

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ERDE 3.0

ÖKOLOGIE
So lassen
sich Sümpfe
renaturieren

JUNI 2014

KARL DER GROSSE
Das europäische Erbe
des Karolingers

PRIMATENFORSCHUNG
Wissenschaft zwischen
politischen Fronten

3-D-DRUCKER
Eine neue industrielle
Revolution

Ultraleichte Teilchen

Auf der Suche nach Axionen
und anderen exotischen Partikeln



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



Mehr sehen. Mehr erfahren.
Mehr GEO.



Auch als eMagazine.





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Was dürfen wir Tieren zumuten?

Die unangenehmsten Erinnerungen an meine Doktorarbeit betreffen Versuche mit Herzmuskelzellen, die ich aus gerade geborenen Mäusen gewinnen musste. Meine damaligen widerstreitenden Gefühle stiegen unwillkürlich wieder auf, als ich den Artikel ab S. 30 über Primatenforschung und die teilweise sehr aggressiv vorgehenden Tierschutzverbände las. Auch wenn sich Primatenexperimente zu kognitivem Verhalten wirklich nicht mit meinen Zellkulturversuchen von damals vergleichen lassen, weiß ich doch aus eigener Erfahrung, wie sehr emotionales Bauchgefühl und verstandesmäßige Beurteilung beim Thema »Tierversuche in der Forschung« auseinanderdriften können.

Normalerweise will niemand einem Tier einfach so etwas zu Leide tun. Es geht immer um die Rechtfertigung dafür. So mancher Tierschützer hat kein Problem damit, Fleisch zu essen (solange es Bio ist) oder lästige Stechmücken zu erschlagen. Wo liegt also die Grenze? Vermutlich unterscheiden viele hier zumindest unbewusst zwischen »notwendig« und »unsinnig«.

Primatenversuche wie die des Bremer Hirnforschers Andreas Kreiter dürften Tierschützer eher in letztere Kategorie einordnen und damit die Wissenschaftler mit boshaften Jungs gleichsetzen, die »aus Spaß« Fliegen Beine ausrupfen. Dabei übersehen sie nicht nur, dass die Bremer Makaken einen Großteil ihrer Zeit in komfortablen Gehegen ein ganz gutes Leben führen, sondern auch, dass Kreiters Untersuchung der neuronalen Vorgänge hinter dem Phänomen »Aufmerksamkeit« wegweisende Grundlagenforschung darstellt. Sie könnte eines Tages Ertrag in Form besserer Therapien von neurologischen Krankheiten wie Epilepsie oder Schizophrenie abwerfen. Und so etwas wie Aufmerksamkeit lässt sich – leider – nur an halbwegs menschenähnlichen Gehirnen untersuchen, nicht an Zellkulturen oder Computermodellen.

Stuft man daher solche Forschung als notwendig oder zumindest sinnvoll ein, stellt man allerdings automatisch das Wohl des Menschen über das der Tiere. Diese Sichtweise als Hybris zu kritisieren, ist legitim. Was gibt uns das Recht, einfach über Tiere zu verfügen? Ein konstruktiver öffentlicher Disput über das Thema ist wünschenswert. Wenn allerdings militante Tierschützer Forscher wie Andreas Kreiter persönlich angreifen und sogar seine Familie bedrohen, wie er ab S. 32 berichtet, hat das nichts mehr mit einer offenen Diskussion zu tun, sondern ist im Gegenteil Ausdruck einer bedenklichen Grundhaltung, welche die Existenz einer Gegenposition nicht akzeptieren kann, sondern sie radikal ausmerzen will.

Herzlich Ihr

Interviewen Sie mit uns einen Nobelpreisträger!

Seit 1951 treffen sich jeden Sommer Nobelpreisträger aus aller Welt am Bodensee. Auch bei der diesjährigen, 64. Lindauer Tagung vom 20.6. bis 4.7. werden an die 40 Laureaten – vorwiegend aus den Bereichen Physiologie und Medizin – erwartet, die sich dort mit rund 600 Nachwuchsforschern aus fast 80 Ländern wissenschaftlich austauschen. »Spektrum« wird für Sie vor Ort sein und ein Interview mit einem der Preisträger führen. Mit welchem und über welche Themen, das entscheiden Sie unter www.spektrum.de/nobelumfrage! Das Interview mit dem Nobelpreisträger Ihrer Wahl lesen Sie in Ausgabe 9/2014.

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Axionen könnten die Antwort auf einige fundamentale Fragen der Physik liefern. Ob die ultraleichten Teilchen wirklich existieren, wollen **Joerg Jaeckel, Axel Lindner und Andreas Ringwald** (von links nach rechts) mit ungewöhnlichen Experimenten herausfinden (ab S. 36).



Der Prähistoriker **Paul Heggarty** untersucht in der Abteilung für Linguistik des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig die verwirrende Vielfalt der Sprachen in den Kulturen des Andenraums (ab S. 68).



Wie 3-D-Drucker funktionieren, was sich damit heute schon herstellen lässt und wie man damit sogar künstlerisch arbeiten kann, beschreibt die französische Spezialistin für digitale Fabrikation und Kommunikation **Mathilde Berchon** ab S. 84.

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Getreideanbau in der Bronzezeit • Grippe-
mittel Tamiflu weit gehend wirkungslos •
Neue Vulkaninseln • »Gen-Pappeln« als
Energiepflanzen • Verborgener Ozean auf
Saturnmond • Wale als Rekordtaucher

11 Bild des Monats

Widerstandsfähige Muschelschalen

12 Forschung aktuell

Verbesserte Antibiotika
Neue Schlagkraft durch
chemische Modifikation

Klimafreundliche Biokohle
Der Bodenverbesserer
senkt Lachgasemission

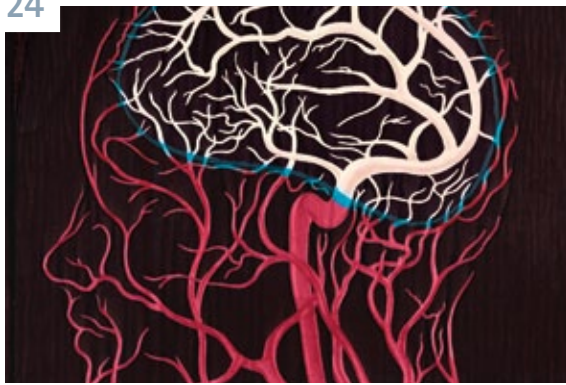
Hörprothesen der Zukunft
Naturgetreuerer Hörein-
druck dank Optogenetik

**Die Geschichte des Cholera-
erregers**

DNA aus einem medizini-
schen Präparat gibt Ein-
blick in die Evolution der
verheerenden Mikrobe

SPRINGER'S EINWÜRFE
Der Utopie eine Chance!
Alternative Energie
für Entwicklungsländer

24



ALEX NABAUM

24 Wege durch die Blut-Hirn-Schranke

Jeneen Interlandi

Mit neuen Methoden wollen Forscher Medikamente durch
die Barriere zwischen Blutstrom und Gehirn schleusen.

▶ 30 Primatenforschung in Europa

Alison Abbott

Eine hart erkämpfte EU-Richtlinie droht zu scheitern.

BIOLOGIE & MEDIZIN

30



GARY NEILL

44 In stetem Fluss

Hans-Joachim Schlichting

Wie Flüssigkeitsdurchströmte Netzwerke Strukturen bilden.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

MENSCH & KULTUR

48



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

▶ SCHWERPUNKT: KARL DER GROSSE

48 Europas karolingisches Erbe

Max Kerner

Im Mittelalter galt Karl der Große als vorbildhafte
Herrscherpersönlichkeit. Doch auch für das moderne
Europa taugt er noch als Leitfigur.

52 Aachen – Spiegelbild der Reichspolitik

Clemens M. M. Bayer

Mit Königssaal und Marienkirche setzte Karl sich als
tiefgläubiges Staatsoberhaupt monumental in Szene.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

60 Ornament-Wettbewerb: Die Gewinner

Christoph Pöppe

Auswahl der besten unter mehr als 3000 Einsendungen –
und neue Techniken zur Erstellung von Ornamenten.



► **TITELTHEMA**

JENSEITS DES STANDARDMODELLS

36 Ultraleichten Teilchen auf der Spur

Joerg Jaeckel, Axel Lindner und Andreas Ringwald

Die Suche nach neuen Teilchen, vor allem den Bestandteilen der Dunklen Materie, stagniert. Nun setzen Forscher auf unkonventionelle Strategien, um nach ultraleichten Axionen zu fahnden.

68



iSTOCKPHOTO / MARIUSZ PRUSACZYK

SERIE »WELT DER SPRACHE« TEIL 2

68 Sprachenvielfalt der Anden

Paul Heggarty

Vergleiche heutiger Sprachen sowie alte Aufzeichnungen liefern neue Daten zur Kulturentwicklung im Andenraum.

ERDE & UMWELT

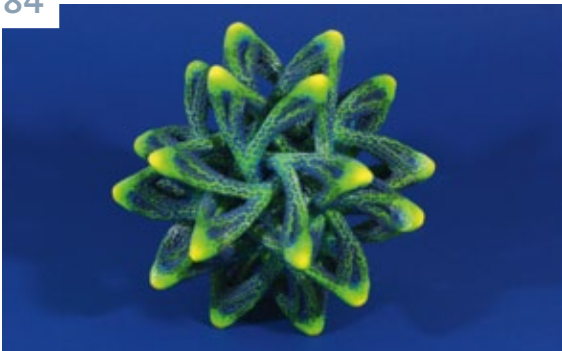
► **76 Architekten für Sümpfe**

John Carey

Die Renaturierung von Feuchtgebieten scheitert oft daran, dass Umweltschützer zu viel auf einmal erreichen wollen.

