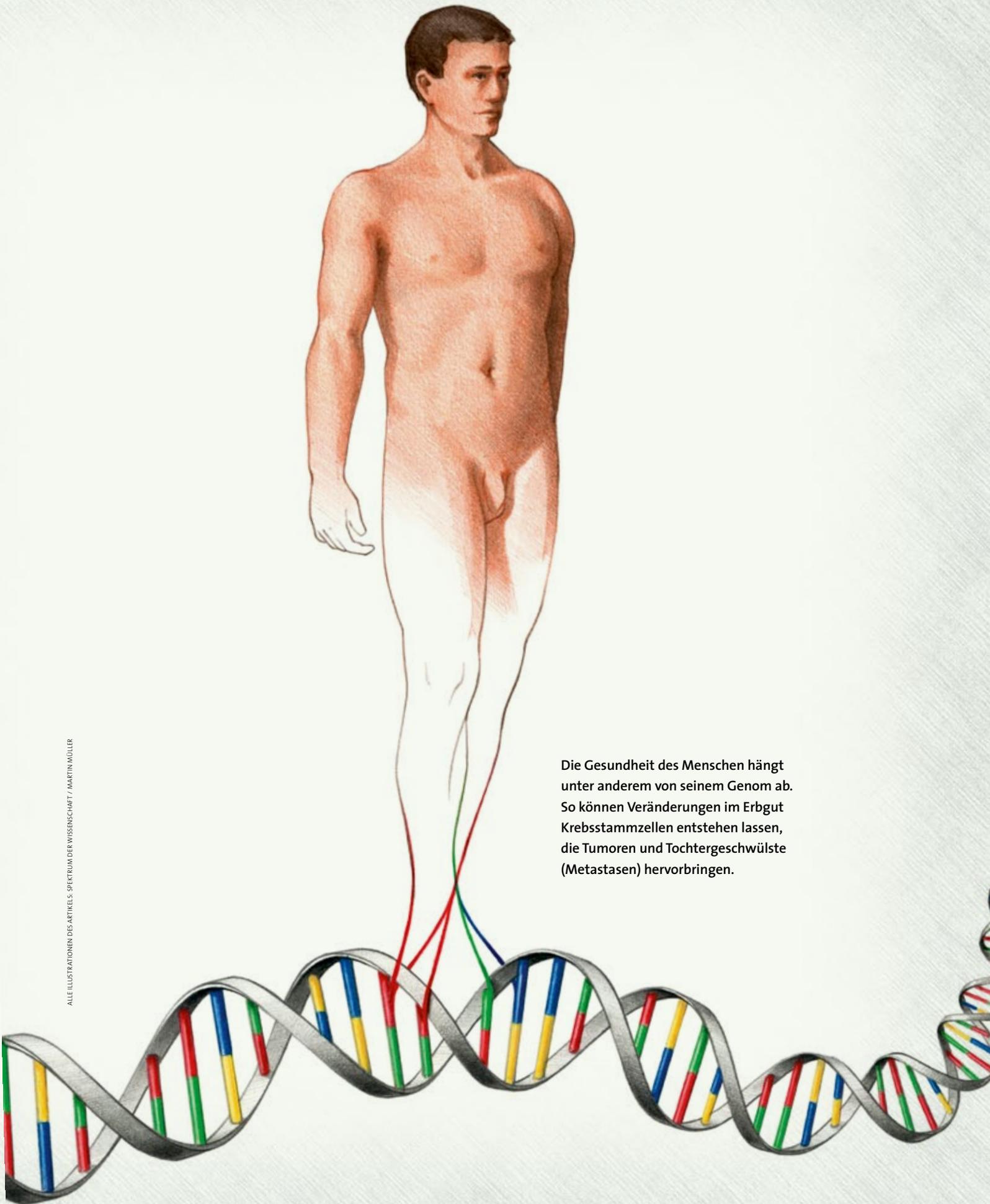
Was muss man sich darunter vorstellen?

TRUMPP: Um das zu erklären, muss ich ein wenig ausholen. Wir alle haben in unserem Körper eine ganze Reihe verschiedener Stammzellen. Die adulten Stammzellen des erwachsenen Organismus sind lebenslang dafür zuständig, Gewebe und Organe zu erhalten. Sie bringen jeweils die Zellen des Gewebes oder Organs hervor, dem sie angehören. So produzieren Blutstammzellen mehr als ein Dutzend Zelltypen des Bluts, und aus epithelialen Stammzellen gehen alle Zelltypen der Haut hervor. Eine Haut- oder Blutstammzelle kann aber natürlicherweise keine Nervenzellen generieren. Denn adulte Stammzellen lassen immer nur ganz bestimmte reife Zelltypen entstehen – im Gegensatz zu embryonalen Stammzellen, die alle Zelltypen des Körpers erzeugen können. Für beide Stammzellensysteme gilt jedoch, dass sie hierarchisch aufgebaut sind.

Was heißt das genau?

TRUMPP: Es gibt stets eine Stammzelle an der Spitze der Rangordnung. Sie ist fähig, sich selbst zu erneuern. Wenn sie sich teilt, entstehen zwei Tochterzellen; eine davon bleibt Stammzelle, die andere entwickelt sich weiter. Vom Blut bildenden System, dem bislang am besten untersuchten Stammzellensystem, weiß man, dass sich aus nur wenigen Stammzellen diverse Vorläuferzellen entwickeln, deren Abkömmlinge wiederum zu den verschiedenen Blutzelltypen ausreifen, etwa den weißen und roten Blutkörperchen. Auf diese Weise bringen die Stammzellen Milliarden von Töchtern hervor, obwohl sie selbst nur wenige Exemplare umfassen und entsprechend schwer auffindbar sind. Bei der Maus etwa kontrollieren nur etwa 1000 Blutstammzellen das gesamte System. Sie sitzen wie beim Menschen tief verborgen im Knochenmark, sind unter normalen Umständen wenig aktiv und teilen sich selten. Wenn aber frisches Blut gebraucht wird, beispielsweise nach einer Verletzung, können sie in kurzer Zeit die Produktion von Abermillionen neuen Blutzellen einleiten und kontrollieren.

Und was sind Krebsstammzellen?



Die Gesundheit des Menschen hängt unter anderem von seinem Genom ab. So können Veränderungen im Erbgut Krebsstammzellen entstehen lassen, die Tumoren und Tochtergeschwülste (Metastasen) hervorbringen.

TRUMPP: Unserer Meinung nach sind Tumoren nach einem ähnlichen Prinzip aufgebaut wie gesunde Körpergewebe – ein hierarchisch organisiertes System mit einer Zelle an der Spitze, die Stammzeleigenschaften besitzt.

Das unterscheidet sich deutlich von der bisherigen Lehrmeinung.

TRUMPP: Richtig, bislang dachte man, ein Tumor sei eine Ansammlung mehr oder minder gleichrangiger Zellen. Das neue Konzept postuliert hingegen, dass aus wenigen Zellen mit Stammzeleigenschaften die Hauptmasse der Geschwulst hervorgeht.

Welche Konsequenzen ergeben sich daraus für die Behandlung?

TRUMPP: Dass man die Krebsstammzellen treffen muss, um Krebs zu heilen.

Wie entstehen diese Zellen eigentlich?

TRUMPP: Da gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es könnte sein, dass das Erbgut von adulten Stammzellen mutiert. Sammeln sich die Veränderungen im Genom an, beginnt die Zelle irgendwann zu entarten und sich häufig und unkontrolliert zu teilen. Eine Stammzelle gibt ihre Mutationen an sämtliche Abkömmlinge weiter – eine Art Verstärkerkaskade.

Was für Möglichkeiten gibt es noch?

TRUMPP: Erste genetische Veränderungen können sich auch schon im Fötus oder sogar in den embryonalen Stammzellen ereignen. Die Körperzellen, die aus ihnen hervorgehen, sind dann verletzlicher und werden im Lauf des Lebens womöglich schneller entarten. Vorstellbar ist auch, dass eine ausdifferenzierte Körperzelle Mutationen erfährt, die ihr erneut Stammzeleigenschaften verleihen. Man sagt dann, sie wird partiell reprogrammiert.

Welcher dieser Varianten messen Sie die größte Bedeutung bei?

TRUMPP: Unserer Meinung nach spielen zwei Prozesse zusammen, wenn aus einer normalen Stammzelle eine Krebsstammzelle entsteht, nämlich erste Mutationen in der Stammzelle und ihre partielle Reprogrammierung. Das Ergebnis ist ein Tumor, eine unglaublich komplexe Struktur, die wie ein Stammbaum organisiert ist. Das Gros der entarteten Zellen lässt sich mit Medikamenten und Strahlen zurückdrängen. Die Zelle an der Spitze der Hierarchie aber – die Krebsstammzelle – erweist sich oft als sehr resistent und produziert früher oder später erneut bösartige Abkömmlinge.

Gibt es ein Beispiel aus der Medizin, das diese These stützt?

TRUMPP: Nehmen wir die chronische myeloische Leukämie, eine Blutkrebsart. Man ist sich heute ziemlich sicher, dass die erste Mutation, die so genannte BCR-ABL-Translokation, in einer einzigen Blut bildenden Stammzelle im Knochenmark geschieht. Diese gibt die Mutation an ihre Abkömmlinge, die Vorläuferzellen, weiter. Eine von denen erwirbt irgendwann eine weitere genetische Veränderung, hat jetzt also zwei davon, und gibt sie an ihre Tochterzellen weiter. Von diesen mutiert später erneut eine, die somit drei Mutationen trägt

und so weiter. Bis lebensgefährliche Leukämienstammzellen entstehen, haben sie außer der ursprünglichen BCR-ABL-Translokation noch mindestens ein halbes Dutzend weitere Genveränderungen eingefangen. Bei soliden Tumoren findet man typischerweise mehr als 50 solcher Mutationen.

Was lässt sich daraus für die Therapie ableiten?

TRUMPP: Infolge der BCR-ABL-Translokation entsteht ein neues Eiweiß, eine so genannte Tyrosinkinase, die in normalen Zellen nicht existiert. Sie ist ständig aktiv und treibt die Zellen dazu an, sich wieder und wieder zu teilen. Seit rund zehn Jahren gibt es den Arzneistoff Imatinib, der zielgerichtet die BCR-ABL-Tyrosinkinase blockiert. Mit ihm und seinen Nachfolgepräparaten konnte die Behandlung der chronischen myeloischen Leukämie entscheidend verbessert werden. Die Zahl der Patienten, die fünf Jahre nach der Diagnose noch leben, liegt heute bei weit über 90 Prozent, und das bei sehr gemäßigten Nebenwirkungen. Leider jedoch greift Imatinib die Leukämienstammzellen nicht wirksam an. Wenn man das Präparat absetzt, kommt der Tumor in wenigen Wochen zurück. Man muss den Arzneistoff also lebenslang einnehmen, um die Nachkommen der Krebsstammzellen immer wieder zurückzudrängen.

Es ist doch sicher kompliziert, Krebsstammzellen zu isolieren, um sie im Labor zu untersuchen.

TRUMPP: Das ist in der Tat schwierig, denn sie zeichnen sich nicht durch einheitliche Marker aus. Damit meinen wir Oberflächenmerkmale, die sie wie Flaggen kennzeichnen würden. Das Oberflächenprotein CD133 war einer der ersten heiß diskutierten Marker für Krebsstammzellen, später kamen weitere hinzu. Aber bis heute gibt es kein bekanntes Merkmal, anhand dessen man eine Krebsstammzelle verlässlich identifizieren kann. Einige Marker geben zwar Hinweise in diese Richtung, aber trauen kann man ihnen nur, wenn man sie an einen funktionalen Test koppelt.

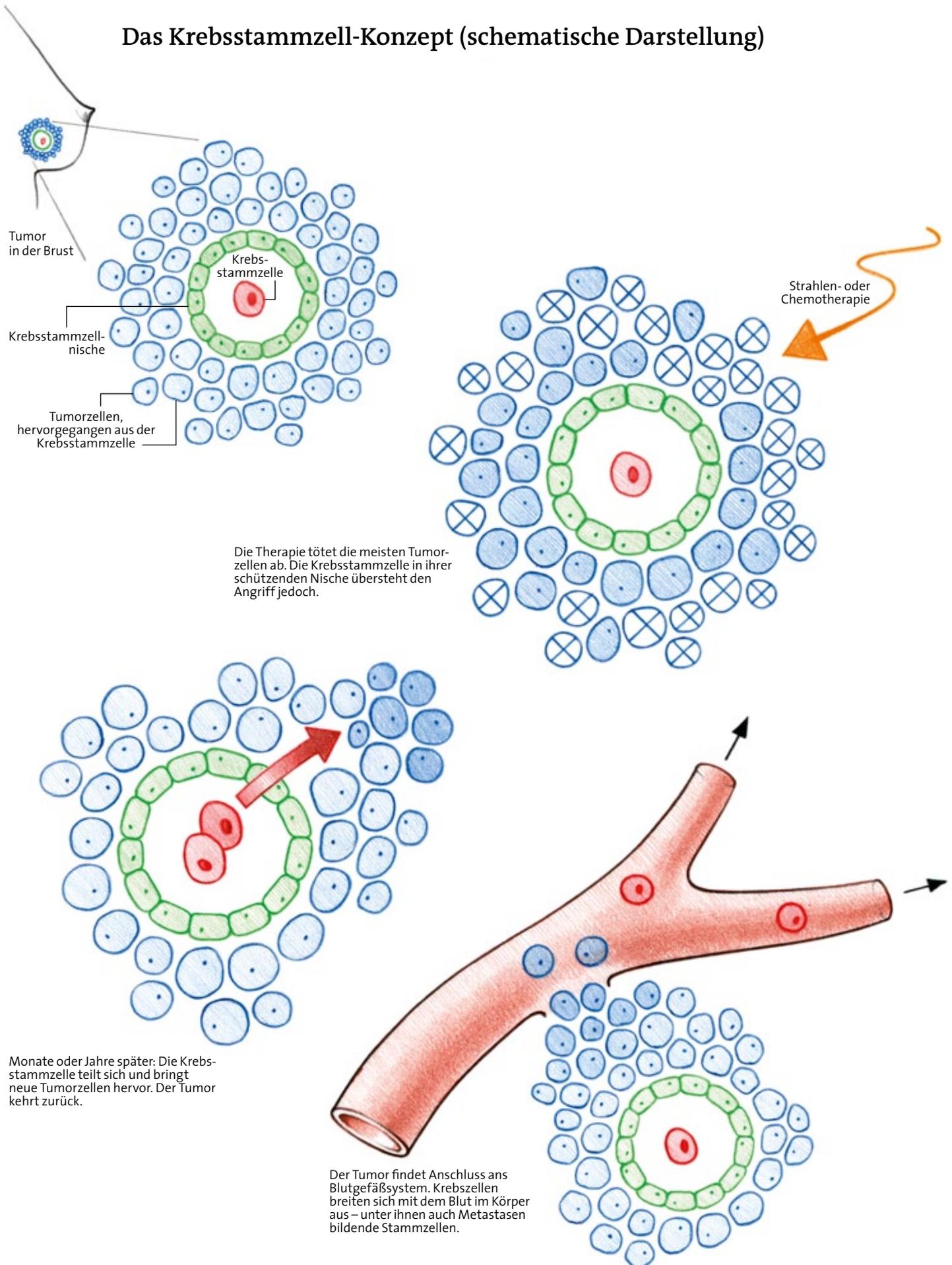
Wie geht das?