TECHNIK & COMPUTER

84



GEORGE HART

► **84 Drucken in drei Dimensionen**

Mathilde Berchon

Additive Herstellungstechniken entwickeln sich rasch und dringen zunehmend in den Privatbereich vor.

92 Eine neue industrielle Revolution?

Martin Scheufens

Bislang haben 3-D-Drucker nur Nischenmärkte erobert.

96 Rezensionen

Paul Zanker: Die römische Stadt • Rüdiger Vaas: Vom Gottesteilchen zur Weltformel • Dominic Roser, Christian Seidel: Ethik des Klimawandels • Svante Pääbo: Die Neandertaler und wir • Eli Maor, Eugen Jost: Beautiful Geometry u. a.

103 Wissenschaft im Rückblick

Vom Aerogramm zur Genmanipulation

104 Futur III

Jeff Hecht: Wie schnell ist die Dunkle Energie?

106 Vorschau

Titelmotiv: iStockphoto / Andrew Ostrovsky
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



Viele Sichtweisen auf die Sprache

In einer neuen Serie gibt »Spektrum der Wissenschaft« einen Überblick über die Facetten der menschlichen Sprache. (Mai 2014, S. 60 und S. 68)

Walter Weiss, Kassel: Diese Serie begrüße ich sehr. Man kann an das Problem Sprache ja von vielen Seiten aus herangehen: von der Evolution (Gibt es

so etwas wie Sprache auch in der Tierwelt?); von der Hirnforschung (Welche Hirnareale werden beim Sprechen angeregt?); vom Spracherwerb und seiner genetischen Festlegung ...

Man kann natürlich auch ganz generell vom Denken aus dem Thema Sprache näher treten, wobei es dienlich ist, zunächst über das Denken zumindest eine Theorie oder Arbeitshypothese zu entwickeln. Wäre Sprechen nichts anderes als eine Abbildung des Denkens auf das akustische Medium, würde dann weiterhin das Sprechen sich zum Schreiben auf Medien wie Papier, Stein, Holz, elektronische Speicher und so fort abbilden.

Entwicklung der Persönlichkeit

Wer Naturwissenschaft studiert, könnte das Gespür für soziale Belange verlieren, meinte Michael Springer. (»Ist die Naturwissenschaft unmoralisch?«, Springers Einwürfe, März 2014, S. 20)

Urs Haller, Allschwil (Schweiz): Als Ingenieur arbeite ich seit vielen Jahren an den Nahtstellen zwischen den Natur-

wissenschaften, täglichem Leben und betriebswirtschaftlichen Sichtweisen. Wissenschaften fundiert zu lernen, ist für diesen Beruf unabdingbar. Ethik, Psychologie, Soziologie und politisches Verständnis gehören aber auch ins Studium, schließlich soll die Persönlichkeitsentwicklung umfassend gefördert werden. Jane Loevinger, Susanne Cook-Greuter, Clare Graves, Don Beck, Lawrence Kohlberg, Jean Piaget und viele weitere Psychologen zeigen auf, wie sich die Entwicklung der Persönlichkeit erfassen lässt.

Über Prioritäten nachdenken

Kuh- oder Affenpocken können uns gefährlich werden, warnte Sonia Shah. (»Die Rückkehr der Pocken«, Februar 2014, S. 24)

Jörg Michael, Hannover: Ist es wirklich nötig, neue Impfungen zu entwickeln? Denn auf der ersten Seite des Artikels findet sich folgende Aussage: »Die (früher übliche) Pockenimpfung schützte [...] auch gegen Infektionen mit [...] Affen- und Kuhpocken.«

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Finkeldey (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistentin: Erika Eschwei

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

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: Michaela Butler, Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Dr. Claudia Hecker, Christine Kemmet.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.

Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBIO) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Nicole Klemmer, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1373

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. 35 vom 1.1.2014. **Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH.

Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2014 (Autor) Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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





CDC / JAMES GATHANY

Heute existieren die Pockenerreger nur noch in zwei Hochsicherheitslabors in den USA und Russland. Viele Menschen sind daher nicht mehr gegen das Virus geimpft.

Man darf auch nicht vergessen, dass bereits am 14. Mai 1796 von Edward Jenner die erste Pockenimpfung auf Basis von Rinderpocken-Lympe durchgeführt wurde. Potenzielle, mehr oder weniger theoretische Bedrohungen gibt es wie Sand am Meer. Bevor also eventuell Milliarden wegen einer nach derzeitigem Stand lediglich potenziellen Bedrohung ausgegeben werden, die sich zudem durch Reaktivierung eines altbewährten Impfstoffs fürs Erste sicherlich »billig« entschärfen lässt, sollte man über Prioritäten nachdenken.

Das Argument, dass sich die Anzahl der Menschen, die wegen Immunschwäche vom Pockentod bedroht sind, in den letzten Jahren ver Hundertfacht hat, kann auch nur als Versuch einer zweckgerichteten Panikmache gewertet werden. Die Zahl mag korrekt sein – aber wer unter Immunschwäche leidet, hat noch ganz andere Probleme zu fürchten.

Mir scheint der gesamte Artikel eine kaum verschleierte Forderung nach mehr Geld zu sein, das man anderweitig sinnvoller einsetzen kann. Es gibt Krankheiten, die mehrere Millionen US-Amerikaner betreffen, aber (da »diseases of the poor«) so gut wie keine Aufmerksamkeit oder Forschungsgelder bekommen.

Thomas Scheubeck, Alsbach-Hähnlein: Als Tierarzt promovierte ich an der LMU München über die Diagnose

von Pockenviren. In dieser Zeit (1990) wurden in Deutschland mehrere Menschen mit Pockenviren infiziert, flächenhaft über Deutschland verteilt. Manche davon verstarben, bis die Pocken als Ursache erkannt wurden. Man entdeckte durch Elisa-Tests, dass es sich dabei ursprünglich um Kuhpocken handelte, die als neuen Wirt Katzen infizierten, die bis dahin als pockenfrei galten.

Diese Möglichkeit wird im Artikel nur erwähnt und als mögliche genetische Aberration für neue Wirte diskutiert. Sie ist aber bereits geschehen, 1989 bis 1992 in Deutschland. Die Infektion mit Katzenpocken ereignete sich vor allem bei immunsupprimierten Personen, die im gleichen Haushalt mit den Tieren lebten.

Der Chemiker als Pädagoge

Redaktionsleiter Hartwig Hanser brach eine Lanze für die zu Unrecht wenig beachtete Chemie. (»Ein ungeliebtes Fach im Scheinwerferlicht«, Editorial, April 2014, S. 3)

Winfred Krech, Itzehoe: Chemie führt deshalb ein Mauerblümchendasein, weil es in der Schule zu wenig Lehrer gibt, die sowohl gute Pädagogen als auch gute Chemiker sind. Ich erinnere mich an meine Schulzeit: Der erste Chemielehrer war kriegsbedingt eine Karikatur wie aus der »Feuerzangenbowle«. Wenn er die Sicherheitseinrichtungen für den Versuch erklärt hatte, klingelte es schon zur Pause. Der zweite Chemielehrer wusste bei Nachfragen nur den Standardsatz: »Meine Herren, das müssen Sie begreifen lernen!« Wenige begriffen es aber.

Als ich mit dem Direktor über diesen Lehrer sprach, verteidigte er ihn nicht, sondern erklärte mir offen: »Entweder macht er Chemieunterricht, oder es gibt keinen. Ich habe noch einen Unidozenten, aber den kann ich nur in der Unter- und Oberprima einsetzen!« Wo sollen gute Chemielehrer für Gymnasien und vor allem Gemeinschafts-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

Google+

www.spektrum.de/googleplus

twitter

www.spektrum.de/twitter

schulen bei den heutigen Unterrichtsbedingungen herkommen? Wer wirklich qualifiziert ist, hat in Industrie und Forschung so interessante Aussichten, dass er wenig Neigung verspüren dürfte, bei immer neuen Belastungen und Verschlechterung der Bezahlung sich mit »unerzogenen Gören« anderer Leute herumzuplagen.

Da liegt der Hase (wie bei den meisten naturwissenschaftlich-mathematischen Fächern) im Pfeffer. Das schlechte Ansehen dieser Fächer ist nicht zuletzt darin begründet, dass Bildungsministerinnen stolz öffentlich erklären, in Mathe immer eine Fünf gehabt zu haben. Stellen Sie sich vor, eine öffentliche Person erklärt bei der Erwähnung von Goethes »Faust«, sie habe immer gedacht, Goethe sei Schriftsteller und nicht Boxer gewesen!

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

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

ARCHÄOLOGIE

Bronzezeitliche Landwirtschaft in Zentralasien

Der Austausch von Wissen und Gütern entlang der (später so bezeichneten) Seidenstraße führte dazu, dass sich der Pflanzenbau in Zentralasien erheblich früher durchsetzte als bislang angenommen, berichten Archäologen um Robert Spengler von der Washington University in St. Louis. Die Forscher untersuchten Überreste von Getreidekörnern aus der Bronzezeit an verschiedenen Ausgrabungsstätten im heutigen Kasachstan. Laut den Analysen nutzten nomadische Viehhalter in der Region schon im 3. Jahrtausend v. Chr. sowohl Saatgut aus Südwest- wie auch aus Ostasien.

Spenglers Team führte die Untersuchungen an den Orten Tasbas und Begash im kasachischen Bergland durch – saisonal genutzten Lagerstätten bronzzeitlicher Hirtennomaden. Die Menschen hier gingen vor etwa 5000 Jahren vom Jagen zur Herdentierhaltung über. Im frühen 3. Jahrtausend



MICHAEL BRACCHETTI/WUST

v. Chr. begannen sie während der vielen Stopps ihrer Wanderschaft zusätzlich Landwirtschaft zu betreiben, wie die gefundenen Körnerreste belegen. Im zweiten Jahrtausend v. Chr. pflanzten sie dann bereits Hirse, Weizen, Gerste und verschiedene Hülsenfrüchte an.

Die Funde lassen den Weg errahnen, auf dem sich die Getreidearten verbreitet haben. So entdeckten die Forscher Überreste von Weizen, der in Südwestasien seit mindestens 6000 Jahren angebaut wird, in China aber erst ab der Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. auftaucht. Offenbar wanderte er also von West nach Ost. Den umgekehrten

Durch die Hügel Zentralasiens zogen in der Bronzezeit nomadisierende Hirten. Sie bauten auch Getreide an.

Weg könnte die Echte Hirse (*Panicum miliaceum*) genommen haben: Sie wurde bereits vor 8000 Jahren im heutigen China angepflanzt, in Südwestasien aber erst 4000 Jahre später. Wie die Forscher schreiben, sprechen die Befunde dafür, dass Nomaden diese Nutzpflanzen auf ihren Wanderungen durch Zentralasien verbreiteten.

Proc. Royal Soc. B 10.1098/rspb.2013.3382, 2014

Spektrum DER WISSENSCHAFT **DIE WOCHE**



Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin

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

www.spektrum.de/die-woche

PHARMAKOLOGIE

Grippemedikament Tamiflu erfüllt Erwartungen nicht

Das Grippemedikament Tamiflu ist weniger wirksam als bisher angenommen. Dies erklärt die Cochrane Collaboration, ein Netzwerk von Ärzten und Wissenschaftlern, in einer Neubewertung älterer Studien. Zuvor fehlte den Medizinern der Zugriff auf diese Daten, weil der Pharmakonzern Roche, Hersteller von Tamiflu, sie nicht vollständig veröffentlicht hatte.

Laut der neuen Metaanalyse hat der Tamiflu-Wirkstoff Oseltamivir, vorbeugend eingenommen, zwar eine gewisse Schutzwirkung: Er mindert das Risiko, dass sich Grippesymptome ausprägen, um etwa drei Prozent. Auch verkürzt er die Zeit, bis die Symptome abklingen, von sieben auf sechseinhalb Tage. Jedoch senkt er nicht die Häufigkeit schwerer Komplikationen oder die Zahl

der Krankenhausaufenthalte. Auch gebe es keine Hinweise darauf, dass er die Ausbreitung von Grippeviren unterbindet, wie die Autoren schreiben.

»Es fehlt jede Grundlage für die Annahme, das Medikament könne eine Pandemie verhindern«, erklärt Mitautor Carl Heneghan von der University of Oxford. Genau von dieser Annahme waren mehrere europäische Regierungen ausgegangen, als sie vor einigen Jahren Grippemedikamente wie Tamiflu oder Relenza in großen Mengen einlagerten, um einer befürchteten Influenzapandemie entgegenzuwirken. Nach Ansicht der Ärzte belegen die Ergebnisse, wie wichtig die unabhängige Bewertung von Arzneimitteln ist.

The Cochrane Library 10.1002/14651858.CD008965.pub4, 2014

Verschmelzende Vulkaninseln

Im Pazifik südlich von Japan lässt sich derzeit verfolgen, wie eine vulkanische Insel entsteht. Etwa 1000 Kilometer südlich von Honshu, in der Bonin-Inselgruppe, durchbrach im November 2013 ein kleiner Vulkan den Meeresspiegel und bildete ein neues Eiland mit dem Namen Niijima. Es lag anfangs rund 200 Meter von der Insel Nishinoshima entfernt, die ebenfalls vulkanischen Ursprungs ist. Mittlerweile sind beide verschmolzen und bilden eine Landmasse, die

mehr als einen Kilometer lang ist und kontinuierlich weiterwächst.

Nahe der Bonin-Inselgruppe taucht die Pazifische unter die Philippinische Platte ab. Das Gestein schmilzt in der Tiefe und nährt örtliche Vulkane, darunter den Erzeuger von Niijima. Dieser ist dauerhaft aktiv, so dass ständig neues Material aus dem Erdinnern an die Oberfläche gelangt und das Eiland vergrößert. Der Vulkankegel ragt in-

zwischen mehr als 60 Meter in die Höhe – dreimal so viel wie noch im Dezember. Es ist daher eher unwahrscheinlich, dass Wellen und Meeresströmungen das neue Eiland schon bald wieder abtragen werden. Die Bonin-Inseln waren seit ihrem Entstehen vor etwa 48 Millionen Jahren nie mit einem Kontinent verbunden, weshalb sich auf ihnen eine einzigartige Flora und Fauna entwickeln konnte.

Südlich von Japan entsteht ein neuer Vulkanberg (rechts); er hat sich bereits mit der Insel Nishinoshima (links) vereinigt.



JAPANESE COAST GUARD

ENERGIEPFLANZEN

Genetisch veränderte Pappeln für die Bioethanol-Produktion

Nachwachsende »Energiepflanzen« sollen einst in größerem Maßstab zu Bioethanol verarbeitet werden, der fossile Brennstoffe ersetzen kann. Ein Problem dabei ist aber das Lignin in der Pflanzenzellwand: Es erschwert das Herauslösen der Zellulose aus der

Biomasse und ihre Weiterverarbeitung zu Bioethanol. Wissenschaftler in den USA haben nun Pappeln genetisch so verändert, dass sich deren Lignin einfacher abbauen lässt. Das erleichtert die Weiterverarbeitung des Holzes zu Bioethanol. Pappeln geben als schnell wachsende Gehölze viel versprechende Energiepflanzen ab.

John Ralph und seine Mitarbeiter an der University of Wisconsin-Madison (USA) brachten die Pflanzenzellen dazu, abgewandelte Ligninbausteine zu synthetisieren und ins Ligninmak-

romokül einbauen. Das dabei entstehende Molekül enthält unnatürlich viele Esterbindungen, die sich unter Einfluss einer Lauge ohne großen Aufwand spalten lassen, wobei das Lignin in kleinere Einheiten zerfällt.

Entsprechend modifizierte Pappeln entwickelten sich ganz normal und zeigten keine Anzeichen irgendwelcher Schäden, schreiben die Forscher. Beim Verarbeiten ihres Holzes zu Bioethanol fiel die Ausbeute des Zwischenprodukts Glukose jedoch deutlich höher aus. Während bei natürlichen Pflanzen nur knapp 15 Prozent der pflanzlichen Trockenmasse »verzuckert« werden konnten, waren es bei den gentechnisch modifizierten mehr als 25 Prozent.

Science 344, S. 90–93, 2014



SHAWN MANSFIELD/UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA

Äußerlich wirken die genetisch modifizierten Pappeln normal. Jedoch ist das Lignin ihrer Pflanzenzellwand so verändert, dass es sich deutlich leichter aufspalten lässt.

ASTRONOMIE

Ein Ozean im Inneren des Saturnmonds Enceladus

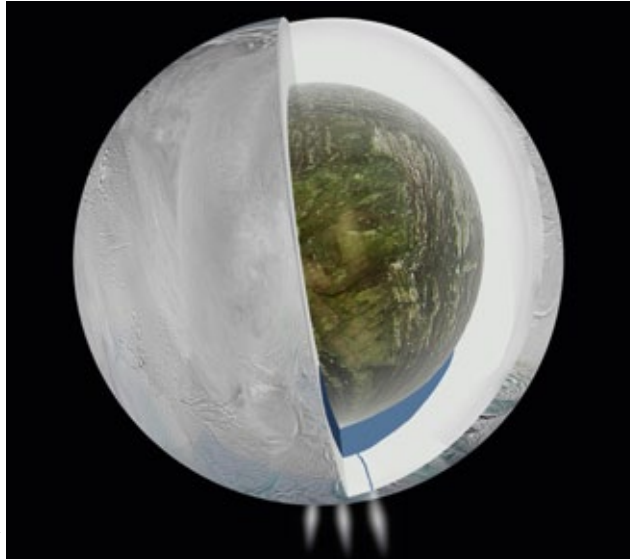
Tief unter dem Südpol des kleinen Saturnmonds Enceladus befindet sich offenbar ein größerer Ozean aus flüssigem Wasser. Darauf deuten Messungen im Schwerfeld des Mondes hin, der einen Durchmesser von etwa 500 Kilometern hat und überwiegend aus Wassereis besteht. Forscher um

Luciano Iess von der Sapienza Universität di Roma führten die Untersuchungen mit Hilfe der Raumsonde Cassini durch, die seit 2004 um den Saturn kreist.

Um den inneren Aufbau von Enceladus näher zu erkunden, lenkten Wissenschaftler die Raumsonde in den Jahren 2010 bis 2012 dreimal bis auf etwa 100 Kilometer an den Saturnmond heran. Bei diesen Vorbeiflügen sendete Cassini ein Funksignal zur Erde, das von Radioteleskopen aufgefangen wurde. Große Masseansammlungen im Innern des Mondes beeinflussten über ihre Schwerkraft die Bahn von Cassini, was einen messbaren Dopplereffekt in der Signalfrequenz verursachte. Die Daten deuten auf eine Zusammenballung dichteren Materials unterhalb der Eiskruste des Südpols hin.