TRUMPP: Eine Zelle, die aussieht wie eine Krebsstammzelle, muss erst zeigen, dass sie tatsächlich Krebs erzeugen kann. Der bislang einzige sichere Nachweis besteht darin, die verdächtige Zelle zu isolieren, in ein Tier, meist eine Maus, zu transplantieren und dann zu schauen, was passiert. Bringt die Zelle dort wieder einen Tumor hervor, haben wir es sicher mit einer Krebsstammzelle zu tun. Die meisten Zellen eines Tumors sind dazu nicht in der Lage – sie stehen auf einer tieferen Hierarchiestufe als die Krebsstammzelle.

Ein ziemlich großer Aufwand.

TRUMPP: Bei gesunden Blutstammzellen kennen wir mittlerweile rund zwei Dutzend Marker, die einen verlässlichen Nachweis erlauben. Mit ihrer Hilfe können wir die Stammzellen von den Blutzellen trennen, obwohl letztere 200 000-fach zahlreicher sind. Bei Krebsstammzellen gibt es aber das Problem, dass sie viele Mutationen erworben haben und sich zudem permanent weiter verändern. Auch ihre Oberflächenmerkmale wandeln sich ständig ab, weshalb man sie eben nur in Zeit raubenden Transplantationsversuchen sicher identifizieren kann.

Das Krebsstammzell-Konzept (schematische Darstellung)



Die Therapie tötet die meisten Tumorzellen ab. Die Krebsstammzelle in ihrer schützenden Nische übersteht den Angriff jedoch.

Monate oder Jahre später: Die Krebsstammzelle teilt sich und bringt neue Tumorzellen hervor. Der Tumor kehrt zurück.

Der Tumor findet Anschluss ans Blutgefäßsystem. Krebszellen breiten sich mit dem Blut im Körper aus – unter ihnen auch Metastasen bildende Stammzellen.



»Man muss die Krebsstammzellen treffen, um Krebs zu heilen«

Bei welchen Tumorerkrankungen wurden Krebsstammzellen bislang nachgewiesen?

TRUMPP: In den späten 1990er Jahren hat man sie bei verschiedenen Arten von Blutkrebs gefunden, später auch in Tumoren der Brust, der Prostata, des Gehirns oder des Darms. Ob es Krebsstammzellen tatsächlich bei allen Krebsarten gibt, wissen wir nicht. Die bisherigen Erkenntnisse lassen aber darauf schließen, dass sie bei den meisten dieser Erkrankungen existieren.

Die Fachzeitschriften »Nature« und »Science« haben kürzlich Studien über Krebsstammzellen veröffentlicht, die für Aufsehen sorgten. Was war das Besondere daran?

TRUMPP: Um Krebsstammzellen nachzuweisen, indem man sie in Mäuse überträgt, muss man das Immunsystem der Tiere ausschalten, damit es die menschlichen Zellen nicht sofort wieder abstößt. Kritiker haben immer bemängelt, dass Versuche mit immungeschwächten Mäusen wenig Rückschlüsse auf Tumorerkrankungen beim Menschen erlauben. Die Autoren der neuen Studien haben Krebsstammzellen in Tieren mit intaktem Immunsystem nachgewiesen, was diesen Einwand entkräftet. Zudem gelang beim Glioblastom – einem aggressiven Hirntumor – der Nachweis, dass eine Untergruppe von stammzellähnlichen Krebszellen den Tumor nach zunächst erfolgreicher Chemotherapie zurückkehren lässt. Meines Erachtens ist das ein weiterer gewichtiger Beleg für die Existenz von Krebsstammzellen.

Haben Ihre eigenen Forschungen auch solche Hinweise ergeben?

TRUMPP: Bei vielen Krebskranken lösen sich Zellen vom Primärtumor und wandern in Blut und Lymphe ab. Dies ist der erste Schritt der Metastasierung, also der Bildung von Tochtergeschwülsten. Wir haben Tumorzellen im Blut von Brustkrebspatientinnen untersucht und getestet, ob sie Metastasen hervorbringen konnten. Es zeigte sich, dass nur einige dazu fä-

hig waren, nämlich solche mit Stammzeleigenschaften. Ihr Anteil lag zwischen einem und rund 40 Prozent der zirkulierenden Tumorzellen. Wir vermuten daher, dass nur sie in der Lage sind, Fernmetastasen zu bilden.

Lässt das auf eine therapeutische Möglichkeit hoffen, die bislang schwer behandelbaren Tochtertumoren anzugreifen?

TRUMPP: Unser nächstes Ziel ist es, neue Marker zu finden, die es erlauben, Metastasen bildende Zellen im Blut von Krebspatienten sicher nachzuweisen. Wir haben bereits drei Oberflächenmoleküle gefunden, die auf solche Zellen hinweisen. Sie könnten sich als nützliche Marker für die Diagnose, vielleicht auch als Ziele für neue Medikamente erweisen. Gemeinsam mit Andreas Schneeweiss vom Nationalen Zentrum für Tumorerkrankungen Heidelberg und Partnern aus der Industrie wollen wir Wirkstoffe entwickeln, die an Metastasen induzierenden Krebsstammzellen im Blut ansetzen und sie nachhaltig bekämpfen. Womöglich können wir auch bereits existierende Tochtergeschwülste ins Visier nehmen. Denn wir vermuten, dass diese nahezu vollständig aus Krebsstammzellen bestehen. Das würde erklären, warum sie so therapieresistent sind – und zugleich aufzeigen, wie sie eventuell bekämpft werden können.

Normale Stammzellen überdauern an speziellen Orten im Körper, in so genannten Stammzellnischen. Könnte das auch auf Krebsstammzellen zutreffen?

TRUMPP: Wir gehen davon aus, dass es in jedem Organ und Gewebe unseres Körpers Nischen gibt, in denen Stammzellen sitzen und bei Bedarf aktiviert werden – etwa die Blut bildenden Stammzellen, die gut geschützt in Höhlen im Inneren des Knochenmarks überdauern. An solchen Orten könnten sich auch Krebsstammzellen verstecken.

Eines Ihrer ersten Projekte hatte zum Ziel, ruhende Krebsstammzellen aus ihren Schutzräumen zu locken und

so anfälliger für Medikamente zu machen. Was ist daraus geworden?

TRUMPP: Unsere Idee war, die ruhenden Leukämienstammzellen mit Interferon-alpha, einem Botenstoff des Immunsystems, aus ihrer Nische zu holen und anschließend mit zielgerichteten Medikamenten oder Chemotherapeutika zu zerstören. Wir arbeiten nach wie vor an diesem Ansatz, haben aber erkennen müssen, dass die Verhältnisse komplexer sind als gedacht. Die Methode kann funktionieren, aber womöglich ist Interferon-alpha nicht der bestmögliche Lockstoff und allein nicht effizient genug. Wir erproben bereits weitere Substanzen, die ebenfalls die Schläfer aufwecken können.

Gibt es noch andere Beispiele für medizinische Ansätze, die sich auf Erkenntnisse der Krebsstammzellforschung stützen?

TRUMPP: Das biopharmazeutische Unternehmen Apogenix, eine Ausgründung des Deutschen Krebsforschungszentrums, hat einen Wirkstoff entwickelt, der gerade erfolgreich eine klinische Phase-II-Studie bei Patienten mit einem Glioblastom durchlaufen hat. Der Wirkstoff lässt auf neue Behandlungsmöglichkeiten für diese tückische Krebserkrankung hoffen. Wie meine Kollegin Ana Martin-Villalba und ihre Mitarbeiter am Deutschen Krebsforschungszentrum kürzlich gezeigt haben, ist der Erfolg vermutlich darauf zurückzuführen, dass diese Substanz besonders die Krebsstammzellen des Tumors angreift.

Die so genannte personalisierte Medizin geht davon aus, dass Patienten, die äußerlich an der gleichen Krebserkrankung leiden, auf Grund molekularer Unterschiede ihrer Tumoren in Gruppen aufgeteilt und unterschiedlich behandelt werden müssen.

TRUMPP: Das gilt beispielsweise für das Pankreaskarzinom, den Bauchspeicheldrüsenkrebs. Wir haben die molekularen Eigenschaften der Krebsstammzellen von Pankreasadenokarzinomen – der häufigsten Variante – bestimmt und können anhand dieser Merkmale mindestens drei Gruppen von Patienten voneinander abgrenzen. Sie unterscheiden sich sowohl im Ansprechen auf die Therapie als auch hinsichtlich der mittleren Überlebenszeit. Bislang werden die Patienten jedoch meist einheitlich behandelt.

Was genau kennzeichnet diese verschiedenen Erkrankungsarten?

TRUMPP: Vom Subtyp A wissen wir, dass die Krebszellen auf Gemcitabin – den herkömmlich verabreichten Arzneistoff – kaum reagieren. Bei den betroffenen Patienten stellt sich deshalb die Frage, ob die belastende Therapie für sie überhaupt sinnvoll ist. Bei den Subtypen B und C haben wir in Tierversuchen festgestellt: Wenn wir Gemcitabin zusammen mit neuen Medikamenten einsetzen, die zielgerichtet auf bestimmte tumorspezifische Moleküle einwirken, dann kann dies den Tumor stark hemmen oder sogar eliminieren. Einige der von uns getesteten Arzneimittel sind bereits für die Behandlung anderer Krebsarten zugelassen, werden bislang aber nicht gegen Bauchspeicheldrüsenkrebs eingesetzt. Wir

wollen die Kombination von herkömmlichen Chemotherapeutika und neuen Medikamenten bald in einer klinischen Studie erproben.

Gibt es noch weitere Hoffnungsschimmer für die Patienten? Das Pankreaskarzinom gehört ja nach wie vor zu den Krebserkrankungen mit schlechter Prognose.

TRUMPP: Zusammen mit unseren Kollegen am Deutschen Krebsforschungszentrum und am Universitätsklinikum Heidelberg sequenzieren wir gerade das Genom der unterschiedlichen Subtypen des Pankreaskarzinoms. Wir lesen die Erbinformation der Krebszellen also quasi Buchstabe für Buchstabe. Die genetischen Profile, die wir dabei finden, wollen wir den verschiedenen Patientengruppen zuordnen. Hoffentlich ergeben sich daraus Angriffspunkte für neue Therapien. Verschiedene Tumorarten haben ja manchmal überraschende molekulare Gemeinsamkeiten. So treten Mutationen, die bestimmte Signalwege durcheinanderbringen, in gleicher Weise bei völlig verschiedenen Krebserkrankungen auf. Arzneistoffe, die auf solche Signalwege einwirken, können also möglicherweise mehrere Krebsarten angreifen.

Entartete Zellen haben oft unzählige Mutationen erworben. Was bedeutet das für Ihre Forschung?

TRUMPP: Wir müssen herausfinden, welche der gestörten molekularen Signalwege wir blockieren müssen, damit ein Tumor zu Grunde geht. Welche von den vielen genetischen Veränderungen sind entscheidend? Keine einfache Frage. Aber ich glaube, dass uns das internationale Krebsgenomprojekt wertvolle Hinweise liefern wird. Es hat zum Ziel, die genetischen Besonderheiten der 50 häufigsten Tumorarten offenzulegen.

Wird es sie eines Tages geben, die ersehnte Pille gegen Krebs?

TRUMPP: Sie meinen, dass man eine Art gordischen Knoten findet, den man mit einem Hieb durchschlagen kann? Das wäre schön. Aber daran glaube ich – noch – nicht, zumindest nicht bei soliden Tumoren. Dennoch: Im Moment ist sehr viel Bewegung in der Krebsforschung. Krebsstammzellen werden bei immer mehr Tumorarten nachgewiesen; es gibt bereits einige zielgerichtet ansetzende Medikamente; weitere sind in klinischer Erprobung; und die Entschlüsselung des Krebsgenoms lässt auf neue, medizinisch verwertbare Einsichten hoffen. Nimmt man all das zusammen, lässt sich eines Tages vielleicht auch für Krebserkrankungen erreichen, was bei anderen Leiden schon gelungen ist – beispielsweise bei Diabetes oder Aids, die unbehandelt tödlich verlaufen, sich bei guter medizinischer Betreuung aber in Schach halten lassen. Mit einem Arsenal verschiedener Therapien könnten die Mediziner künftig Krebs zu einer gut behandelbaren chronischen Erkrankung machen, mit der die Patienten über lange Zeit gut leben können. Das ist es, worauf ich persönlich hoffe. ~

Das Gespräch führte **Claudia Eberhard-Metzger**. Sie lebt und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Maikammer an der Südlichen Weinstraße.

Pflanzen nach Maß

Seit rund 30 Jahren können Forscher mit Hilfe der grünen Gentechnik die Eigenschaften von Nutzpflanzen gezielt verändern und sogar Artgrenzen überwinden. Erfolgreiche Eingriffe in das Erbgut erfordern eine genaue Kenntnis der Zielgene und eine ausgeklügelte Technik, um Pflanzen mit den erwünschten Eigenschaften zu erzeugen.

Von Christian Jung und Caroline Möhring

Fast 90 Prozent des in Europa verbrauchten Zuckers werden aus heimischen Zuckerrüben gewonnen – verdickten Wurzeln, die große Mengen von Reservestoffen enthalten. Mit ihrer Hilfe würden die Pflanzen im zweiten Lebensjahr Blüten und Früchte bilden. Daher ernten Bauern die Rüben am Ende des ersten Jahres, bevor die Pflanzen eine Chance haben, zu blühen und dafür die gespeicherten Stoffe wieder zu verbrauchen.

Manchmal kann man dennoch auf Rübenfeldern die ungeliebten »Schosser« sehen: die unscheinbaren Blütenstände von *Beta vulgaris*, die rund anderthalb Meter hoch hinauswachsen und nicht nur die maschinelle Ernte stören, sondern auch die Erträge mindern. Einzelne Exemplare blühen nämlich schon in ihrem ersten Lebensjahr – und gleichen darin ihren wilden Verwandten. Denn vor der züchterischen Selektion auf immer höheren Zuckergehalt wurde aus der einjährigen Wilde Rübe *Beta vulgaris* subsp. *maritima* die zweijährige Zuckerrübe *Beta vulgaris* subsp. *vulgaris*.

Lassen sich die Mechanismen, die über den Blütezeitpunkt bestimmen, im Erbgut ausfindig machen? Könnte man daraus weiterreichende Schlüsse auch für andere Pflanzen ziehen? Und ließen diese sich vielleicht sogar nutzen,

um den Zeitpunkt von Blüte oder Reife gezielt zu verändern? Solchen Fragen gehen wir am Institut für Pflanzenzüchtung der Universität Kiel in einem internationalen Verbund mit Wissenschaftlern aus Schweden und Großbritannien nach. Seit vielen Jahren beschäftigen wir uns vor allem mit der Entwicklung von Zuckerrüben und ihren wilden Verwandten und blicken dabei mit den modernsten Verfahren der Biobeziehungsweise Gentechnik tief in das Erbgut der Pflanzen.

Tatsächlich haben wir inzwischen gemeinsam mit Kollegen im schwedischen Umea ein einzelnes Gen im Erbgut der Zuckerrübe identifiziert, das bestimmt, ob und wann die Pflanze zu schossen beginnt. Das ist die Voraussetzung für die kurz darauf einsetzende Blüte. Die Probe aufs Exempel belegt: Wenn man dieses Gen, das den wissenschaftlichen Namen *BTC1* trägt, mit Hilfe gentechnischer Verfahren ausschaltet, schossen und blühen die Pflanzen überhaupt nicht mehr.