Wie die Forscher vermuten, existiert dort 30 bis 40 Kilometer unter der Oberfläche ein Ozean aus flüssigem Wasser. Er könnte bis zu zehn Kilometer tief sein und sich weit in den Norden hinein – bis zu 50 Grad südlicher Breite – erstrecken. Möglicherweise speisen sich aus diesem Ozean die aktiven Geysire am Südpol des Saturnmonds, die Cassini im Jahr 2005 entdeckte. Sie geben Fontänen aus Wasserdampf und feinen Eispartikeln in den Weltraum ab. Aus den freigesetzten Eiskörnchen bildet sich entlang der Umlaufbahn von Enceladus der dünne, aber riesige E-Ring des Saturns.

Science 344, S. 7–80, 2014



Zwischen der Eiskruste (weiß) und dem Gesteinskern (grün) von Enceladus liegt vermutlich ein Ozean flüssigen Wassers (blau).

BIOLOGIE

Cuvier-Schnabelwale sind Rekordtaucher

Neue satellitengestützte Messungen belegen, dass Cuvier-Schnabelwale (*Ziphius cavirostris*) länger und tiefer tauchen können als jedes andere Säugetier. Über drei Jahre hinweg haben Wissenschaftler acht Vertreter dieser Spezies im Pazifik beobachtet. Der längste erfasste Tauchgang dauerte demnach 137 Minuten, also mehr als zwei Stunden; der tiefste reichte bis drei Kilometer unter die Wasseroberfläche. Diese Werte erreichen nicht einmal Südliche Seeelefanten, die bislang als Rekordhalter galten: Sie tauchen »nur« 2400 Meter tief und halten dabei bis zu zwei Stunden die Luft an.

Das Team um Gregory S. Schorr vom Cascadia Research Collective (Olympia, USA) befestigte spezielle Messsonden mit einem modifizierten

Gewehr nahe der Rückenflosse von Cuvier-Schnabelwalen. Die Geräte verfügten über Tiefenmesser, um die Tauchtiefe zu dokumentieren, sowie über Nässefühler, die es registrierten, wenn die Wale zum Luftholen auftauchten. In regelmäßigen Abständen übermittelten die Sonden ihre Messdaten per Funksignal, das von Argos-Satelliten aufgezeichnet wurde.



Eine Messsonde wird auf einen Cuvier-Schnabelwal abgeschossen.

Bislang war nur wenig über das Verhalten von Cuvier-Schnabelwalen bekannt, da sie in der küstenfernen Tiefsee jagen, was ihre Beobachtung äußerst schwierig macht. Zwar weiß man schon länger, dass die Tiere sehr tief und sehr lange tauchen können. Einschlägige Messungen über Wochen und Monate hinweg standen allerdings bis dato aus.

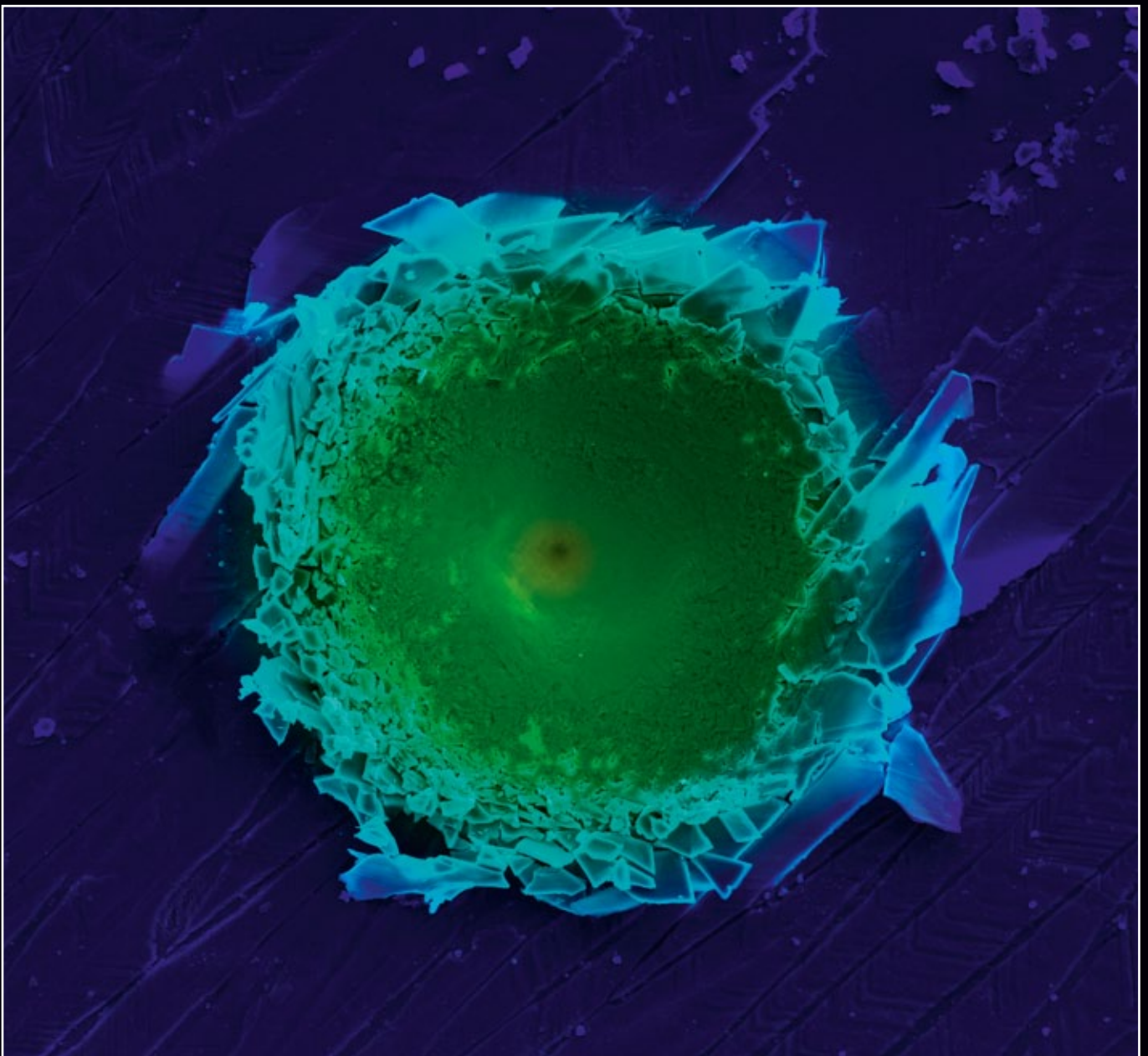
Die braungrau und weiß gefärbten Säugetiere können ausgewachsen bis zu sieben Meter groß und drei Tonnen schwer werden. Charakteristisch für sie ist ihre lang gezogene Schnauze. Cuvier-Schnabelwale leben in kleinen Gruppen zusammen, die bis zu sieben Tiere umfassen. Zu ihren Beutetieren gehören Kalmare und Fische

PLoS One 9, e92633, 2014

HART IM NEHMEN

Muschelschalen halten selbst kräftige Schläge aus, ohne komplett zu zerbrechen. In der nachträglich eingefärbten Rasterelektronenmikroskopieaufnahme einer durchsichtigen Schale der Capiz-Muschel (*Placuna placenta*), die aus gestapelten Kalzitplättchen aufgebaut ist, sieht man die Eindruckstelle einer feinen Diamantspitze (Mitte). Der Schaden breitet sich nicht weiter aus, denn die Stoßenergie wird optimal verteilt und absorbiert. Daran beteiligt sind Grenzflächen von Kalzitwillingen im Nanomaßstab sowie elastischere organische Zwischenschichten. Diese Bauweise könnte Vorbild sein beispielsweise für durchsichtige Schutzmasken.

Nature 10.1038/nmat3920, 2014



PHARMAKOLOGIE

Alte Antibiotika mit neuer Schlagkraft

Durch chemische Modifikationen ist es gelungen, die Wirksamkeit einer bestimmten Antibiotikaklasse zu steigern, Resistenzen zu überwinden und Nebenwirkungen zu verringern.

VON ELENA BERNARD

Antibiotika greifen je nach Klasse an verschiedenen Stellen in den Stoffwechsel der Bakterien ein und stören so lebenswichtige Prozesse, beispielsweise den Aufbau der Zellwand, die DNA-Synthese oder die Herstellung von Proteinen. Letzteres geschieht bei den Aminoglycosiden, zuckerartigen Substanzen aus der Gruppe der Oligosaccharide. Die Wirkstoffmoleküle heften sich an die Ribosomen, welche die von der Boten-RNA kodierte Aminosäuren zu Proteinen aneinanderfügen. Das Antibiotikum behindert diesen Vorgang, so dass die lebenswichtigen Eiweißstoffe entweder gar nicht oder fehlerhaft produziert werden. Die Bakterienzelle stirbt daraufhin ab.

Problematisch ist aber, dass viele Aminoglycosid-Antibiotika nicht nur die Ribosomen von Mikroben, sondern teils auch jene von menschlichen Zellen torpedieren. Besonders empfind-

lich sind hier die Haarzellen im Innenohr. Durch Aminoglycoside können sie absterben, was zu bleibenden Hörschäden bis hin zur Taubheit führt. Neuen Untersuchungen zufolge sind vor allem die Ribosomen in den Mitochondrien betroffen, die als Kraftwerke der Zelle fungieren und über eigene Gene verfügen (*Journal of Biological Chemistry* 289, S. 2318–2330, 2014). Das deckt sich mit Beobachtungen, wonach Menschen mit einer erblichen Veränderung dieser »Mitoribosomen« besonders anfällig für die Nebenwirkungen der Aminoglycoside sind.

Erik C. Böttger von der Universität Zürich und seine Kollegen wollten die Wirkstoffe deshalb so abändern, dass sie sich möglichst nur an bakterielle Ribosomen heften (*Nature Communications* 5, Nr. 3112, 2014). Dabei stützten sie sich auf detaillierte Informationen über Aufbau und Struktur der Antibio-

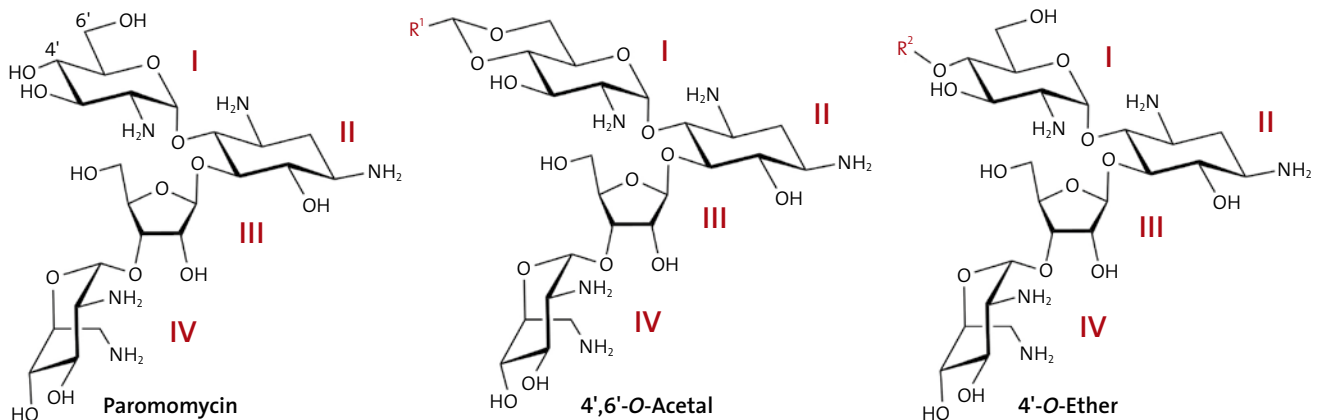
tikabindestellen. Ribosomen bestehen aus zwei Untereinheiten, einer großen und einer kleinen, die wiederum aus Proteinen und RNA aufgebaut sind. Die Aminoglycosid-Antibiotika binden sich an die ribosomale RNA (rRNA) der kleinen Untereinheit.

Größere Spezifität

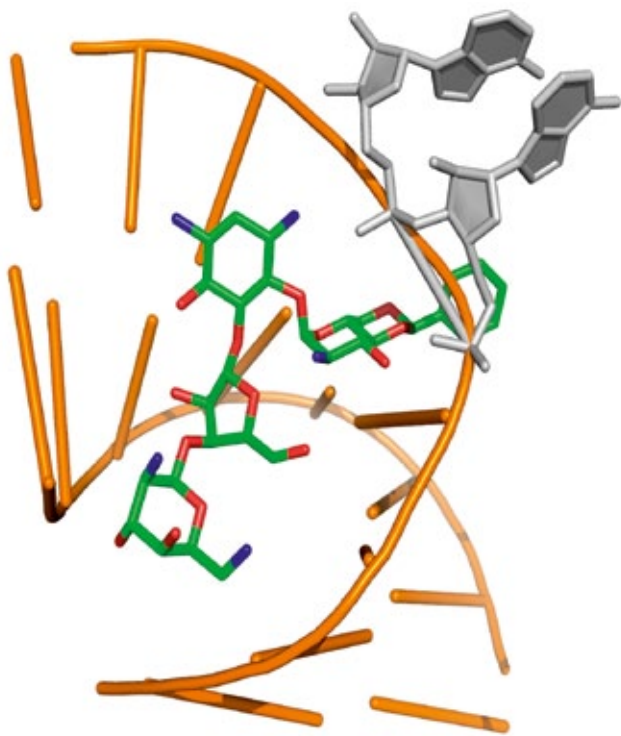
Für ihre aktuelle Studie verwendeten die Züricher Forscher zwei Vertreter namens Paromomycin und Neomycin. Diese heften sich beide an die so genannte Helix 44 der rRNA – ganz in der Nähe der Stelle, wo normalerweise die Transport-RNA (tRNA) andockt, welche die passende Aminosäure für das entstehende Protein trägt. Die Folge ist, dass sich tRNAs mit falschen Aminosäuren leichter anlagern können. Die Proteine werden also nicht mehr genau nach Plan zusammengesetzt, und die inkorrekten Bausteine machen sie nutzlos.

Die Helix 44 ist bei den Ribosomen von höheren Organismen und Bakterien sehr ähnlich aufgebaut. Nur an zwei Stellen differieren die Basen, die für die Bindung von Wirkstoffen relevant sind. An Position 1491 der rRNA befindet sich

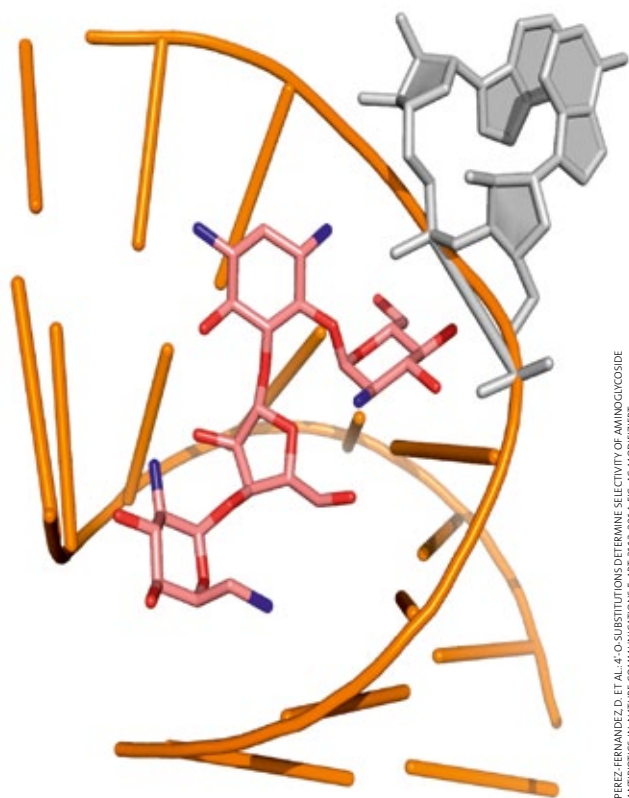
An Ring I des Antibiotikums Paromomycin haben Forscher von der Universität Zürich zusätzliche chemische Gruppen (R¹ beziehungsweise R²) angehängt. Die so erzeugten 4'-O-Ether und 4',6'-O-Acetal zeigen eine erhöhte Selektivität gegenüber bakteriellen Ribosomen und rufen deshalb weniger Nebenwirkungen hervor.



PEREZ-FERNANDEZ D. ET AL. / CAS SUBSTITUTIONS DETERMINE SELECTIVITY OF AMINOGLYCOSIDE ANTIBIOTICS. IN: NATURE COMMUNICATIONS 5, ART. 3112, 2014, FIG. 1E



Das 4',6'-O-Acetal (Bild links, grün) fügt sich ähnlich wie Paromomycin (Bild rechts, lachsfarben) in die Helix 44 der kleinen Unter-einheit des Ribosoms ein. Es sorgt jedoch durch die angehängte



Benzylgruppe ($C_6H_5CH_2$) dafür, dass die Basen A1492 und A1493 (grau) der Helix etwas anders orientiert sind.

PÉREZ-FERNÁNDEZ, D. ET AL.: 4'-O-SUBSTITUTIONS DETERMINE SELECTIVITY OF AMINOGLYCOSIDE ANTIBIOTICS IN NATURE. COMMUNICATIONS 5, ART. 3132, 2014, FIG. 4C, MODIFIZIERT

bei höheren Organismen ein Adenin (im Zellplasma) oder Cytosin (in den Mitochondrien), bei Bakterien stattdessen ein Guanin. An Position 1408 tragen die Ribosomen im Zellplasma ein Guanin, die in den Mitochondrien und bei Bakterien dagegen ein Adenin. Diese Basen unterscheiden sich darin, welche und wie viele Wasserstoffbrückenbindungen sie eingehen können.

Die Antibiotika Paromomycin und Neomycin passen am besten zu der bakteriellen Version, also Adenin an Position 1408 und Guanin an Position 1491. Die abweichenden Basen bei den höheren Organismen haben zwar eine schwach abstoßende Wirkung auf einzelne chemische Gruppen der Wirkstoffe, verhindern die Anlagerung jedoch nicht völlig.

Ziel der Forscher war es mithin, die Struktur der Antibiotika so abzuwandeln, dass sie zwar nach wie vor eine hohe Affinität zu den Ribosomen der Bakterien haben, aber empfindlicher auf die kleinen Veränderungen in den

Gegenstücken beim Menschen reagieren. Dazu behielten Böttger und seine Kollegen das Grundgerüst von Paromomycin und Neomycin bei, hängten aber an einzelnen Stellen, die wichtig für die Bindung sind, zusätzliche chemische Gruppen an (Bild links unten). Auf diese Weise entstanden 43 neue Varianten.