Dieses Ergebnis ist für die Pflanzenzüchter von erheblicher Bedeutung. Denn nun können sie Zuckerrüben ohne dieses Gen entwickeln, die sich – wie Wintergetreide oder Winterraps – schon vor der kalten Jahreszeit säen lassen und dennoch nicht im ersten Sommer Blüten bilden. Das Ertragspotenzial derartiger Winterrüben dürfte um 25 Prozent höher liegen als dasjenige herkömmlicher Zuckerrüben, weil die Pflanzen bereits im zeitigen Frühjahr mit der Fotosynthese und damit der Zuckerproduktion beginnen können.

Erst die modernen Verfahren der Gentechnik machen es möglich, die Zusammenhänge so genau zu verstehen – und dann eventuell auch gezielt in das Erbgut der Pflanzen einzugreifen. Dabei unterscheiden sich unsere Arbeiten in einem Punkt fundamental von dem, was allgemein unter dem Begriff Gentechnik oder Genmanipulation verstanden wird: Hier geht es nicht darum, das Erbgut anderer Arten in die Pflanzen einzuschleusen, also »transgene Pflanzen« mit verbesserten Eigenschaften zu erzeugen. Bei unseren Arbeiten an Zuckerrüben werden ausschließlich Gene derselben Art übertragen, das heißt »cisgene Pflanzen« erzeugt oder auch nur einzelne Gene gezielt ausgeschaltet. Wir greifen also in das Erbgut der Pflanzen ein, wie es die traditionelle Pflanzen-

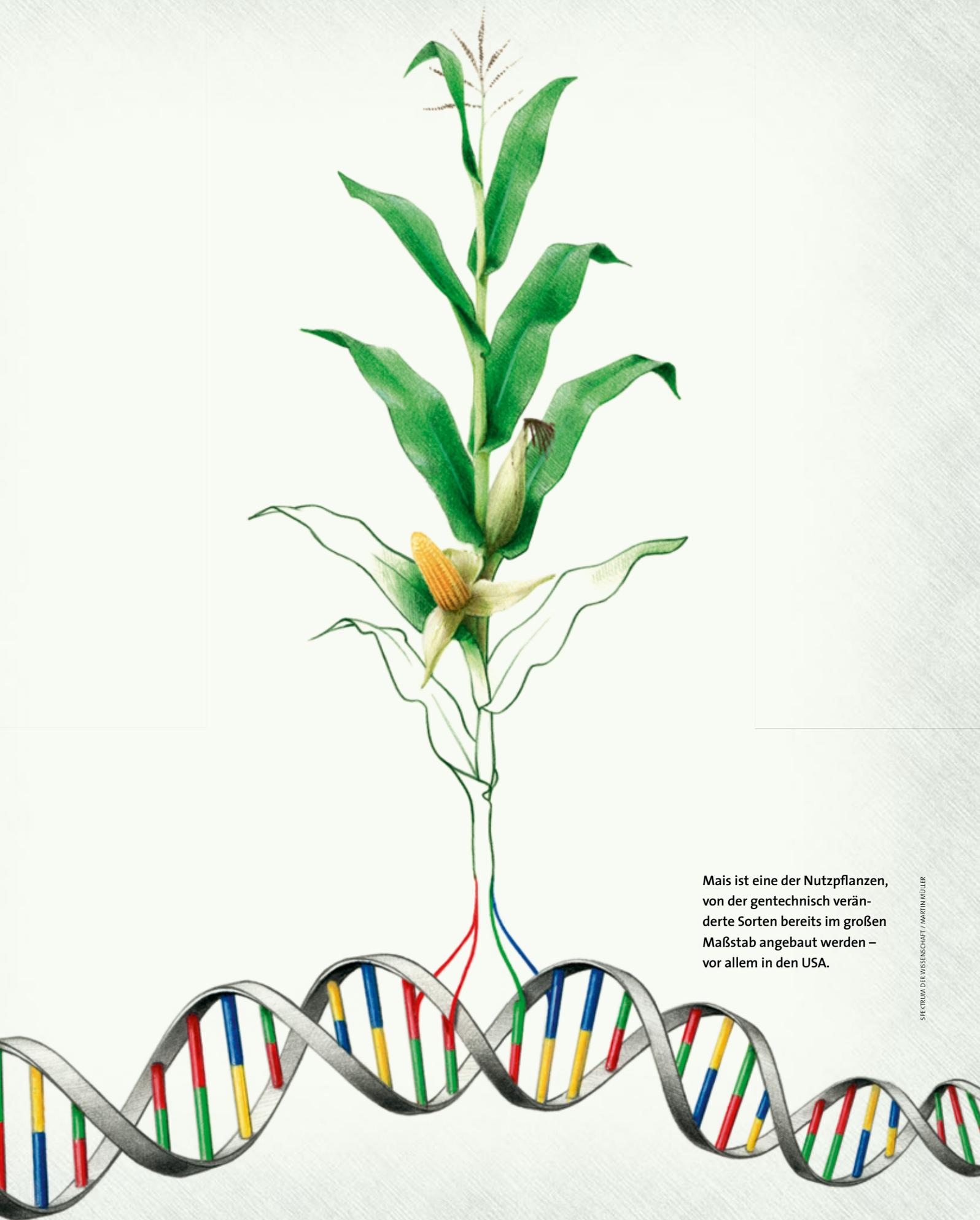
AUF EINEN BLICK

NÄHRSTOFFREICHER UND ROBUSTER

1 Mit bio- und gentechnischen Verfahren versuchen Pflanzenzüchter die **Eigenschaften wichtiger Nutzpflanzen** zu optimieren. Dabei steht ihnen eine große Palette an Methoden zur Verfügung, etwa das Regenerieren vollständiger Pflanzen aus Einzelzellen.

2 Mittels **Gentransfer** sollen Pflanzen neue Eigenschaften ausbilden, die mit konventioneller Züchtung schwer erreichbar wären, etwa einen erhöhten Gehalt an bestimmten Nährstoffen oder reduzierte Anfälligkeit gegenüber Schädlingen, Krankheiten und widrigen Bedingungen.

3 Eine der bislang erfolgreichsten, aber in der Öffentlichkeit auch umstrittensten gentechnischen Veränderungen von Pflanzen betrifft die **Resistenz gegen bestimmte Totalherbizide**.



Mais ist eine der Nutzpflanzen, von der gentechnisch veränderte Sorten bereits im großen Maßstab angebaut werden – vor allem in den USA.

züchtung schon seit vielen tausend Jahren erfolgreich tut – nur viel direkter.

Vor rund 12 000 Jahren begann der Mensch, sich Pflanzen nach seinen Bedürfnissen zu schaffen. Damals gab es etwa drei Millionen Menschen auf der Erde, die als Jäger und Sammler von dem lebten, was die Natur ihnen bot. Rund 20 Quadratkilometer Land brauchte jeder von ihnen für seine Ernährung – heute kann man mit einer Ackerfläche dieser Größe mehr als 9000 Personen satt machen. So begann die Population denn auch zu wachsen, als der Mensch lernte, Pflanzen und Tiere für seine Zwecke zu nutzen, ihre Eigenschaften zu beeinflussen und sie zu domestizieren. Ihren Anfang nahm diese Entwicklung vermutlich im Bereich des Fruchtbaren Halbmonds – jener Region nördlich der Arabischen Halbinsel, in der es im Winter reichlich Regen gibt. Das Zweistromland zwischen Euphrat und Tigris, die Levante und der Westen des heutigen Irans gehören zu diesem Raum, in dem die neolithische Revolution begann, also der Übergang zu Ackerbau und Viehzucht. Dort sind die Vorfahren und wilden Verwandten der bedeutendsten Kulturpflanzen der Jungsteinzeit zu Hause: Emmer, Einkorn (entfernte Verwandte unseres heutigen Weizens), Gerste, Lein, Erbse, Kichererbse und Linse. Auf anderen Kontinenten kam es später zu vergleichbaren Entwicklungen. So wurden in den Anden Kartoffeln angebaut, in Ostasien wurde Reis kultiviert und in Mexiko aus Teosinte Mais entwickelt.

Solches Domestizieren von Pflanzen, ihre Überführung von Wild- in Kulturformen, und die weitere züchterische Bearbeitung ist mit gravierenden Veränderungen ihres Erbguts verbunden. So besteht das Wesen der Pflanzenzüchtung darin, genetische Variation zu erzeugen und daraus verbesserte Formen zu selektieren. Als Voraussetzung für jede Art von Landwirtschaft ist die Pflanzenzüchtung eng mit der Menschheitsgeschichte verknüpft und hat Gewächse hervorgebracht, die oft nur noch wenig mit ihren wilden Verwandten gemein haben. Tatsächlich haben viele Kulturpflanzen durch die Auslese auf Eigenschaften, die für die praktische Seite des Ackerbaus oder die Qualität des Ernteguts von Bedeutung

sind, ganz oder teilweise ihre Fähigkeit eingebüßt, unter natürlichen Bedingungen zu bestehen. Vielfach können sie überhaupt nur in der Obhut des Menschen überleben, etwa weil sie extrem vergrößerte Ertragsorgane wie Rüben oder Früchte bilden, keine toxischen Inhaltsstoffe mehr besitzen, mit denen sie sich gegen Schädlinge zur Wehr setzen könnten, oder ihre natürliche Fähigkeit zur Reproduktion und Ausbreitung auf andere Weise eingeschränkt ist. Vor allem aber hat man ihre Entwicklungszyklen an die Bedingungen des Acker- und Gartenbaus angepasst.

Ein Beispiel sind die Getreide: Ihre Wildformen besitzen brüchige Ähren – eine Eigenschaft, die für die Vermehrung unter natürlichen Bedingungen unabdingbar ist. Denn nur wenn die reifen Ähren zerbrechen, können sich ihre Samen weit verbreiten. Eine der ersten züchterischen Aktivitäten des Menschen bestand jedoch darin, Getreideformen auszuwählen, deren reife Ähren nicht zerbrachen und die sich deshalb überhaupt erst ernten ließen. Heute weiß man, dass dieses Merkmal bei vielen Arten auf natürlich auftretende Mutationen in einigen wenigen Genen zurückzuführen ist.

Unerwünschte Eigenschaften ausmerzen

Die Wildformen der Getreide zeichnen sich überdies durch eine ausgeprägte Keimruhe aus: Ihre Samen treiben nicht sofort nach der Reife aus. Unter den Lebensbedingungen der gemäßigten Zone erweist sich das als ausgesprochen vorteilhaft, weil den empfindlichen Jungpflanzen so die harten Bedingungen des Winters erspart bleiben. In Regionen, in denen häufig Brände wüten, ist es ebenfalls von Vorteil, wenn Samen erst nach dem Verlöschen der Feuer aufgehen, weil die Keimlinge dann ideale Bedingungen vorfinden. Entsprechend keimen viele Pflanzen erst nach extremen Temperaturen oder einer langen Ruhephase. Für die Nutzung durch den Menschen ist dies jedoch höchst unerwünscht. Schnell und gleichmäßig soll das Getreide auflaufen, sobald man es gesät hat. Von Beginn des Ackerbaus an hat es deshalb nicht an Bemühungen gefehlt, die Keimruhe der Getreide auszuschalten.

Ein weiteres Beispiel ist die Änderung von Ansprüchen an die Tageslängen. Die Wildformen von Kartoffeln oder Mais etwa, die aus (sub)tropischen Regionen stammen, reifen hier zu Lande nicht, weil sie an kurze Tage angepasst sind. Die Pflanzen wachsen zwar vegetativ, bilden die für den Menschen interessanten Organe wie Knollen oder Körner aber nur verspätet oder gar nicht aus. So hat man etwa Kartoffelpflanzen, die schon im 16. Jahrhundert aus Südamerika eingeführt wurden, in Europa zunächst wegen ihrer schönen Blüten und des üppigen Laubs als Zierpflanzen gehalten. Erst zwei Jahrhunderte später wurden Varianten entdeckt, die auch in gemäßigten Breiten Knollen bilden – und die landwirtschaftliche Nutzung der Kartoffel in Europa konnte beginnen. Ermöglicht haben das Mutationen in jenen Genen, die das Umschalten von der vegetativen in die generative Phase steuern.

Die längste Zeit der Menschheitsgeschichte hat sich die Entwicklung neuer Sorten auf solche Weise abgespielt. Man



Lieblingsspielzeug der Pflanzengenetiker

Im Jahr 2000 wurde erstmals das Genom einer Pflanze vollständig entschlüsselt, nämlich das der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*. Schon lange zählt dieses unscheinbare Gewächs zu den Lieblingspflanzen der Genetiker – weist es doch eine Reihe von Eigenschaften auf, die es zum Modellorganismus geradezu prädestinieren: Es hat einen kurzen Generationszyklus und lässt sich auf relativ kleinem Raum leicht kultivieren, verfügt jedoch zugleich über alle wesentlichen Eigenschaften höherer Pflanzen. Vor allem aber hat die Ackerschmalwand ein sehr kleines Genom von nur 125 Millionen Basenpaaren, die auf fünf Chromosomen verteilt sind.

Dabei sind DNA-Sequenzen, die nur in einer oder wenigen Kopien im Genom vorkommen, meist die für Züchter interessanten, weil sie jene Gene darstellen, die in funktionelle Proteine umgesetzt werden. Sie stellen in der Regel aber nur einen geringen Teil des Genoms – je nach Größe des Erbguts etwa fünf Prozent der DNA. Der Rest besteht aus oft wiederholten Sequenzen, von denen es zwischen einigen hundert und mehreren Millionen Kopien gibt und die in der Evolution eine wichtige Rolle spielen.

Diese repetitiven DNA-Sequenzen sind auch ein Grund dafür, dass die Genome der Kulturpflanzen – gemessen an der Zahl der Nukleotide – sehr unterschiedlich groß sind. Nach dem

bisherigen Wissensstand hat der Reis das kleinste Genom aller wichtigen Nutzpflanzen. Es wurde im Jahr 2001 entschlüsselt und hat eine Größe von rund 430 Millionen Nukleotiden. Der Weizen dagegen besitzt eines der größten Genome mit rund 17 Milliarden Nukleotiden.



ISTOCKPHOTO / PAKUJANE

Die Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana* ist ein hervorragendes Modell für die Pflanzengenetik – vor allem wegen ihres kleinen Genoms.

entdeckte Varianten, die durch Mutationen spontan entstanden waren, und versuchte, sie auszulesen und zu vermehren. Erst mit dem Zeitalter der Industrialisierung setzte eine systematische Pflanzenzüchtung ein, die mit neuen Techniken des Ackerbaus und der Verarbeitung Hand in Hand ging.

Als ihre Grundlage gilt die Aufklärung der Gesetzmäßigkeiten der Vererbung durch den Mönch Gregor Mendel in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Bei einfach vererbten Merkmalen – wie der Farbe von Samen oder Blüten oder auch Resistenzen – ist der Erbgang gemäß den »mendelschen Regeln« leicht zu erkennen. Bei anderen, die wie etwa der Ertrag von einer Vielzahl von Genen abhängen, lässt er sich dagegen nur mit Mühe nachvollziehen. Entsprechend ist die Züchtung auf einfach vererbte Merkmale wesentlich leichter zu bewerkstelligen als die zielgerichtete Veränderung komplex vererbter Eigenschaften, deren Ausprägung zudem von der Umwelt beeinflusst wird.

Seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts konnte die systematische Pflanzenzüchtung bemerkenswerte Erfolge verzeichnen. Der Weizenertrag beispielsweise, der um 1800 in Deutschland bei rund einer Tonne pro Hektar lag und dann bis 1930 ganz allmählich auf 1,84 Tonnen gestiegen war, wuchs nun kontinuierlich und schnell. Heute sind Spitzenerträge von mehr als zwölf Tonnen keine Seltenheit mehr. Ohne Zweifel haben verbesserte Anbautechniken wie Bodenbearbeitung, Düngung oder Pflanzenschutz erheblichen Anteil an

diesem Erfolg – ohne die modernen leistungsfähigen Sorten ließen sich solche Erträge aber nicht erzielen. Auch bei Resistenzen gegen Schaderreger und Krankheiten konnte die Züchtung große Fortschritte verzeichnen, die der Gesundheit der Verbraucher ebenso zugutekommen wie dem pfleglichen Umgang mit Boden, Wasser und dem Erhalt der Biodiversität.

All diese Erfolge der systematischen Pflanzenzucht gehen letztlich auf erhebliche Veränderungen im Erbgut der Pflanzen zurück. Heute greift man dabei nicht mehr nur auf die Varianten zurück, die in der Natur zu finden sind und durch spontane Mutation entstanden sind. Vielmehr haben Züchter eine Reihe von Techniken entwickelt, um die genetische Vielfalt zu erhöhen.

Züchtung mit Turbolader

Zuallererst wäre da der traditionelle Weg: Kreuzungen zwischen unterschiedlichen Genotypen einer Art oder auch verschiedenen Arten mischen die Gene neu. Mütterliche und väterliche Merkmale verteilen sich zufällig auf die Nachkommen, aus denen der Züchter dann in einem langwierigen Prozess die Pflanzen mit erwünschten Eigenschaften ausliest. Von der ersten Kreuzung bis zum Beginn der Vermarktung einer Sorte vergehen oft mehr als zwölf Jahre. So wundert es nicht, dass man alle Möglichkeiten des biotechnischen Fortschritts nutzt, um schneller und effizienter neue Sorten zu entwickeln.

»In der Öffentlichkeit umstritten ist letztlich nur ein Aspekt der Gentechnik, nämlich das Einschleusen fremder Gene in das Erbgut«

Zu diesen Verfahren zählt etwa das Regenerieren ganzer Pflanzen aus isolierten Pflanzenteilen oder einzelnen Zellen, das unter anderem das Warten auf die nächste Blüte erspart. Ferner ermöglicht das Verschmelzen von Protoplasten – Zellen ohne Zellwand, die sich aus fast allen Teilen einer Pflanze gewinnen lassen – neue Genkombinationen, die auf konventionellem Weg nicht entstehen können, zum Beispiel wegen natürlicher Kreuzungsbarrieren bei nicht verwandten Arten. Daneben lösen bestimmte Verfahren künstlich Mutationen aus, etwa mittels Bestrahlung oder Chemikalien. Rein theoretisch resultieren all diese Techniken in einer schier unbegrenzten Zahl neuer Genvarianten und Genkombinationen. Sinnvoll nutzbar sind jedoch nur wenige davon. Sie herauszufiltern, stellt eine neuartige Herausforderung für die Züchtung dar. Tatsächlich sind viele Sorten, die heute angebaut werden, mit Hilfe derartiger biotechnologischer Verfahren entstanden.

Und schließlich gibt es noch den gezielten Zugriff aufs Erbgut – mit Hilfe der Gentechnik. Sie umfasst all jene Verfahren, mit denen sich Gene identifizieren, charakterisieren, vermehren und in andere Organismen übertragen lassen. Sie beruhen letztlich auf der Tatsache, dass der genetische Kode universell, also für alle Lebewesen gültig ist.

Für die Selektion von Pflanzen mit erwünschten Eigenschaften werden solche gentechnische Verfahren inzwischen vielfach angewendet, ohne dass Laien davon Notiz nehmen. In der Öffentlichkeit umstritten ist letztlich nur ein Teil der Gentechnik, nämlich der direkte Gentransfer: das Einschleusen fremder Gene in das Erbgut. Mit diesem Verfahren lassen sich einzelne oder wenige Erbfaktoren ganz gezielt abwandeln und somit neue Eigenschaften übertragen – ohne unerwünschte Nebeneffekte, wie sie beispielsweise bei der Mutagenese auftreten. Das unterscheidet den Gentransfer von allen anderen Verfahren der Züchtung. Grundsätzlich neu ist zudem, dass dadurch auch Erbgut nicht verwandter Arten in Pflanzen eingeführt werden kann, wodurch transgene Pflanzen entstehen. Nach neueren Erkenntnissen der Genomforschung haben Pflanzen zwar auch im Lauf der Evolution gelegentlich Gensequenzen anderer Organismen oder Viren aufgenommen, mit den herkömmlichen Verfahren der Pflanzenzucht kann man dies jedoch nicht erreichen.

Wie aber lassen sich fremde Gene überhaupt in das Erbgut einer Pflanze einschleusen? Wissenschaftler haben dafür verschiedene Verfahren entwickelt, von denen sich zwei in der grünen Gentechnik besonders bewährt haben. Biolistik oder Partikelbombardement nennt sich das eine. Dabei werden Genabschnitte an winzige Gold- oder Wolframpartikel gebunden, die als Mikroprojekte die stabilen Wände pflanz-

licher Zellen durchdringen, wenn man sie mit hoher Geschwindigkeit auf diese schießt. Nach dem Zufallsprinzip integriert sich die DNA dann in das Erbgut. Anschließend lassen sich mit den auch sonst gebräuchlichen Verfahren der Zell- und Gewebekultur jene Zellen selektieren, in die fremde Gene eingebaut wurden, und daraus ganze Pflanzen regenerieren. Da diese Technik rein auf den Zufall setzt, hat sie klare Nachteile. Sie ist extrem ineffizient, und es werden häufig mehrere Kopien eines Gens eingebaut, was die Vererbung der transgenen Eigenschaft verkompliziert oder zum unerwünschten Abschalten des Gens führen kann.

Mikrobe als Genfährer

Häufiger nutzen Forscher daher die historisch ältere Methode des Gentransfers mit Hilfe von *Agrobacterium tumefaciens*. Dieses Bakterium ist in der Natur weit verbreitet und gelangt durch Wunden in pflanzliches Gewebe. Dort überträgt es dann einen Abschnitt seines Erbguts in das Genom der Wirtspflanze. Das regt die Vermehrung von Zellen an und programmiert den Stoffwechsel des Wirts so um, dass er so genannte Opine produziert, von denen sich die Mikroben ernähren. Schon 1907 stellte man fest, dass *Agrobacterium* die Wurzelhalsgallen hervorruft. Im Jahr 1974, also nach der Entdeckung des universellen genetischen Codes, zeigte sich dann: Die Wucherungen entstehen nur in Anwesenheit eines bestimmten Plasmids – eines jener kleinen, meist zirkulären und sich selbst vermehrenden DNA-Moleküle, die in Bakterien vorkommen können, aber nicht zu deren Chromosom zählen. Drei Jahre später fanden Forscher heraus, dass ein Teil dieses »Tumor-induzierenden Plasmids« (Ti-Plasmids), die T-DNA (Transfer-DNA), sich in das Genom der Pflanze integriert. 1983 schließlich gelang es den Belgiern Jeff Schell und Marc Van Montagu durch gezielte Veränderung der T-DNA, die erste transgene Tabakpflanze herzustellen. Dazu entfernten sie die Gene für die Tumorbildung sowie für die Synthese der Opine aus dem Plasmid und ersetzten sie durch erwünschte Gene, die in die Pflanze übertragen werden sollten.

Seither ist der Transfer mit der bakteriellen Genfährer zu einem Routineverfahren für viele Kulturpflanzen geworden – auch für solche, die wie Getreide eigentlich keine natürlichen Wirte von *Agrobacterium* sind. Ganz gezielt funktionierte das allerdings auch mit diesem Verfahren lange Zeit nicht. Man kann die »Transporter« zwar selektiv beladen und so dafür sorgen, dass nur ganz bestimmte Stücke des Erbguts in die Zellen gelangen. An welcher Stelle sie in das Genom der Pflanzen eingebaut wurden, ließ sich bis vor Kurzem jedoch nicht beeinflussen. Daher prägte sich die erwünschte Eigenschaft nicht in jedem Fall optimal aus. Seit Neuestem ist es

aber möglich, mit Hilfe eines Enzyms den Integrationsort genau zu wählen.

Auf welchem Weg auch immer – in aller Regel wird ein fremdes Gen nur in einzelne Zellen eingeführt, aus denen dann wieder vollständige Pflanzen entstehen. Um aus einer Vielzahl von Zellen diejenigen herauszufiltern, die das Gen tatsächlich in ihr Erbgut eingebaut haben, überträgt man gleichzeitig ein zusätzliches Marker- oder Reparaturgen. Es gibt bislang etwa 50 solche Gene, mit denen sich derartige »transformierte« Zellen bequem und schnell selektieren lassen. Zu ihnen zählen zum Beispiel fluoreszierende Proteine oder so genannte positive Selektionsmarker, die es der Zelle ermöglichen, auf Medien mit Antibiotika oder Herbiziden zu wachsen. Letztere werden besonders häufig verwendet. Dass sie in den transformierten Pflanzen verbleiben, wird von der Öffentlichkeit kritisch gesehen, die befürchtet, damit könnten sich beispielsweise Antibiotikaresistenzen in der Natur ausbreiten. Zahlreiche Studien zeigen indes, dass die üblicherweise verwendeten Resistenzgene ohnehin weit verbreitet sind. Inzwischen ist es zudem leicht möglich, transgene Pflanzen ohne Antibiotika-Markergene herzustellen.

Neben Neugier und Freude am Verstehen von Zusammenhängen treibt Pflanzenzüchter stets auch ein konkretes Ziel an: die Verbesserung landwirtschaftlich wichtiger Eigenschaften von Pflanzen. Höhere Erträge sollen sie liefern und bessere Qualität, gegen Krankheiten und Schädlinge sollen sie stärker gefeit sein oder robuster gegenüber widrigen Bedingungen wie Hitze, Kälte oder Trockenheit. Vieles hat die traditionelle Pflanzenzüchtung schon erreicht – und dennoch geht bis heute weltweit rund ein Drittel der Ernte durch Krankheiten, Schädlinge und Unkräuter verloren.

Widrigen Umweltbedingungen trotzen

Mit chemischen Pflanzenschutzmitteln versucht man, das zu verhindern. Weniger belastend für die Umwelt, aber oft weit aufwändiger sind biologische Verfahren, mit denen Schädlinge gezielt abgefangen, ihre Sinne verwirrt oder Nützlinge gefördert werden. Eine weitere Möglichkeit liegt in der Züchtung von Pflanzensorten, die resistent gegen bestimmte Krankheiten oder Schädlinge sind. Zu diesem Zweck setzt man neben konventionellen Züchtungsmethoden auch gentechnische Verfahren ein (siehe Kasten unten).

Eingebaute Schädlingsabwehr

Für die Abwehr gefräßiger Insekten nutzt man unter anderem ein Mittel, das schon seit mehr als 30 Jahren im biologischen Pflanzenschutz und im ökologischen Landbau Verwendung findet: das Toxin von *Bacillus thuringiensis* (Bt). Diese Mikrobe ist in der Natur weit verbreitet und hat sich auf Insektenlarven spezialisiert, die sich von Pflanzen ernähren. Sie produziert ein Eiweiß, das so genannte Bt-Toxin, das für einige solche parasitische Insektenlarven giftig ist, andere Lebewesen jedoch nicht schädigt. Wegen dieser sehr spezifischen Wirkung nutzt der biologische Pflanzenschutz Bt-Präparate gern. Da das Toxin aber rasch abgebaut wird, ist es schwer, den richtigen Zeitpunkt für die Behandlung abzusichern. So lag der Gedanke nahe, die Pflanzen mit dem Gen auszustatten, das für den Wirkstoff zuständig ist. Tatsächlich haben Forscher es isoliert und mit gentechnischen Verfahren in Nutzpflanzen wie Mais eingebracht. Diese bilden nun selbst das Bt-Toxin und schützen sich auf diese Weise vor dem Raupenfraß. Durch die geschickte Wahl eines Genschalters lässt sich die Produktion des Wirkstoffs zudem auf die Teile der Pflanze beschränken, von denen sich der Schädling üblicherweise ernährt.

Im Jahr 1998 wurden die ersten Pflanzen mit solchen Fähigkeiten für den Anbau zugelassen. Inzwischen wachsen auf mehr als 60 Millionen Hektar rund um den Globus Bt-resistente Pflanzen, vor allem Baumwolle und Mais. Mit gewissem Stolz weisen die Züchter auf weitere Vorteile der so geschützten Pflanzen hin. Sie werden zum Beispiel seltener von Sekundärparasiten befallen, die sonst die Fraßstellen der Insektenlarven als Eintrittspforten in die Pflanze nutzen. Das kann auch der Ge-

sundheit des Menschen nutzen, wenn beispielsweise Bt-Mais seltener von *Fusarium*-Pilzen infiziert wird, die für Menschen hochgiftige Mykotoxine produzieren. Damit sind zudem das daraus hergestellte Maisfutter und die tierischen Produkte weniger mit diesen Substanzen belastet. Inzwischen wurden allerdings auch erste Schädlinge resistent gegen das Bt-Toxin. So gehen die Wissenschaftler unter anderem dazu über, den Wirkstoff geringfügig zu verändern, um solche Resistenzen zumindest für eine Weile zu umgehen.



Ein wichtiger Schädling der Maispflanze ist der Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*). Vor allem seine Raupen sind gefürchtet. Gegen diese ist Bt-Mais resistent, nicht jedoch gegen erwachsene Tiere (Foto).

Weltweit suchen Wissenschaftler zudem nach Möglichkeiten, Pflanzen widerstandsfähiger gegen widrige Umweltbedingungen wie Trockenheit oder salzhaltige Böden zu machen, damit sie auch an ungünstigen Standorten gedeihen. Schon die konventionelle Pflanzenzüchtung war sehr erfolgreich auf diesem Feld. Nun eröffnet die Gentechnik völlig neuartige Möglichkeiten. Trockenstress etwa kann eine Pflanze dadurch vermeiden, dass ihre Samen oder Früchte frühzeitig reifen. Hier kommen nicht zuletzt durch den Klimawandel neue Herausforderungen auf die Pflanzenzüchtung zu.

Welche Gene kontrollieren den Blütezeitpunkt?

Die Anpassung des Blütezeitpunktes ist eine wesentliche Maßnahme, um Stress zu vermeiden. Im Rahmen eines Schwerpunktprogramms der Deutschen Forschungsgemeinschaft (SPP 1530) werden die Gene untersucht, die den Übergang von der vegetativen in die generative Phase im Leben einer Pflanze kontrollieren. Dabei zeigen sich erstaunliche Übereinstimmungen zwischen nicht verwandten Pflanzen. Offensichtlich sind dafür wesentliche Gene über mehr als 100 Millionen Jahre nahezu unverändert geblieben.