Die Hemmwirkung auf die verschiedenen Ribosomentypen testeten die Forscher statt an Ribosomen aus menschlichen Zellen, die sich schwerer untersuchen lassen, an abgewandelten aus Bakterien: An den Positionen 1408 und 1491 hatten diese nun die betreffenden Basen höherer Organismen.

Den Testergebnissen zufolge dockten viele der modifizierten Wirkstoffe tatsächlich nur noch an bakterielle Ribosomen an – was ihre Nebenwirkungen verringern sollte. In Mäusen bekämpften die neuen Substanzen Infektionen mit dem Darmbakterium *Escherichia coli* und mit multiresistenten Stämmen des Eitererregers *Staphylococcus aureus* ähnlich gut wie her-

kömmliche Aminoglycoside. Auf mögliche Nebenwirkungen wurden die Tiere in dieser Studie allerdings nicht untersucht.

Aufhebung von Resistenzen

Chemische Modifikationen können auch dabei helfen, Resistenzen zu überwinden. So entwickelten Wissenschaftler um Böttger in Kooperation mit Arbeitsgruppen aus den USA und Spanien eine ganz neue Klasse von Antibiotika, die multiresistente Tuberkulosebakterien bekämpfen soll und in Tierversuchen bereits viel versprechende Resultate lieferte (*Nature Medicine* 20, S. 152–158, 2014).

Nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation sterben jährlich 1,3 Millionen Menschen an Tuberkulose. Die Bedrohung wächst, da immer mehr Erregerstämme gegen bestimmte oder sogar alle bekannten Antibiotika gefeit sind. Üblich ist derzeit eine Kombinationstherapie aus vier verschiedenen Wirkstoffen, die über mehrere Monate

hinweg eingenommen werden müssen. Bricht der Betroffene die Behandlung vorzeitig ab, fördert das weitere Resistenz.

Viele Bakterien nutzen eine so genannte Effluxpumpe, um die Antibiotikamoleküle aus der Zelle auszuscheiden, bevor sie Schaden anrichten können. Das ist auch der Grund, warum das Aminoglycosid Spectinomycin nicht gegen Tuberkulose wirkt. Die Forscher haben diesen Stoff nun abgewan-

delt und so auf seiner Basis eine neue halbsynthetische Antibiotikaklasse geschaffen: die Spectinamide.

Einige der neuen Substanzen haben gleich zwei Vorteile: Sie entgehen nicht nur der Effluxpumpe, sondern hemmen die bakteriellen Ribosomen auch besonders stark. Dabei greifen sie an einer anderen Stelle an als die meisten Aminoglycoside, nämlich an Helix 34. Deshalb wirken sie sogar gegen Tuberkulosebakterien, die gegen herkömmli-

che Vertreter dieser Stoffklasse resistent sind. Nebenwirkungen haben sich in den Versuchen an Mäusen nicht gezeigt. Nach Ansicht der Forscher sind unter ihren Neuentwicklungen einige aussichtsreiche Kandidaten für die Behandlung von Tuberkulose bei Menschen. Ob sie die Erwartungen erfüllen, müssen klinische Studien zeigen.

Elena Bernard ist freie Wissenschaftsjournalistin in Dortmund.

ERDERWÄRMUNG

Biokohle macht Landwirtschaft klimafreundlicher

Auf Anbauflächen aufgebracht, speichern verkohlte Pflanzenabfälle nicht nur das Treibhausgas Kohlendioxid. Sie senken auch die Emissionen von Lachgas, indem sie Mikroorganismen zu dessen Abbau anregen.

VON MAREN EMMERICH

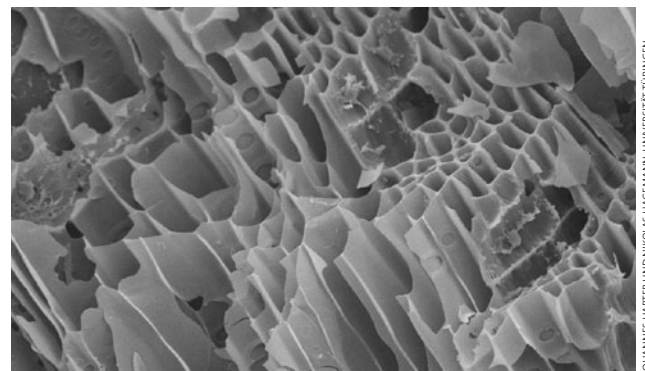
Ökokeise haben neuerdings die Biokohle entdeckt, und auch immer mehr Wissenschaftler preisen sie als Grundlage einer schonenden, umweltverträglichen Landwirtschaft. Aus pflanzlichen Ausgangsmaterialien durch Verschwelen unter Luftabschluss gewonnen, sei sie das ideale Mittel zur nachhaltigen Bewirtschaftung des Bodens. Die Idee stammt ursprünglich

von einer versunkenen Kultur im Amazonasgebiet. Indianischen Ureinwohnern war es dort vor Jahrtausenden gelungen, mit speziell behandelten organischen Abfällen einen Teil der kargen Böden in fruchtbare »Terra preta« (»schwarze Erde«) umzuwandeln. In den 1960er Jahren entdeckte der Niederländer Wim Sombroek diesen Bodentyp und untersuchte, wie dessen

positive Eigenschaften zu Stande kamen. Einige davon, etwa die Ertrag steigernde Wirkung, brachten er und seine Kollegen mit der Zutat Kohle in Verbindung. So erhöht sie den pH-Wert des Bodens, wodurch dieser größere Mengen an positiv geladenen Ionen und anderen Nährstoffe speichern kann.

Doch Biokohle hat einen weiteren Vorzug, der sie speziell in Zeiten des Klimawandels noch wertvoller macht: Würde man ein Drittel der Ernteabfälle verschwelen und wieder auf den Anbauflächen ausbringen, so rechnet der Bodenkundler Johannes Lehmann von

Biokohle (links) verbessert den Boden, steigert die Erträge und senkt die Freisetzung von klimaschädlichem Lachgas. Im Elektronenmikroskop (rechts) werden die feinen Poren sichtbar, die zu ihren besonderen Eigenschaften beitragen.



der Cornell University in Ithaca (New York) vor, ließen sich jährlich zwischen 10 und 20 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen einsparen. In erster Linie beträfe dies das Kohlendioxid, das die Pflanzen während ihres Wachstums in Biomasse umgewandelt haben. In Form von Kohle verbliebe es für viele hundert Jahre im Boden. Zudem regt die Biokohle das umgebende Material zur Humifizierung an, wodurch noch mehr Kohlenstoff unter unseren Füßen gespeichert würde.

Problematischer Stickstoffdünger

Des Weiteren haben Forscher schon mehrfach berichtet, dass mit Kohle versetzte Böden auch deutlich geringere Mengen anderer Treibhausgase emittieren – insbesondere weniger Distickstoffmonoxid, besser bekannt als Lachgas. Dieses heizt die Atmosphäre fast 300-mal stärker auf als Kohlendioxid. Seine Hauptquelle ist die Landwirtschaft, die für rund drei Viertel der Lachgasemissionen verantwortlich ist. Auf die Felder ausgebrachter Stickstoffdünger dient Mikroorganismen im Boden als Nahrungsbestandteil. Diese wandeln das enthaltene Nitrat bei ihrem Energiestoffwechsel in gasförmige Produkte um – je nach den Bedingungen in elementaren Stickstoff oder eben Distickstoffmonoxid.

Doch wie kann die Zugabe von Biokohle die Lachgasemissionen aus dem Boden senken? Ein Forscherteam um Sebastian Behrens und Andreas Kappeler von der Universität Tübingen hat nun eine mögliche Antwort gefunden (*The ISME Journal* 2013; doi:10.1038/ismej.2013.160): Demnach spielen Mikroben auch bei diesem Prozess die Schlüsselrolle. »Der Zusatz von Biokohle verändert die Bodeneigenschaften derart, dass Anzahl und Aktivität von Lachgas abbauenden Bakterien zunehmen«, erläutert Behrens.

Unter seiner Betreuung vermischten die Tübinger Geomikrobiologen Johannes Harter und Hans-Martin Krause zusammen mit Kollegen der Universität Hohenheim unterschiedliche Mengen von Kohle, die sie aus Grünschnitt durch Erhitzen auf 700 Grad

Celsius in einem Ofen ohne Luftzutritt hergestellt hatten, mit Erde. Um die Nitrat abbauenden Bakterien zur Produktion von Lachgas anzuregen, gaben die Forscher Ammoniumnitrat und einen organischen Kohlenstoffdünger zu.

Anschließend untersuchten sie über drei Monate hinweg, wie viel Distickstoffmonoxid jeweils in die Luft abgegeben wurde. Dabei zeigte sich ein klarer Zusammenhang zwischen der Emission von Lachgas und der Zahl und Aktivität der es abbauenden Mikroben: Einen Tag nach der Düngergabe setzten Böden mit zehn Gewichtsprozent Biokohle weniger als ein Dreißigstel der Gasmenge frei, die Kontrollen ohne die Beimengung produzierten. Parallel dazu stieg die Aktivität des einzigen bisher bekannten mikrobiellen Gens, dessen Proteinprodukt das Treibhausgas abbauen kann, kurzfristig um das Sechsfache an.