Auf einem anderen Gebiet bietet die Gentechnik, in Kombination mit dem chemischen Pflanzenschutz, eine besonders umstrittene Möglichkeit. Ungeliebte Konkurrenz durch Unkräuter bekämpfen die Landwirte seit jeher – zunächst auf mechanische Weise, heute in der Regel mit chemischen Mitteln, die häufig jedoch in Wasser und Böden ihre Spuren hinterlassen. Relativ schnell abbaubar und damit vergleichsweise umweltverträglich sind einige Wirkstoffe, die zentrale

Stoffwechselwege aller Pflanzen blockieren, also nicht nur unerwünschte Gräser und Kräuter, sondern auch die Kulturpflanzen schädigen. So verfiel man auf den Gedanken, Kulturpflanzen gezielt gegen diese so genannten Totalherbizide zu immunisieren.

Das lässt sich auf zweierlei Weise erreichen. Eine Strategie nutzt den Weg der Entgiftung, indem das eingesetzte Herbizid im Stoffwechsel der Pflanze in einen harmlosen Metaboliten überführt und die Pflanze so geschützt wird. Er wird beispielsweise bei der Eliminierung des Wirkstoffs Glufosinat beschrieben, der in einem Totalherbizid mit dem Handelsnamen Basta enthalten ist. Die Substanz hemmt ein Schlüsselenzym der Pflanzen, das im pflanzlichen Stickstoffstoffwechsel für die Entgiftung von Ammoniak zuständig ist. Wird diese unterbrochen, erleiden die Zellen massive Schäden, und die Pflanze stirbt ab. In der Natur wird Glufosinat von dem Bodenbakterium *Streptomyces* gebildet. Zu ihrem eigenen Schutz produziert die Mikrobe zusätzlich das so genannte PAT-Enzym, das den Wirkstoff in eine biologisch unwirksame Form überführt. Wenn man das dafür zuständige Gen in Pflanzen einführt, verleiht es auch ihnen eine zuverlässige Resistenz gegen Glufosinat und die darauf basierenden Herbizide.

Eine andere Strategie setzt auf Enzyme, die nach der Genübertragung ebenjenes Schritt im Stoffwechsel übernehmen, den ein Totalherbizid hemmt. Sie dient zum Beispiel dazu, Nutzpflanzen tolerant gegenüber Glyphosat zu machen, dem Wirkstoff des Herbizids Roundup. Er hemmt ein Enzym, die EPSP-Synthase, dem im Stoffwechsel der Pflanze

Hoffnungsträger »goldener Reis«

Das wohl bekannteste Beispiel für Eingriffe in den Stoffwechsel von Pflanzen ist der »Golden Rice«. Er soll nach dem Willen seiner Entwickler dazu beitragen, in Entwicklungsländern den weit verbreiteten Mangel an Vitamin A zu bekämpfen, der das Immunsystem schwächt, für erhöhte Sterblichkeit bei Kleinkindern verantwortlich gemacht wird und Augenleiden bis zur Erblindung hervorruft. Seine namensgebende Farbe erhält die Pflanze durch die Anreicherung von Betacarotin, einer Vorstufe des Vitamin A, in den Reiskörnern. Erreicht wurde dies durch gleichzeitige Ausprägung dreier Stoffwechsellgene, die benötigt werden, um Lycopene – eine Vorstufe des Betacarotins – zu bilden. Die Pflanzen der ersten Generation enthielten Gene aus der Osterglocke und dem Bakterium *Erwinia uredovora*. Mit etwa 1,6 Mikrogramm pro Gramm Reis war ihr Gehalt an Betacarotin allerdings noch enttäuschend gering.

Bei der Suche nach den Gründen dafür erkannten Forscher, dass eines der verwendeten Enzyme, die Phytoenzymase, die Geschwindigkeit des Carotinstoffwechsels bestimmt. Als das Enzym aus Osterglocken gegen ein aktiveres aus Mais ausgetauscht wurde, erhöhte sich der Carotingehalt der Reiskörner

auf mehr als das 20-Fache, rund 37 Mikrogramm pro Gramm. Das reicht bei einem Verzehr von etwa 70 Gramm Golden Rice am Tag, um immerhin etwa die Hälfte des Bedarfs an Vitamin A zu decken.



Der »goldene Reis« verdankt seinen Namen der intensiven Gelbfärbung, hervorgerufen durch den hohen Gehalt an der Vitamin-A-Vorstufe Betacarotin.

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE (IRRI) / CC-BY-2.0

»Die Erfahrungen aus rund 30 Jahren Gentechnik haben eine gewisse Ernüchterung mit sich gebracht«

zen eine Schlüsselfunktion für die Produktion aromatischer Aminosäuren zukommt. Ohne diese lebenswichtigen Substanzen stellt die Pflanze das Wachstum ein und stirbt schließlich ab. Verglichen mit vielen anderen Herbiziden gilt Glyphosat als weniger umweltschädlich: Es ist biologisch relativ schnell abbaubar und für Mensch und Tier nicht giftig, weil diese den betroffenen Syntheseweg gar nicht besitzen.

Kommerzieller Groß Erfolg

Inzwischen gibt es eine Reihe von Nutzpflanzen mit einer gentechnisch vermittelten Toleranz gegenüber dem Wirkstoff Glyphosat, unter anderem Zuckerrüben, Raps, Soja, Baumwolle und Mais. Sie alle enthalten ein Gen aus dem oben erwähnten Bakterium *Agrobacterium tumefaciens*, das den Bauplan für eine leicht abgewandelte EPSP-Synthase bereitstellt. Dieses bakterielle Enzym ist gegenüber Glyphosat unempfindlich, kann aber im Stoffwechsel die Funktion des pflanzlichen Enzyms übernehmen, so dass die gentechnisch veränderten Pflanzen eine Behandlung mit Glyphosat ohne Schaden überstehen. Das System hat sich im Markt schnell durchgesetzt. Überhaupt haben herbizidtolerante Kulturpflanzen die Äcker rasch erobert, seit 1995 die ersten von ihnen auf den Markt kamen. Toleranz gegen Herbizide ist derzeit die mit Abstand häufigste Eigenschaft gentechnisch veränderter Pflanzen.

Auch die Qualität von Nahrungsmitteln und Futter versucht man mit Hilfe der Gentechnik zu verbessern. Dabei geht es sowohl um willkommene als auch um unerwünschte Stoffe. Zu den Substanzen, die Mensch und Tier stets in ausreichender Menge zu sich nehmen sollten, gehören beispielsweise Vitamine, Antioxidanzien oder essenzielle Fettsäuren. Um ihren Gehalt in Lebensmitteln und Futter zu optimieren, muss man sowohl ihre ernährungsphysiologische Bedeutung kennen als auch die Stoffwechselwege innerhalb der Pflanzenzellen, die zu ihrer Herstellung führen. Beeinflussen lassen sich die Prozesse dann auch durch konventionelle Züchtung, für die man mit Hilfe molekularbiologischer Verfahren nützliche Gene aufspürt, die dann gezielt in Kultursorten eingekreuzt werden.

Kommen die gewünschten Eigenschaften im Genpool der jeweiligen Pflanzen jedoch nicht vor, lässt sich der Stoffwechsel der Pflanzen durch Einschleusen fremder Gene verändern. »Metabolic engineering« nennt man dieses Vorgehen, das in erster Linie die Aktivität von Genen beeinflusst, die für die Synthese erwünschter oder für den Abbau schädlicher Substanzen verantwortlich sind (siehe Kasten links).

Bei anderen Projekten geht es darum, pflanzliche Inhaltsstoffe biologisch besser verfügbar zu machen oder Allergene

auszuschalten. In Anknüpfung an alte Traditionen versucht man zudem, Pflanzen wieder als Apotheke zu nutzen, indem man sie mit gentechnischen Verfahren dazu anregt, pharmazeutisch nutzbare Substanzen zu bilden. Und schließlich ist da noch das Stichwort »nachwachsende Rohstoffe«, das mit Blick auf steigende Energiepreise, endliche Ressourcen und den erwarteten Klimawandel laufend an Bedeutung gewinnt.

Das Vertrauen in die Fähigkeiten von Pflanzen scheint ebenso grenzenlos wie die Möglichkeiten, sie mit Hilfe der neuen Techniken nach den Vorstellungen und Bedürfnissen des Menschen zu optimieren. Doch die Erfahrungen aus rund 30 Jahren Gentechnik haben auch eine gewisse Ernüchterung mit sich gebracht. So schnell, wie man zunächst glaubte, lässt sich mit dieser Technik nicht jeder Wunsch erfüllen. Das gilt vor allem für komplex vererbte Eigenschaften. Die Genomforschung öffnet derzeit ein neues Kapitel der Züchtung, da nun gezielt nach vorteilhaften Genen gesucht werden kann. Gleichzeitig ermöglicht sie völlig neue Einsichten in den Aufbau und die Evolution von Pflanzengenomen. Und dabei ist es eigentlich wie immer in der Biologie: Je genauer man hinschaut, umso komplexer, aber auch faszinierender werden die Zusammenhänge – und umso größer wird das Staunen über die fein austarierten Mechanismen des Lebens. ~

DIE AUTOREN



Christian Jung ist Direktor des Lehrstuhls für Pflanzenzüchtung an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Am 11. April 2013 diskutiert er mit beim Forum Mensch-Natur-Technik zum Thema »Farbe der Hoffnung? Grüne Gentechnik

und ihre Versprechen«. **Caroline Möhring** hat Biologie und Landschaftsökologie studiert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Dresden.

QUELLEN

Cole, H.S.D. et al. (Hg.): Models of Doom: A Critique of the Limits to Growth. Universe Books, New York 1973

Edwards, P.N.: A Vast Machine. Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming. MIT Press, Cambridge 2010

Hall, C.A., Day, J.W.: Revisiting the Limits to Growth after Peak Oil. In: American Scientist 97, S. 230–237, 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178952

»Die Technologie wurde viel zu schnell von der Industrie angewendet«

Viele Menschen stehen gentechnisch veränderten Nutzpflanzen skeptisch gegenüber, vor allem in Europa. In der Wissenschaft prallen die Fronten hart aufeinander: So streiten die Experten noch immer, inwieweit die Risiken getestet werden müssen. Unabhängige Forschung ist in diesem Metier kaum mehr möglich, urteilt die Agrarökologin **Angelika Hilbeck** von der ETH Zürich.

Frau Hilbeck, ist der schlechte Ruf der Pflanzengentechnologie wirklich gerechtfertigt?

ANGELIKA HILBECK: Ja, das hat sie sich selbst zuzuschreiben. Die Technologie wurde viel zu schnell von der Industrie angewendet, noch bevor wir begriffen haben, wie die Genetik und Gentechnik überhaupt wirklich funktionieren. Die Anwendungen bauen auf Annahmen auf, die sich längst als falsch herausgestellt haben. Und die erforderlichen Korrekturen finden nicht statt. In jeder anderen Technologiebranche wäre das so nicht möglich: Stellen Sie sich vor, ein Flugzeugbauer würde sich weigern, neueste Erkenntnisse aus der Materialforschung anzuwenden.

Warum geschieht das dann in der Gentechnologie?

HILBECK: In der Industrie herrschte die Einstellung vor, die Besorgnis unter den Verbrauchern würde schon vorbeigehen, sobald die gentechnisch veränderten Produkte einmal auf dem Markt wären und man sehen würde, dass nichts Nachweisbares passiert. Doch das Gegenteil ist der Fall: Inzwischen sind 20 Jahre vergangen, und die Debatte ist nicht weniger kontrovers geworden.

Welches sind denn die veralteten Annahmen der Gentechnik?

HILBECK: Sie baut noch auf dem alten, zentralen Dogma auf: Ein Gen kodiert für ein Protein und verhält sich in jedem Organismus exakt so wie im Ausgangsorganismus. Inzwischen wissen wir, dass das nicht so einfach funktioniert. Unter anderem spielen beispielsweise epigenetische Faktoren eine bisher stark unterschätzte Rolle. Gene aus einem Spenderorganismus können, müssen aber nicht dasselbe im Empfängerorganismus tun. Sie können zusätzlich zum Zieleffekt auch noch jede Menge unerwünschter Auswirkungen haben, die aber im Vergleich zum Zieleffekt nur rudimentär oder gar nicht untersucht werden.

Welche gentechnisch veränderten Pflanzen haben es bisher auf den Markt geschafft?

HILBECK: Zwei Eigenschaften dominieren den Markt bei Weitem. Im einen Fall handelt es sich um Pflanzen, die gegenüber Totalherbiziden, vor allem dem Unkrautvernichtungsmittel Glyphosat, resistent sind, im anderen um solche, die ein so genanntes Bt-Toxin produzieren und daher gegenüber bestimmten Schädlingen unempfindlicher sind, etwa Mais.

Was ist aus den anderen Zielen der Gentechnik geworden? Eine Vision war doch, mit ihrer Hilfe Nahrungsmittel aufzuwerten, etwa der mit Provitamin A angereicherte »goldene Reis«. Diese Idee an sich klingt ja nicht schlecht.

HILBECK: Richtig. Nur ist die Frage, ob man das alles auch wirklich zu Ende gedacht hat. Und ob das Geld bestmöglich investiert ist, um das Ziel zu erreichen, also unter- und fehlernährte Kinder in den Entwicklungsländern vor Blindheit und Tod in Folge von Vitamin-A-Mangel zu bewahren. Der derzeitige Lösungsansatz wird der Komplexität des Themas aber in keiner Weise gerecht. Die Herstellung einer transgenen Vitamin-A-Reispflanze ist dabei noch der einfache Teil der Aufgabe. Da sind Millionen geflossen, bevor man ernsthaft geprüft hat, ob das Projekt überhaupt umsetzbar ist. Und bis heute ist der goldene Reis ja nicht marktreif.

Fehlte es hier also an den notwendigen sachlich-neutralen Analysen?

HILBECK: Eine sachliche Analyse der Gentechnologie und ihrer Produkte ist kaum mehr möglich, da sich die beiden unterschiedlichen Sichtweisen bereits im Grundsätzlichsten nicht einig sind. Es geht schon damit los, dass Forscher, die der Anwendung nahestehen, die Gentechnik – also den Prozess, DNA-Sequenzen in einen Empfängerorganismus zu integrieren – mit konventioneller Pflanzenzüchtung gleichsetzen. Ich halte das für falsch, weil man mit der bisherigen,



Angelika Hilbeck ist Agrar-entomologin und -ökologin. Unter anderem auf Grund ihrer Studien über die langfristigen Auswirkungen von Bt-Toxinen auf Nützlinge verbot Bundeslandwirtschaftsministerin Ilse Aigner 2009 den Anbau der transgenen Maissorte MON810.

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: OLIVER BARTENSCHLAGER

transgenen Gentechnik etwas substanzvoll Neues macht. Man stattet einen Organismus mit Eigenschaften aus, für die er vorher kein Allel hatte, die es also in dieser Spezies überhaupt nicht gab. Erst jetzt fangen einige Forscher allmählich damit an, so genannte Cisgentechnik zu betreiben, die sich auf das Einpflanzen arteigener Gene beschränkt. Das hätte man gleich so machen müssen, aber dieser Weg hätte der Industrie zu lange gedauert. Die wollte möglichst schnell viel Geld verdienen.

Sie selbst forschen über die Risiken, die mit der Anwendung von Bt-Pestiziden verbunden sind und die von gentechnisch veränderten Pflanzen ausgehen könnten, die diese Stoffe dank eines eingeschleusten Bakteriengens selbst produzieren. Können Sie uns darüber mehr erzählen?

HILBECK: Ich erforsche die Nebenwirkungen, die Insektengifte auf Nützlinge haben. Mit Bt-Toxinen habe ich mich bereits im Rahmen meiner Doktorarbeit beschäftigt. Sie gehören zu den wenigen Pestiziden, die bis heute im Biolandbau zugelassen sind. Man ging davon aus, sie wären sicher, da wir sie hinreichend aus dieser Anwendung kannten. Dem traute ich nicht, mich haben die unterschiedlichen Expositionen interessiert: Wie liegt das Protein im Spritzmittel vor und wie in der Pflanze, die es produziert? Wenn wir allein auf Grund der Erfahrungen mit versprühten Bt-Pestiziden Aussagen zur Toxizität treffen, gelten die dann auch noch für gentechnisch veränderte Pflanzen? Oder tritt das Gift in anderer biochemischer Form auf, so dass die Pflanze am Ende möglicherweise gefährlicher für Nützlinge ist als das Spritzmittel?

Und was stellten Sie fest?

HILBECK: Es gibt da jede Menge Unterschiede. Das fängt schon damit an, dass das Gift im Spritzmittel in inaktiver Form vorliegt, als Protoxin oder Kristall, in der Pflanze aber als aktives Toxin. Darüber hinaus findet man es in allen

Pflanzenteilen, und zwar von der Keimung bis zur Ernte, also viel länger als die entsprechenden Bt-Pestizide. Ich habe darum Versuche gemacht, in denen ich Nützlinge dem Gift chronisch ausgesetzt habe. Langfristig, also über eine gesamte Generation, zeigten sich durchaus schädliche Auswirkungen auf Marienkäfer und Flurfliegen.

Wie sieht es mit der anderen Klasse kommerziell eingesetzter transgener Pflanzen aus, den herbizidresistenten?

HILBECK: Das Herbizid Glyphosat wird wahrscheinlich bald unbrauchbar sein, weil viele Unkräuter bereits Resistenzen entwickeln. Dass es dazu kommt, war abzusehen, weil man einen sehr starken Selektionsdruck auf ein Merkmal ausübt – den Zusammenhang lernt man schon in Grundlagenvorlesungen der Biologie. Und da das Gift von der gentechnisch veränderten Pflanze aufgenommen und in die Ernteprodukte verlagert wird, steigen auch die Rückstandsbelastungen in den Futter- und Nahrungsmitteln.

Eine im September 2012 veröffentlichte Fütterungsstudie mit Genmais hat auf Risiken der Anwendung von Glyphosat aufmerksam gemacht (Séralini, G.E. et al.; siehe Quelle am Ende des Interviews).

HILBECK: Die Studie zeigt – wie viele andere seit zehn Jahren übrigens auch –, dass Glyphosat selbst in geringen Dosen, chronisch über längere Zeiträume angewendet, toxisch ist.

Die Studie ist aber stark in die Kritik gekommen. Zum Beispiel wurde ihr der methodische Fehler vorgeworfen, die Versuchsgruppen seien zu klein gewesen.

HILBECK: Jeder ist in die Kritik gekommen, der Ergebnisse geliefert hat, die den interessierten Industrieunternehmen nicht genehm waren. Die methodischen Fehler, die Herrn Séralini vorgeworfen werden, sind aber der ganz normale Standard in den wenigen Fütterungsstudien, die die Hersteller dieser Pflanzen vorlegen. Die Versuchsgruppen waren

beispielsweise in den Experimenten des Konzerns auch nicht größer. Und sie verwenden den gleichen Rattenstamm.

Sie meinen also, die Studie von Herrn Séralini ist methodisch so solide, dass man das Ergebnis ernst nehmen muss?

HILBECK: Die Studie ist methodisch so solide wie jede andere Studie, welche die Entwickler bisher vorgelegt haben und auf die eine Zulassung gegeben wurde. Und das ist der Grund, warum man nun mit großem Kaliber auf Professor Séralini schießt und versucht, ihn zu diskreditieren. Denn wenn seine Studie akzeptiert wird, dann steht die herbizidtolerante Technologie mit Glyphosat auf dem Spiel, genau genommen die Zulassung des Herbizids für diese Anwendung.

Das heißt, Séralini hat letztendlich die Bedingungen des Herstellerkonzerns übernommen und ist zu einem anderen Ergebnis gekommen.

HILBECK: Richtig, weil er den zeitlichen Rahmen der Studie verlängert hat. Monsanto hat einfach rechtzeitig aufgehört, bevor etwas zu sehen war. Und weil es eben keine verbindlichen Regeln gibt, wie gentechnisch veränderte Nahrungsmittel zu testen sind, hat das Unternehmen sein Fütterungsstudienprotokoll nach Belieben gewählt. Die ersten Studien dauerten nur wenige Wochen. Als es daraufhin hieß, das sei angesichts der Lebensdauer von Mensch und Tier viel zu kurz, wurde für den europäischen Zulassungsprozess eine Studie mit Ratten durchgeführt, die 90 Tage dauerte. Das haben die Behörden dann auch schon akzeptiert.

Warum? Europäische Behörden sind nicht für ihre Nachsicht bekannt.

HILBECK: Auf diesem Gebiet waren sie schon immer sehr nachsichtig, dafür stehen sie seit Jahr und Tag in der Kritik. Es gibt derzeit eine sehr lebhaft diskutierte Diskussion über die Unabhängigkeit insbesondere der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit ESFA. Das hat dazu geführt, dass das EU-Par-

lament 2012 entschieden hat, ihr die Entlastung für den Haushalt 2010 zu verweigern. Und zwar spezifisch wegen ihrer Interessenkonflikte mit der Industrie. Deshalb steht die EFSA nun unter Druck, neue Regelungen zu entwickeln – 16 Jahre, nachdem diese Gentech-Pflanzen auf den Markt kamen!

Was aber ist mit so genannten Risikobewertungsverfahren? Regularien, die dafür sorgen sollen, dass gentechnisch veränderte Organismen auf ihre Sicherheit geprüft werden, bevor sie auf den Markt kommen?

HILBECK: Sie sind sehr reduktionistisch. Firmen haben zum Beispiel die Resistenzentwicklung bei herbizidresistenten Pflanzen aus den Verfahren ausgeklammert – und deshalb nicht als Risiko verbucht. Sie testen Risiken experimentell sehr minimalistisch: Nur das neuartige Protein, für das das eingepflanzte Transgen kodiert, wird in kurzfristigen Anfangstoxizitätsstudien analog zu Chemikalien getestet – also isoliert vom Pflanzenkontext. Wenn dabei keine Gefahren entdeckt werden, wird die gesamte Pflanze für sicher erklärt. Auch die Rückstandsbelastung der Futter- und Nahrungsmittel findet keine Beachtung – mit der Begründung, das hätte nichts mit der gentechnisch veränderten Pflanze zu tun, sondern wäre ein reines Pestizidproblem. Aber schon im ersten Jahr der Anbauperiode überschritten gentechnisch veränderte Sojabohnen und Mais die bis dahin geltenden Grenzwerte beispielsweise für Glyphosatrückstände.

Wie wurde reagiert?

HILBECK: Als klar wurde, dass diese Produkte eigentlich so nicht marktfähig sind und entsorgt werden müssten, wurden schlicht die Grenzwerte angehoben. Glyphosat war nie für den Zweck getestet worden, für den es am Ende eingesetzt wurde – nämlich für eine Anwendung auf Nutzpflanzen während des Wachstums, deren Ernteprodukte dann in die Nahrungs- und Futtermittelkette kommen. Langzeitstudien

»Den traditionellen Geldgebern wird die Förderung von hinterfragenden Studien unmöglich gemacht«





»Die methodischen Fehler, die Herrn Séralini vorgeworfen werden, sind der **Standard in den Fütterungsstudien**, die Monsanto vorgelegt hat«

werden für das Zulassungsverfahren im Zusammenhang mit Gentech-Pflanzen aber wie gesagt nicht für notwendig erachtet, weil man die Mittel ja schon im Pestizidzulassungsverfahren vor vielen Jahren getestet hatte.

Ist es schwierig, Geld für hinterfragende Studien zu bekommen?

HILBECK: Allerdings.

Aber eine unabhängige Institution wie eine Universität müsste doch darin eigentlich ein Profilierungspotenzial sehen, könnte Schlagzeilen machen ...

Hilbeck: (lacht) ... genau das befürchten die Geldgeber.

Sind da mittlerweile die Verflechtungen zu stark?

HILBECK: Selbstverständlich, das ist in den meisten anwendungsorientierten Bereichen so, hinter denen eine mächtige, profitträchtige Industrie steht. Von dort fließen die Gelder – wie wollen Sie da noch unabhängig forschen? In den Universitäten wurde vielfach eine Kultur geschaffen, in der man gar nicht mehr auf die Idee kommt, bestimmte Fragen zu stellen, weil ja gemeinsam mit der Industrie an der Entwicklung von Technologien und Produkten gearbeitet wird. Diese Forscher können keine unabhängige Beobachterposition einnehmen, um einen kritischen Blick auf die eigene Sache zu werfen. Eine kritische Aussicht oder hinterfragende Forschungsergebnisse werden dann in der Regel von den entsprechenden Forschungsgruppen durch Diskreditierungskampagnen unglaubwürdig gemacht, so dass es für konventionelle Mainstream-Fördereinrichtungen wie die Europäische Wissenschaftsstiftung oder die DFG schwierig ist, in diese Art Forschung noch Geld zu investieren. In den allermeisten Fällen wurde nach Veröffentlichung von kritischen Studien nicht mehr unabhängig vom Entwickler weiter in diese Richtung geforscht. Sicherheitsforschung ist nur mit dem Segen, der Erlaubnis beziehungsweise dem Geld der Entwickler möglich – und zwar dann mit dem Ziel, die kritischen Forschungen zu widerlegen.

Mit Verlaub – klingt das nicht nach Verschwörungstheorie?

HILBECK: Das sind keine Theorien, sondern belegbare Tatsachen, denen man in die Augen sehen muss. Man weigert sich einfach noch zu akzeptieren, dass auch bei uns eine Kultur der Industrieverflechtung herrscht und dass industrienähe Forschung auch Nachteile mit sich bringt. Denn damit steht ja das Selbstverständnis vieler Forschungsinstitutionen und -programme auf dem Spiel. Während jeder weiß, dass die

amerikanische, technisch-wissenschaftliche Forschung stark von der Industrie gelenkt wird, sehen alle darüber hinweg, dass hier nun genau die Anfänge vorliegen, welche die amerikanische Forschung vor 20 Jahren dorthin geführt haben, wo sie jetzt steht. Und das ist je länger, je weniger zum Vorteil der Gesellschaft und schon gar nicht der Umwelt.

Können Sie gentechnisch veränderten Pflanzen denn auch irgendetwas Gutes abgewinnen?

HILBECK: Im Moment nicht. Aber es spielen ja auch nur zwei Varianten wirklich eine Rolle.

Grundsätzlich abgeneigt sind Sie der Gentechnik aber nicht?

HILBECK: Die Technik ist mir egal, ich habe kein quasi-religiöses oder sonst irgendwie bekenndes Verhältnis zu irgendeiner Technologie. Mir geht es darum, dass wir Probleme lösen, mit maximiertem Nutzen für alle bei minimiertem Risiko. Meine Einwände betreffen die naturwissenschaftliche und agrarökologische Ebene. Man sollte dem Verbraucher die ganze Wahrheit erzählen und dann gemeinsam klären: Welchen Sicherheitsgrad wollen wir, und wie wollen wir die Risikoverteilung in der Gesellschaft gestalten? Zurzeit werden Risiken gerne auf die Gemeinschaft, hier den Konsumenten, ausgelagert und die Profite zentralisiert. Das ist immer weniger gesellschaftlich akzeptabel. Solange diese Geisteshaltung in den Unternehmen vorherrscht und häufig von der Politik unterstützt wird, wird diese Debatte uns begleiten. ~

Die Fragen stellten »Spektrum«-Redakteur **Hartwig Hanser** und die freie Wissenschaftsjournalistin **Katharina Schulz**.

QUELLEN

Séralini, G.E. et al.: Long Term Toxicity of a Roundup Herbicide and a Roundup-Tolerant Genetically Modified Maize. In: Food and Chemical Toxicology 50, 11/2012, S. 4221–4231
A Seedy Practice. In: Scientific American 8/2009, S. 28

WEBLINK

www.enveurope.com/content/24/1/10

Veröffentlichung von Angelika Hilbeck vom Februar 2012. In ihr vergleicht sie die Methoden einer Studie, die zum Anbauverbot von Bt-Mais in Deutschland führte, weil dieser dem Marienkäfer schaden könnte, mit denen einer zweiten Studie, die einen solchen Effekt nicht feststellen konnte.

Organismen aus dem Baukasten



Zellen planmäßig zu konstruieren – das ist das große Ziel der synthetischen Biologie. Forscher wollen damit die biotechnologische Produktion von Medikamenten und Chemikalien revolutionieren und neue Werkzeuge für die Diagnostik schaffen. Der Weg von der Theorie zur Praxis ist allerdings weit.

Von Sven Panke

» **E**rster künstlicher Organismus erschaffen!« So oder ähnlich lauteten die Schlagzeilen, als John Craig Venter 2010 mit einer neuen Erfolgsmeldung aus seinem Genlabor für Aufruhr sorgte. Dem Team um den US-amerikanischen Biochemiker und den Mikrobiologen und Nobelpreisträger Hamilton Smith war es bereits 2008 gelungen, das Erbgut eines *Mycoplasma*-Bakteriums vollständig im Labor zusammenzubauen. Die Forscher hatten die Mikrobe ausgewählt, weil sie über das kleinste bekannte Genom eines unabhängig lebensfähigen Organismus verfügt. Nun überraschten sie mit einem erneuten Coup: Sie schleusten das künstliche Genom in eine *Mycoplasma*-Zelle ein und ersetzten damit deren ursprüngliches Erbgut. Auf diese Weise konstruierten die Wissenschaftler das erste Bakterium, dessen Erbinformation durch und durch chemisch synthetisiert worden war.

Das Ergebnis der Forscher gilt als Meilenstein für die synthetische Biologie, jene Forschungsdisziplin, die es sich zur Aufgabe gemacht hat, maßgeschneiderte biologische Systeme zu erzeugen – sozusagen Leben aus dem molekularbiologischen Baukasten. Denn anders als die biologische DNA-Synthese, wie sie permanent in lebenden Zellen abläuft, be-

nötigt die chemische Prozedur keine Vorlage, von der die Erbinformation abgeschrieben wird. Vielmehr lassen sich die Buchstaben der DNA im Labor frei kombinieren und zu neuen Inhalten zusammensetzen. Anders gesagt: Während sich bei der natürlichen Vervielfältigung des Erbguts Veränderungen in der Regel nur peu à peu und über Fehler beim Abschreiben einschleichen, lassen sich die vier unterschiedlichen DNA-Basen im Labor wie bunte Legosteine aus einer Spielzeugkiste immer wieder neu zusammensetzen – zumindest theoretisch.