Obwohl diese Effekte nur wenige Tage anhielten, können sie in der Umwelt durchaus von Bedeutung sein. »In Ackerböden beobachten wir immer dann einen kurzfristigen Anstieg der Lachgasemissionen, wenn größere Mengen an Nährstoffen verfügbar werden – also beispielsweise nach einem Regen oder nach dem Düngen«, sagt Harter. »Was dabei an Distickstoffmonoxid in die Luft gelangt, kann einen erheblichen Anteil der jährlichen Emissionen ausmachen. Das haben wir mittlerweile auch direkt gemessen. Mit Pflanzenkohle behandelte Testfelder setzen im Mittel stets weniger Lachgas frei als Kontrollfelder, und die Emissionen lassen sich gut mit der Menge an Niederschlag und aufgebrachtem Düngemittel korrelieren.«

Die positive Wirkung der Biokohle auf Lachgas abbauende Bakterien erklären sich die Wissenschaftler unter anderem damit, dass sie sauerstofffreie Kleinstlebensräume schafft. Zudem erhöht sie den pH-Wert des Bodens. Beides begünstigt solche Mikroben, die Lachgas abbauen. Außerdem existieren Hinweise darauf, dass Biokohle die Kommunikation der Mikroorganismen im Boden beeinflussen kann, indem sie die Signalmoleküle bindet, welche die



Andreas Jahn (Hrsg.)

Wie das Denken erwachte

Die Evolution des menschlichen Geistes

Wie entstanden unser Denken und unsere Sprache? Wie intelligent sind wir wirklich? Was empfinden wir als attraktiv?

Fragen, die dieses Buch auf wissenschaftlich fundierte und gleichzeitig unterhaltsame Weise beleuchtet. Über alle Fachgebiete hinweg beleuchten renommierte Verhaltensforscher, Genetiker, Psychologen, Philosophen und Biologen, dass unser Denken und Verhalten auf unserem biologischen Erbe beruhen: Der Mensch ist ein Kind der Evolution. Erfahren Sie, wie und wieso wir wurden, was wir heute sind.

„Wie das Denken erwachte“ empfiehlt sich allen Leserinnen und Lesern, die an Neurowissenschaften und Evolution interessiert sind. Das Buch ist gleichzeitig ein spannender Fundus für Psychologen und Naturwissenschaftler.

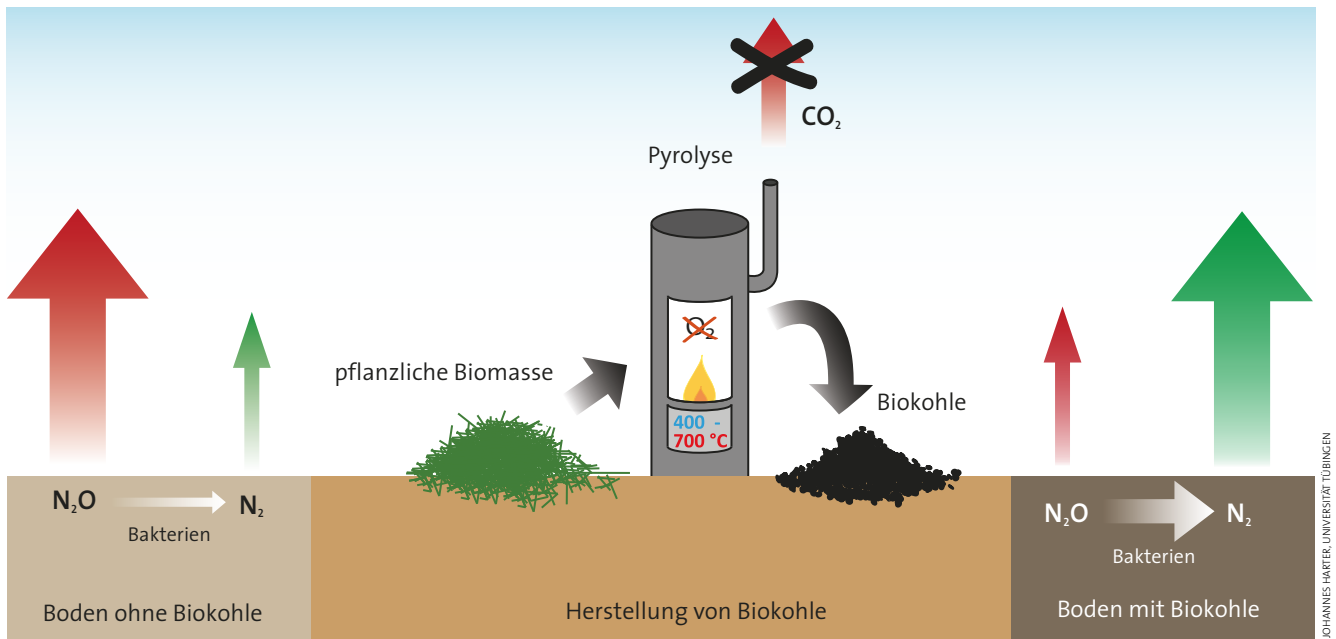
2012. 158 Seiten, 26 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)
ISBN 978-3-7945-2869-1

Jetzt bestellen!

Internet: www.schattauer.de/shop
E-Mail: order@schattauer-shop.de



Irrtum und Preisänderungen vorbehalten.



Biokohle entsteht durch Verschmelzung von pflanzlicher Biomasse bei hohen Temperaturen unter Luftabschluss. In den Boden eingearbeitet, regt sie Bakterien zum Abbau des Treibhausgases Distickstoffmonoxid (N₂O) an. Dabei entsteht gasförmiger Stickstoff (N₂), der Hauptbestandteil von Luft.

Kleinstlebewesen aussenden. »Die genauen Mechanismen, wie die Biokohle Bakterien zum Abbau von Lachgas animiert, sind aber noch nicht völlig geklärt«, räumt Behrens ein.

Für die Landwirte hat der Wissenschaftler konkrete Tipps, wie sie durch den Einsatz von Biokohle, die inzwi-

schen auch schon industriell hergestellt wird, die Erträge steigern und gleichzeitig den Ausstoß von Treibhausgasen senken können. So empfiehlt er, die verschmelten Pflanzenreste zunächst mit Dünger oder Kompost zu vermischen, um sie mit Nährstoffen zu beladen, damit sie diese nicht dem

umgebenden Boden entziehen. »Unter Feldbedingungen ist es realistisch, zwei bis fünf Gewichtsprozent an Kohle einzubringen, also ein Fünftel bis halb so viel wie in unserem Experiment«, meint Behrens. Wenn der hoch gelobte Stoff auch nur die Hälfte dessen erfüllt, was man sich von ihm verspricht, wäre das ein bedeutender Beitrag zum Schutz von Boden und Klima.

Maren Emmerich ist promovierte Mikrobiologin und forscht derzeit in Uppsala an der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften.

WAHRNEHMUNG

Lichte Zukunft für Hörprothesen

Da Licht besser fokussierbar ist als elektrischer Strom, könnte es Tauben zu einem wesentlich naturgetreueren Höreindruck verhelfen als heutige Cochlea-Implantate. Ein erster Versuch bei Nagern verlief erfolgreich.

VON TOBIAS MOSER

Schwerhörigkeit ist die häufigste Erkrankung der menschlichen Sinne. Wenn Hörgeräte nicht mehr helfen, lassen sich akustische Signale durch Cochlea-Implantate auf elektrischem Weg direkt, an den defekten Haarsinneszellen der Hörschnecke vorbei, zu den

Nervenzellen der Hörschnecke leiten und dort in Nervenimpulse übersetzen. Mehr als 200 000 Schwerhörige weltweit nutzen inzwischen diese in den 1970er Jahren entwickelte Hörprothese. Damit gilt sie als erfolgreichste Neuroprothese überhaupt.

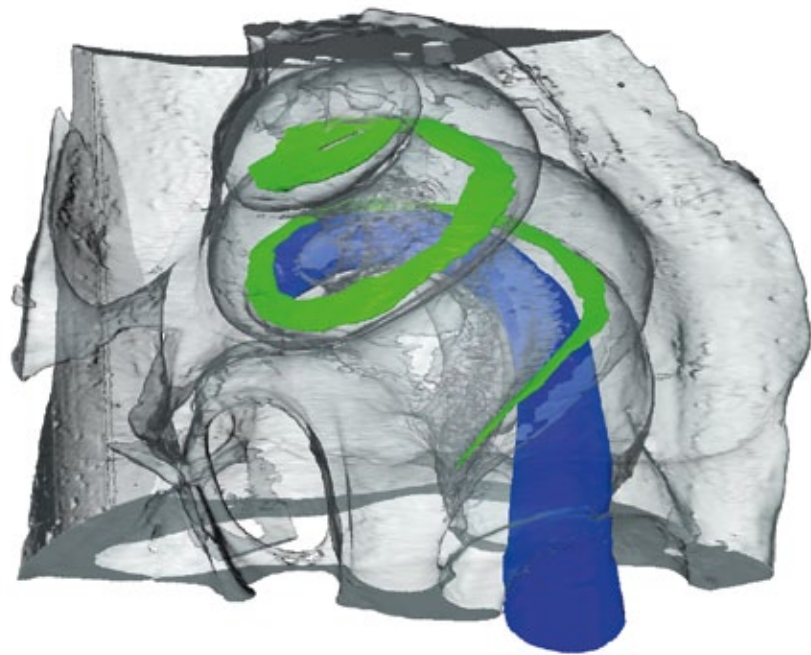
Ihre Funktionsweise ist leicht zu erklären. Der per Mikrophon aufgenommene Schall wird in Echtzeit elektronisch verarbeitet und dabei in Signale zerlegt, die nach Frequenz sortiert sind und die Information über die Schallintensität im jeweiligen Frequenzband enthalten.

Diese werden anschließend über 12 bis 24 Elektrodenkontakte entlang der Hörschnecke an die Hörnervenzellen übertragen.