Hintergrund dieser Bemühungen ist nicht etwa Schöpfungswahn, sondern die Hoffnung, maßgeschneiderte Mikroorganismen zu schaffen, die als biotechnologische Helfer Giftstoffe abbauen und Gewässer reinigen oder als zelluläre Fabriken Chemikalien und Arzneimittel produzieren. Doch noch ist vieles an dieser Vorstellung sehr futuristisch. Und auch bei Craig Venters Erfolgsmeldung konnte mitnichten von einem Bakterium mit frei zusammengefühltem Genom die Rede sein.

Der Unterschied zwischen den Sequenzen der zwei ausgetauschten Genome in diesem Experiment war gering – und es handelte sich auch nicht um einen von Grund auf neu geschriebenen DNA-Text. Vielmehr hatten die Forscher das Erbgut von *Mycoplasma mycoides* hergestellt und auf einen nahen Verwandten namens *Mycoplasma capricolum* übertragen. Völlig neu geschaffen war die Mikrobe also keineswegs. Und das neue Genom verwandelte die fragile *Mycoplasma*-Zelle auch nicht in eine Medikamente ausspuckende biochemische Synthesemaschine.

Tatsächlich sind wir derzeit noch weit davon entfernt, einfach in den bunten Baukasten des Lebens zu greifen und im Labor neue Organismen mit nie da gewesenen Merkmalen zu kreieren. Denn noch klafft eine große Lücke zwischen der technologischen Fähigkeit, Gene künstlich zu synthetisieren, und dem Wunschtraum, komplexe biologische Eigenschaften zu erzeugen. Der limitierende Faktor ist hierbei weniger

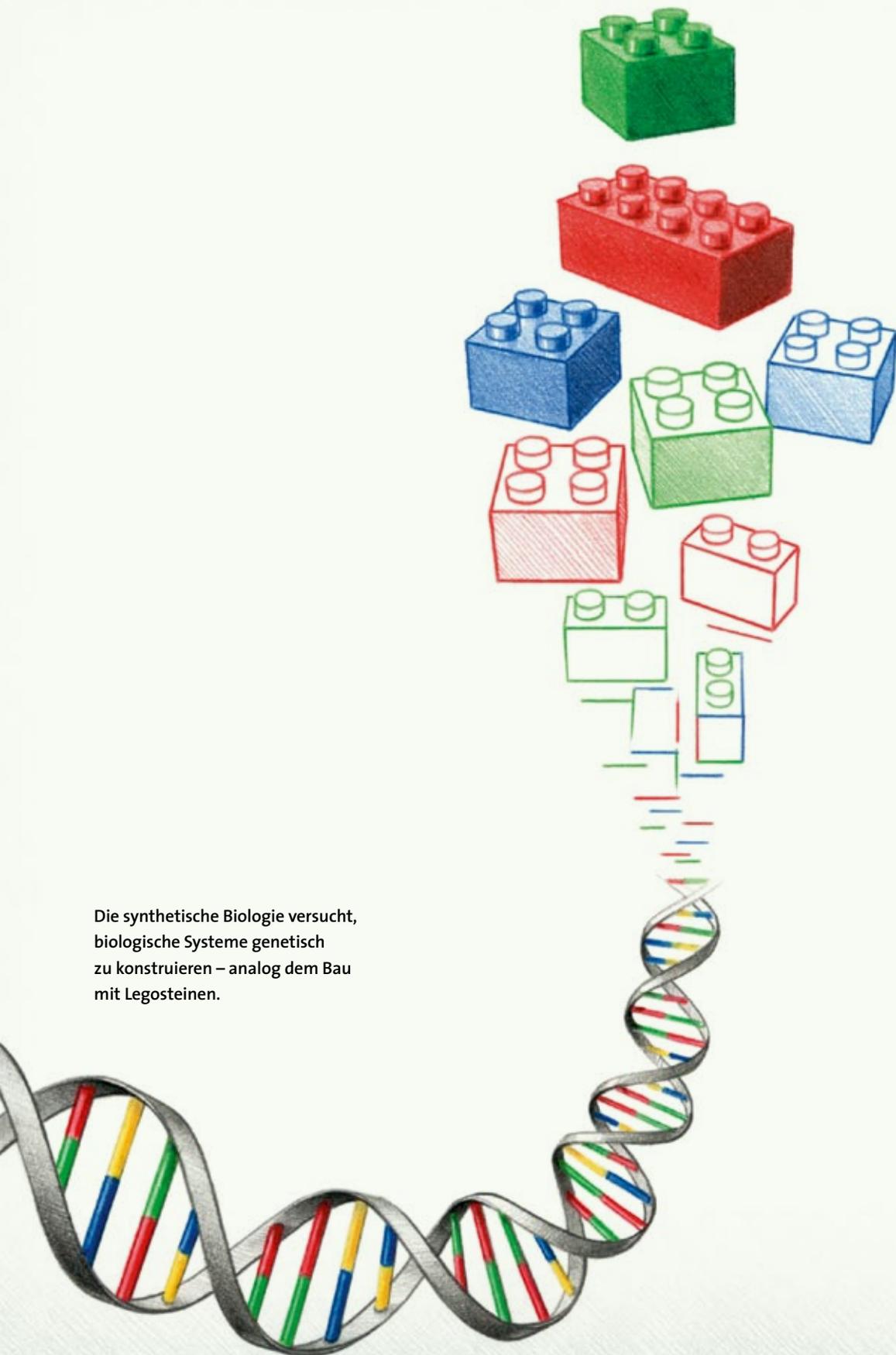
AUF EINEN BLICK

MASSGESCHNEIDERTES LEBEN

1 Als logische **Weiterentwicklung der Biotechnologie** zielt die synthetische Biologie darauf ab, quasi vom Reißbrett Mikroorganismen herzustellen, die exakt definierte Funktionen erfüllen.

2 Während Forscher heute bereits problemlos **Gene und ganze Genome produzieren können**, stellt das Erreichen der erwünschten Funktionen noch Zukunftsmusik dar.

3 Mit den drei Ansätzen **Standardisierung, Modularität und Vereinfachung** soll sich die synthetische Biologie zu einer zuverlässigen biologischen Ingenieurwissenschaft entwickeln.



Die synthetische Biologie versucht, biologische Systeme genetisch zu konstruieren – analog dem Bau mit Legosteinen.

die eigentliche Gensynthese. Auf diesem Feld haben Forscher in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt, die das Zusammenfügen eines Genoms immer exakter und gleichzeitig kostengünstiger machen (siehe Kasten unten).

Das Problem: Biologische Systeme sind hochgradig komplex. Ihre Eigenschaften werden von weit mehr bestimmt als von der Summe ihrer Einzelteile. Es genügt also nicht, den Gentext neu zusammenzustellen und einem Bakterium die Erbinformation für ein Enzym einzuschleusen. Denn damit dieses funktionieren kann und beispielsweise einen Stoffwechselweg ankurbelt, von dem man sich die Herstellung einer bestimmten Chemikalie verspricht, muss es im Gesamt-

system der Zelle einen geeigneten Platz einnehmen. Es muss mit anderen Enzymen und den Schaltstellen von Stoffwechselwegen derart interagieren, dass es den ihm zugedachten Aufgaben überhaupt nachkommen kann.

Und genau hier liegt der Knackpunkt. Derzeit ist es noch nicht möglich, genau vorherzusagen, wie eine Zelle auf ein neues Gen reagiert. Das gilt selbst für Standardprozeduren, wie sie tagtäglich in jedem molekularbiologischen Labor stattfinden, etwa wenn Forscher Bakterienzellen mit erwünschten Eigenschaften für ihre Experimente herstellen. Erhält beispielsweise eine Zelle ein einzelnes fremdes Gen auf einem so genannten Plasmid, einem ringförmigen DNA-Element, so kann man davon ausgehen, dass sie die neue Eigenschaft übernimmt. In welchem Maß sich diese aber ausprägt, lässt sich im Vorfeld nur schwer abschätzen.

Damit nicht genug. Der neue Erbfaktor beeinflusst auch Hunderte anderer Gene und Proteine, so dass sich das gesamte System der Zelle verändert. Wer durch das Einschleusen einer neuen Erbinformation vermeintlich an einer einzelnen Stellschraube im System dreht, mag damit unvorhergesehene Effekte in völlig anderen Bereichen auslösen. Und am Ende »tickt« die Zelle nicht so, wie der Forscher hoffte. Diese Effekte kann man manchmal ignorieren, wenn das neu eingeführte Gen ohnehin nur eine geringfügige Veränderung bewirken soll. Aber was ist, wenn man gleich eine ganze Reihe neuer Gene einschleusen möchte, um einen komplett neuen Stoffwechselweg zu konstruieren, etwa für die gezielte Produktion einer bestimmten Chemikalie?

Gensynthese im Labor

Die entscheidende technologische Antriebskraft hinter der synthetischen Biologie ist die Gensynthese. Schon seit Langem ist es möglich, kurze DNA-Schnipsel, so genannte Oligonukleotide, herzustellen, die nur aus wenigen aneinandergereihten Basenpaaren bestehen. Im Verlauf der letzten 15 Jahre gelang es, diese kurzen Stückchen zunächst zu immer größeren Abschnitten, dann zu ganzen Genen und schließlich zu kompletten Genomen zusammenzufügen. Konnten sich das wegen der damit verbundenen Kosten anfangs fast nur die großen Pharmafirmen leisten, so passen die Preise für Gensynthesen, mit rund 50 Cent pro Basenpaar oder durchschnittlich 500 Euro pro Gen, heute in das Budget eines jeden gut ausgestatteten Biotechnologielabors.

Allerdings sind wir momentan noch weit davon entfernt, am Computer eine Sequenz zu entwerfen, die genau das leistet, was wir uns von ihr erhoffen. Die traditionelle Lösung für dieses Problem lautet, eine große Zahl an DNA-Varianten zu entwerfen, von denen wir annehmen, dass eine von ihnen unserer Zielvorstellung nahe kommt. Man produziert also oft nicht nur ein DNA-Segment, sondern viele tausend. Bei diesem Aufwand steigen die Kosten erheblich.

Das mag sich in absehbarer Zukunft ändern. So ist es Forschern im Labor von George Church an der Harvard University 2010 gelungen, Gensynthese und Analyse methodisch zu vereinen. Sie synthetisieren dazu eine große Anzahl verschiedener Oligonukleotide auf so genannten DNA-Chips – wenn auch mit hoher Fehlerrate. Überführt man nun diese Chips mit den fehlerbehafteten, aber billigen Oligonukleotiden auf eine moderne Sequenzierplattform und analysiert dort die DNA-Schnipsel, so kann man anschließend mit den korrekten Exemplaren weiterarbeiten. Aufwändige spätere Kontrollen entfallen damit. Sollte dieses Verfahren in den nächsten Jahren zur großtechnischen Anwendung kommen, sinkt der mit Gensynthese verbundene Aufwand um mindestens eine Größenordnung. Dann würde das gängige Jahresbudget eines Forschers problemlos die Synthese von zwei kleinen bakteriellen Genomen erlauben.

Drei Elemente braucht ein Gen

Dazu kommt, dass wir weit davon entfernt sind, die Funktion eines jeden einzelnen Gens – und seiner Varianten – in einer Zelle zu kennen. Das gilt selbst für einen so beliebten Modellorganismus wie das Bakterium *Escherichia coli*. Und schließlich sind auch die DNA-Konstruktionen, die wir in die Zelle einschleusen, bislang schlecht verstanden. Zwar wissen wir, dass in Bakterien prinzipiell drei Elemente vonnöten sind, damit aus einem Gen das zugehörige Protein entsteht:

1. das Gen selbst;
2. eine Promotor genannte Sequenz auf der DNA, die quasi den Startschuss dafür gibt, dass der folgende DNA-Abschnitt überhaupt abgelesen und in so genannte Messenger-RNA (mRNA) umgeschrieben wird;
3. eine Andockstelle vor dem eigentlichen Gen, die den Ribosomen, den Proteinproduktionsfabriken der Zelle, sagt, wo das Gen genau beginnt.

Doch es wird immer deutlicher, dass sich diese Funktionseinheiten nicht beliebig austauschen und zusammenwürfeln lassen. Eine Ribosomenbindungsstelle, die mit einem Gen gut funktioniert, kann bei einem anderen versagen. Denn auch die Umgebung – ein anderes Gen, ein anderer Promotor – beeinflusst ihre Funktion. Es ist also nicht möglich, einfach eine Ribosomenbindungsstelle von einem Gen zum nächsten zu verschieben und dann davon auszugehen, dass sie dort denselben Effekt hat. Die einzelnen Komponenten



»Wie wird aus der synthetischen Biologie eine zuverlässige Ingenieurwissenschaft? Durch Standardisierung, Modularität und Vereinfachung«

eines DNA-Konstrukts müssen daher gut aufeinander abgestimmt sein. Was diese Abhängigkeit vom jeweiligen Kontext bedeutet, mag ein Beispiel aus einem gänzlich anderen Arbeitsfeld veranschaulichen: Ein moderner Computer birgt in seinem zentralen Prozessor mehr als vier Milliarden Transistoren – standardisierte Bauteile mit charakteristischen Eigenschaften, die gezielt miteinander verknüpft werden. Wenn jeder dieser Transistoren beim Einbau eine zufällig zugewiesene Leistungsveränderung erführe, wäre das Chaos perfekt.

Wie lässt sich nun die synthetische Biologie in eine zuverlässige biologische Ingenieurwissenschaft verwandeln – vergleichbar etwa dem Vorgehen bei der Konstruktion eines Computers? Wie erreichen Forscher, dass sie gewünschte biologische Eigenschaften entwerfen und in DNA übersetzen, diese in Zellen einbringen, um dann zuverlässig genau das zu erhalten, was sie sich am Anfang überlegt haben? Ein viel versprechender Ansatz dazu stammt aus den klassischen Ingenieurwissenschaften. Er lautet: Standardisierung, Modularität und Vereinfachung.

Standardisierung bedeutet, Bauelemente mit verlässlichen Eigenschaften zu schaffen. Ziel muss sein, dass ein Forscher künftig in seine molekularbiologische Werkzeugkiste greift und daraus gut charakterisierte Bausteine entnehmen kann, die er dank zuverlässiger Methoden mit gleich bleibenden Ergebnissen verknüpft. Das Resultat wären standardisierte Module, die sich im Idealfall für die Konstruktion neu-

er, synthetischer Organismen problemlos verknüpfen und immer wieder neu kombinieren lassen.

Ein einfaches Beispiel: Alle genetischen Bauteile sollten zueinander passende Verknüpfungsstellen aufweisen – vergleichbar mit Legosteinen, bei denen man sich immer darauf verlassen kann, dass die Verbindungsrippen in den nächsten Baustein passen. Dies ist die Grundidee des »Registry of Standard Biological Parts«, einer ständig wachsenden Sammlung standardisierter genetischer Bauteile, die jedes Jahr die Grundlage für den Studentenwettbewerb »iGEM« (»International Genetically Engineered Machine competition«, www.igem.org) stellt, in dem nahezu 200 Studententeams weltweit biologische Konstruktionsprojekte durchführen.

RNA-Scheren und andere Werkzeuge

Doch der größte Gewinn wäre, durch Standardisierung die Kontextabhängigkeit eines Bauteils aufzuheben. In diesem Bereich arbeiten Wissenschaftler derzeit mit Elan und entwickeln bereits viel versprechende Ansätze. Eine Möglichkeit besteht beispielsweise darin, einen Teil der Umgebung zu entfernen, bevor er seine störende Wirkung entfalten kann. Das gelingt etwa molekularbiologisch mit RNA-Scheren, so genannten Ribozymen, wie die Forschergruppe um Chris Voigt am Massachusetts Institute of Technology 2012 bewies. Das Gen wird dabei zunächst ganz regulär in mRNA umgeschrieben. Im Normalfall würde diese dann beginnen, sich zu

Vereinfachen durch Auslagern: In-vitro-Systeme

Ein radikaler Weg zum Vereinfachen biologischer Systeme ist die Arbeit mit In-vitro-Systemen. Statt eine ganze Zelle am Leben zu erhalten, transferiert man ihren Inhalt einfach ins Reagenzglas. Auf diese Weise lassen sich viele Synthesefunktionen der Zelle nutzen – ohne befürchten zu müssen, dass toxische Ausgangsstoffe oder Produkte Schaden anrichten. Und es erlaubt, mit Substanzen zu arbeiten, die sich nicht durch die Zellmembran transportieren lassen und somit in intakten Zellen nicht zum Einsatz kommen können.

Allerdings sind solche Multienzymsysteme auch noch in vitro hochkomplex und lassen sich nur schwer analysieren und optimieren. Unserer Arbeitsgruppe ist hier 2011 ein entscheidender Durchbruch gelungen. Der Schlüssel dazu war die Beschleunigung der Analyse: Traditionell werden die vielen Moleküle – Ausgangsstoff, Zwischenverbindungen, Produkt – zunächst sehr zeitintensiv chromatografisch aufgetrennt und

anschließend, meist per Massenspektrometrie, identifiziert und quantifiziert. Um die Analysezeit auf ein Minimum zu reduzieren, haben wir uns entschlossen, die Chromatografie wegzulassen und das Reaktionsmedium direkt in das Massenspektrometer zu leiten. In langwierigen Versuchsreihen entwickelten wir so ein »Echtzeitmassenspektrometer«, mit dem wir kontinuierlich Reaktionsprozesse beobachten können. Außerdem erlaubt es uns, Reaktionssysteme gezielt zu stören, die Veränderungen sozusagen live zu beobachten und wichtige Schritte zu identifizieren.

Ziel ist letztlich, aus den Analysedaten ein mathematisches Modell herzuleiten, das Voraussagen über die Reaktionen im System erlaubt. Mit diesem Wissen lassen sich dann später gezielt Reaktionssysteme zur Synthese gewünschter Produkte zusammensetzen – ohne dass man mit unliebsamen Überraschungen rechnen muss.

falten und damit die so genannte Sekundärstruktur zu bilden. Wie die aussieht, hängt stark davon ab, welche Sequenzen aufeinandertreffen. Es ist daher schwer vorherzusagen, wie das Element am Ende funktioniert. In Voigts Experimenten agiert ein Teil der mRNA als RNA-Schere – als Katalysator, der RNA schneidet. So kann sich die RNA selbst vor der Ribosomenbindungsstelle abschneiden, und störende Interaktionen beim Faltprozess finden ganz einfach nicht statt.

Die wirkliche Macht solcher Verfahren wird natürlich erst sichtbar, wenn sie für die industrielle Synthese von Biosystemen in großem Maßstab angewandt werden. Solche Initiativen sind aber noch selten. Eine prominente Ausnahme ist das Unternehmen BioFAB in Emeryville, Kalifornien, unter der Leitung von Drew Endy von der Stanford University und Adam Arkin von der University of California in Berkeley.

Liebling, ich habe das Genom geschrumpft!

Doch auch die Standardisierung und die Herstellung von kombinierbaren Bauelementen umschiffen noch nicht das Problem der enormen Komplexität biologischer Systeme. Eine direkte Methode, Systeme zu vereinfachen, besteht darin, sie zu verkleinern. Zwar bleiben sie auch dann komplex. Doch verringern sich zumindest die Möglichkeiten für unerwartete Interaktionen. Konkret tüfteln Wissenschaftler an verkleinerten Genomen. Sie entfernen aus einem Bakterienstamm Gen für Gen oder Genomsegment für Genomsegment. Dann untersuchen sie, welche Konsequenzen sich für den Stamm ergeben, indem sie etwa wichtige Wachstums- oder Stoffwechseleigenschaften prüfen.

So gelang es der Forschergruppe um Fred Blattner von der University of Wisconsin und György Pósfai von der ungarischen Akademie der Wissenschaften bereits 2006, das Genom des beliebten Laborbakteriums *Escherichia coli* um 15 Prozent zu verkleinern. Dabei verzichteten sie insbesondere auf solche DNA-Abschnitte, von denen bekannt ist, dass sie ungeplante Veränderungen des Genoms verursachen können, darunter so genannte Transposonen, also mobile DNA-Elemente. Die genetische Schlankeitskur brachte eine

Reihe positiver Effekte mit sich, allen voran einen Gewinn an genetischer Stabilität. Andere Eigenschaften, die für den Einsatz des Bakteriums als biotechnologischer Modellorganismus wichtig sind, wie seine Eignung, organische Stoffe umzusetzen, blieben im Wesentlichen unbeeinflusst. Die Fähigkeit, Aminosäuren im Überschuss zu produzieren, verbesserte sich sogar. Mittels Genomreduktion lässt sich daher eine Grundlage schaffen, auf der Forscher neue biologische Systeme aufbauen können.

Ein anderer Weg zur Vereinfachung besteht darin, kleinere Teilsysteme zu isolieren. Auf physikalischem Weg lässt sich das beispielsweise durch das Einführen von Kompartimenten erreichen: kleinen, durch Membranen abgeschlossenen Untereinheiten. Allerdings ist das gerade bei Bakterienzellen nicht so einfach, da diese von Natur aus selten mit Kompartimenten ausgestattet sind – anders als etwa Säugetierzellen.

Ein beeindruckendes Beispiel, wie sich das trotzdem erreichen lässt, lieferte 2011 das Team von Don Hilvert an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Den Wissenschaftlern gelang es, ein Protein, dessen Produktion in *Escherichia coli* normalerweise giftig für das Bakterium ist, in ein Nanokompartiment zu verpacken und so die Zelle zu schützen. Dazu wurde das toxische Protein um einige elektrisch geladene Aminosäuren verlängert. Diese zusätzlichen Ladungen dienten als Signal für die Verpackung in eine Proteinkapsel. Auch wenn nicht alle Details des Prozesses gut verstanden sind, so lässt sich mit diesem Trick ein schädliches Protein effizient vor dem Rest der Zelle verstecken.

Gewissermaßen als Vorstufe auf dem Weg zu vollständigen Kompartimenten lassen sich mehrere funktionale Komponenten in einem physikalischen Komplex zusammenfassen. Fachleute bezeichnen diese Technologie als »scaffolding«. Ein Protein, das natürlicherweise mit einer Reihe von anderen Proteinen Komplexe formt, bildet das Grundgerüst (scaffold). Ein Beispiel stellen Zellulosomen dar: Proteinkomplexe, die Bakterien außerhalb ihrer Zellwand errichten, um verschiedene Moleküle zum Abbau von zellulosehaltigen Stoffen zusammenzubringen. Dabei verbinden sich die Gerüstproteine



Spektrum der Wissenschaft Extra »Mensch-Natur-Technik« ist eine regelmäßige Sonderpublikation in Kooperation mit der VolkswagenStiftung
www.spektrum.de/mnt

Spektrum
 DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Prof. Dr. 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, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Editor-at-Large: Dr. rer. nat. habil. Reinhard Breuer
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 2/2013

 VolkswagenStiftung

Leitung Kommunikation: Jens Rehländer
Projektmanagement Veranstaltungen: Anna Böhnig
www.volkswagenstiftung.de

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.

Spektrum C U S T O M
 DER WISSENSCHAFT PUBLISHING

Leitung: Dr. Joachim Schüring
Anschrift: Spektrum der Wissenschaft – Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg; Tel. 06221 9126-612; Fax 06221 9126-5612;

www.spektrum.com/cp



(»Scaffoldine«) über »Kohäsine« und bilden dann mit den eigentlich aktiven Enzymen die Zelluloseabbauabriken.

Aus solchen Zellulosomen lassen sich im Labor Gerüste für neue Proteinkomplexe gewinnen. Knüpft man etwa verschiedene Enzyme aus einem gewünschten Stoffwechselweg an ein solches Gerüst, wird das Produkt aus dem ersten Reaktionsschritt – das als Ausgangsstoff für den zweiten dient – direkt weitergereicht, bevor es in die Zelle wegdiffundieren kann. Der weitere Syntheseweg läuft damit äußerst effektiv ab.

Forschern um Percival Zhang am Virginia Polytechnic Institute ist es bereits gelungen, drei Enzyme der so genannten Glykolyse, bei der Traubenzucker zur Energiegewinnung abgebaut wird, im Reagenzglas zu einem solchen Komplex zu verknüpfen. Die Reaktionsrate dieses Stoffwechselwegs vervielfachte sich dadurch gegenüber jener mit getrennten Enzymen. Solche Beispiele zeigen, dass sich – trotz aller Schwierigkeiten – bereits erste und zum Teil auch recht bemerkenswerte Fortschritte auf dem Feld der synthetischen Biologie verzeichnen lassen.

Eines der ersten erfolgreich angewandten Projekte der synthetischen Biologie war die biotechnologische Produktion einer Vorstufe des Antimalariawirkstoffs Artemisinin. Hierfür wurde ein neuer Stoffwechselweg in der Bäckerhefe konstruiert – mit Genen für elf Enzyme aus drei verschiedenen Organismen. Jenseits solcher Ansätze zur Herstellung bestimmter Substanzen gibt es auch zukunftsweisende Entwicklungen in Medizin und Diagnostik: Man kann Zellen designen, die spezielle Funktionen erfüllen, etwa mehrere Blutwerte messen, und dann eine darauf abgestimmte Therapie starten.

Biologische Kippschalter

Das gelingt insbesondere durch die Konstruktion genetischer »Schaltkreise«. Die Idee dafür – der Name lässt es erahnen – wurde aus der Elektrotechnik und den Computerwissenschaften entlehnt. Dabei handelt es sich beispielsweise um biologische Kippschalter. Ein solcher Schalter kann aus zwei so genannten Repressorproteinen bestehen, die wechselseitig die Produktion des jeweils anderen Eiweißmoleküls unterdrücken. Im Zustand A ist eines der beiden hemmenden Proteine aktiv und die Produktion des anderen dadurch abgestellt. Inaktiviert nun zum Beispiel ein chemisches Signal, das von außen auf die Zelle wirkt, das erste Repressorprotein, so beginnt die Synthese des zweiten. Das unterdrückt die Herstellung des ersten Proteins. Der neue Zustand stabilisiert sich und bleibt auch erhalten, wenn das Signal, das die Veränderung ausgelöst hatte, ausbleibt: Das System ist gekippt. Durch Inaktivierung des zweiten Repressorproteins lässt sich der Zustand wieder umkehren.

Ein solches System in einer lebenden Zelle zu konstruieren, ist alles andere als trivial. Dennoch gelang es in den letzten Jahren, mehrere derartige Schaltkreise in Säugetierzellen einzuführen. Kollegen aus meinem Institut, in den Arbeitsgruppen von Martin Fussenegger, Jörg Stelling und Kobi Benenson im Departement für Biosysteme der ETH Zürich, entwickelten Zellsysteme, die ähnlich wie ein Computer rechnen können.

Digitalrechner addieren zwei Nullen zu einer Null, eine Null und eine Eins zu einer Eins. Zwei Einsen heben sich zu einer Null auf, dafür erscheint jetzt in der nächsten Position im Computer eine Eins. Ersetzt man nun in der Zelle die Null durch »Abwesenheit eines Signals« und die Eins durch »Anwesenheit eines Signals«, verhält sich die Zelle ähnlich wie der Computer. Ist sie keinem Eingangssignal ausgesetzt, verbleibt sie im Ausgangszustand. Detektiert sie jedoch eines von zwei Signalen, reagiert sie mit einem eigenen Ausgangssignal. Das kann beispielsweise das Ausschütten eines Hormons sein oder die Produktion eines fluoreszierenden Proteins. Sind nun aber beide Eingangssignale gleichzeitig vorhanden, unterbleibt das Ausgangssignal wieder. Dafür wird nun ein zweiter Schaltkreis aktiviert – ähnlich dem »Übertrag« auf die zweite Position im Computer.

So werden Zellen zu Werkzeugen, die Veränderungen oder bestimmte Zustände in ihrer Umgebung erkennen. Sie können etwa Blutwerte anzeigen oder auch spezifische Signale detektieren, die auf die Anwesenheit von Krebszellen schließen lassen. Damit könnten Zellen künftig selbsttätig auf Fehlentwicklungen in einem Organismus reagieren. Noch ist das außerhalb des Labors zwar Zukunftsmusik, doch die Idee verdeutlicht beispielhaft die Visionen der synthetischen Biologie. Und sie zeigt, wie sich Schritt für Schritt die Hürden dieser noch jungen Forschungsdisziplin überwinden lassen – durch die geschickte Kombination des Knowhows aus Biologie, Biotechnologie und Ingenieurwissenschaften. ~

DER AUTOR



Sven Panke ist Professor am Departement für Biosysteme der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Am 30. Mai 2013 nimmt er beim Forum Mensch-Natur-Technik an der Podiumsdiskussion teil zum Thema »Evolution reloaded: Von den Möglichkeiten der künstlichen Biologie«.

QUELLEN

- Ausländer, S. et al.:** Programmable Single-Cell Mammalian Biocomputers. In: Nature 487, S. 123–127, 2012
Bujara, M. et al.: Optimization of a Blueprint for in Vitro Glycolysis by Metabolic Real-Time Analysis. In: Nature Chemical Biology 7, S. 271–277, 2011
Dietz, S., Panke, S.: Microbial Systems Engineering: First Successes and the Way ahead. In: Bioessays 32, S. 356–362, 2010
Gibson, D. G. et al.: Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome. In: Science 329, S. 52–56, 2010

LITERATURTIPP

Von der Urzeugung zum künstlichen Leben. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 3/2010
Zusammenstellung von Artikeln aus »Spektrum der Wissenschaft«, darunter mehrere zur synthetischen Biologie

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1178956

Wir stiften Wissen



VERANSTALTUNGEN

Mit ihren Veranstaltungen fördert die Stiftung den Dialog von Wissenschaft und Öffentlichkeit. Ebenso engagiert sie sich für den internationalen Austausch zwischen Wissenschaftlern.



WISSENSCHAFTS-FÖRDERUNG

Das Portfolio der VolkswagenStiftung umfasst rund 15 Förderinitiativen, mit denen neue Forschungsfelder erschlossen und herausragende Wissenschaftler gefördert werden. In ihren Entscheidungen ist die gemeinnützige Stiftung autonom.

DIE VOLKSWAGENSTIFTUNG IN HANNOVER

Seit 1962 fördert die private Stiftung von Hannover aus Forscher in aller Welt – mit mehr als 100 Mio. Euro pro Jahr. In 50 Jahren hat sie bereits 4 Milliarden Euro für mehr als 30.000 Projekte in Forschung und Lehre zur Verfügung gestellt.

VolkswagenStiftung
Kastanienallee 35
30519 Hannover

www.volkswagenstiftung.de



VolkswagenStiftung