Cochlea-Implantate ermöglichen es den meisten Benutzern, Sprache zu verstehen. Leider ist die Hörqualität aber schlecht. Das liegt an der weiträumigen Ausbreitung des elektrischen Stroms von jedem der Elektrodenkontakte, wodurch stets zu viele Hörnervenzellen im Umkreis mit angeregt werden. Auf diese Weise ist die Zahl der unabhängigen Stimulationskanäle noch viel kleiner als die der vorhandenen Elektrodenkontakte, was die Unterscheidung von Tonhöhen und Lautstärken stark einschränkt.

Licht bietet eine Lösung für dieses grundsätzliche Problem, da es besser fokussierbar ist und deshalb auf eine kleinere Gruppe von Hörnervenzellen einzuwirken vermag als elektrischer Strom. In künftigen Cochlea-Implantaten könnten so vermutlich mehr als 100 Lichtquellen unabhängig voneinander optische Informationen über den Schall zur Hörschnecke übertragen. Tonhöhen und Lautstärken wären dann viel genauer wahrnehmbar, und schwerhörige Menschen kämen in den Genuss eines wesentlich differenzierteren und natürlicheren Höreindrucks.

Nervenzellen sind zwar normalerweise nicht lichtempfindlich. Ernst



INNENOHRLABOR, UNIVERSITÄTSMEDIZIN GÖTTINGEN

Bei einem Test brachten Forscher ein etwa 0,3 Millimeter dickes verkapseltes LED-Implantat (blau) in die Paukentreppe der Hörschnecke (grau) einer Ratte. Die Abbildung basiert auf einer Röntgen-Phasenkontrast-Tomografie. Die grüne Struktur stellt die Basilarmembran mit dem sensorischen Corti-Organ dar, die nicht über den gesamten Verlauf rekonstruiert werden konnte.

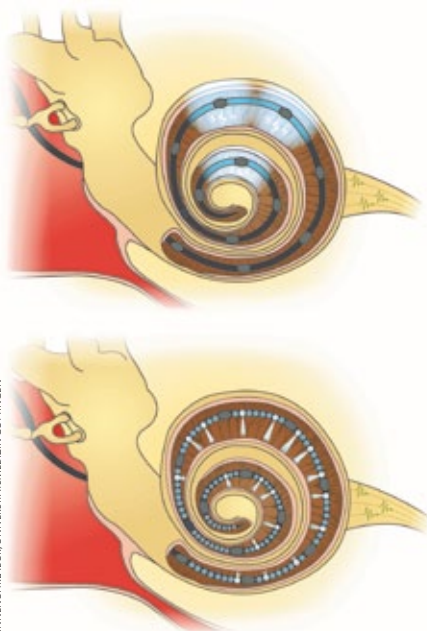
Bamberg vom Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt, Georg Nagel von der Universität Würzburg und Peter Hegemann von der Humboldt-Universität Berlin haben jedoch Proteine aus Algen, so genannte Kanalrhodopsine, isoliert und charakterisiert, die als lichtgesteuerte Schalter in Neuronen dienen können. Dazu müssen die zugehörigen Gene in die Cochlea-Zellen eingeführt werden. Als Überträger eignen sich beispielsweise »entschärfte« Viren, die keine Gefahr mehr für den Empfängerorganismus darstellen. In der Augenheil-

kunde werden sie bereits im Rahmen klinischer Studien zur Behandlung genetisch bedingter Blindheit eingesetzt. Eine erste optogenetische Studie am Ohr von Nagetieren hat nun den Nachweis geliefert, dass die optische Stimulation der Hörschnecke in der Tat möglich ist (*Journal of Clinical Investigation*, doi:10.1172/JCI69050, 10.2.2014).

Diese Untersuchung fand im InnenohrLabor der HNO-Klinik an der Universitätsmedizin Göttingen statt und war Teil eines von 2008 bis 2013 laufenden multidisziplinären Projekts, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Dabei verwendeten meine Kollegen und ich Mikroleuchtdioden (Mikro-LEDs) oder Mikrolichtleiter, um genetisch übertragene Kanalrhodopsine in den Neuronen der Hörschnecke anzuregen und so Nervenimpulse im Hörnerv auszulösen.

Da es zunächst nur darum ging, die prinzipielle Machbarkeit des Verfahrens zu demonstrieren, stimulierten wir die Hörschnecke lediglich an einer einzigen Stelle. Das dabei erzeugte Ner-

Bei heutigen Cochlea-Implantaten übertragen 12 bis maximal 24 Elektroden das elektrisch kodierte Schallsignal auf nur wenige Punkte der Hörschnecke (oben). Der Stromimpuls aktiviert dabei Nervenzellen im weiten Umkreis der jeweiligen Elektrode. Künftige optische Implantate sollen mit mehr als 100 LEDs eine sehr viel spezifischere Anregung wesentlich kleinerer Areale in der Hörschnecke ermöglichen, was die Hörqualität stark verbessern würde.



INNENOHRLABOR, UNIVERSITÄTSMEDIZIN GÖTTINGEN

vensignal wiesen wir nach, indem wir die elektrischen Hirnstammpotenziale ableiteten. Der beobachtete Ausschlag nach einem Lichtreiz verriet, dass auch in tauben Tieren das Hörsystem aktiviert wurde. Zudem konnten wir mit Ableitungen aus dem Mittelhirn der Mäuse zeigen, dass sich mit Licht tatsächlich kleinere Abschnitte der Hörschnecke ansprechen lassen als mit elektrischem Strom. Nach dieser gelungenen Machbarkeitsstudie ist es nun möglich, die optogenetische Stimulation für die Hörforschung an Tieren zu nutzen und für eine spätere klinische Anwendung beim Menschen vorzubereiten.

Der Weg zum Einsatz beim Menschen

Dazu sind bereits diverse Vorhaben an mehreren Instituten angelaufen. Zusammen mit Optogenetikern wie Bamberg und Edwin Boyden vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge bemühen wir uns in Göttingen um Kanalrhodopsine, die eine möglichst naturgetreue Reizung der Hörnervenzellen mit geringer Lichtstärke erlauben. Im InnenOhrLabor ar-

beiten wir ferner an effizienten und sicheren Wegen für den Gentransfer, die wir zunächst an Tieren erproben.

Parallel dazu entwickeln Wissenschaftler am Freiburger Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik und am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg unter der Leitung von Ulrich Schwarz und Patrick Ruther neuartige flexible Mikro-LED-Cochlea-Implantate, die selbst in den Hörschnecken kleiner Nagetiere eine Anregung mit über 100 Stimulationskanälen ermöglichen sollen. Ziel ist es, beim Menschen Exemplare mit hunderten Mikro-LEDs zu realisieren.

Vor ersten klinischen Tests gilt es, das Einpflanzen, die Funktion und Stabilität der Geräte an Tieren zu erproben. In den Funktionsstudien messen wir die Zeit-, Frequenz- und Intensitätsauflösung des kodierten Schalls bei optischen Mehrkanalimplantaten und vergleichen sie mit der beim normalen Hören und bei elektrischen Hörprothesen. Im Anschluss an diese physiologischen Experimente fertigen wir zusammen mit Göttinger Röntgenphysikern um Tim Salditt höchstauflösende Röntgenaufnahmen an, um die Lage der op-

tischen Implantate und ihrer Lichtquellen in der Hörschnecke zu ermitteln. Schließlich sind mikroskopische Gewebeuntersuchungen vorzunehmen, die Aufschluss über eventuelle Schädigungen durch Genfähnen, Fremdprotein oder Lichtstimulation geben.

In der Augenheilkunde führen Forscher seit einigen Jahren klinische Studien zur Therapie der erblichen frühkindlichen Netzhautdystrophie durch, bei denen das defekte Gen für das Enzym RPE65 durch eine intakte Version ersetzt wird. Die ermutigenden Resultate dieser Tests bestärken uns in der Hoffnung, dass Ähnliches auch bei optogenetischen Cochlea-Implantaten gelingt. Bis zu ersten klinischen Studien sind jedoch noch viele vorbereitende Untersuchungen an Tieren nötig.

Tobias Moser ist Arzt für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde und Sinnesphysiologe an der Universitätsmedizin Göttingen. Er leitet dort das InnenOhrLabor und die Audiologie an der Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, den Sonderforschungsbereich 889 »Zelluläre Mechanismen sensorischer Verarbeitung« und das Doktorandenprogramm »Sensorische und motorische Neurowissenschaften«.

MEDIZIN

Die Geschichte des Choleraerregers

Ein Stück Darm eines 1849 verstorbenen Amerikaners lieferte DNA des Bakteriums, das für eine der großen Choleraepidemien verantwortlich war. Der Vergleich mit moderneren und heutigen Stämmen ermöglicht Rückschlüsse auf die Evolution dieses immer noch verheerenden Erregers.

VON MAREN EMMERICH UND LUISE LOGES

Als die Cholera im 19. Jahrhundert wieder und wieder Europa und rasch auch die Neue Welt heimsuchte, standen ihr die Menschen hilflos gegenüber. Gerade die protestantische Oberschicht in Amerika hielt die neue Seuche für eine Strafe Gottes, kam sie doch aus dem heidnischen Indien und wütete besonders verheerend in der muslimischen Welt und dem überwiegend katholischen Europa. In den ame-

rikanischen Großstädten fielen ihr hauptsächlich Schwarze und Arme zum Opfer. Wegen des enormen Wasser- und Elektrolytverlusts durch anhaltende, extrem starke Durchfälle starben viele Erkrankte bereits nach Stunden oder wenigen Tagen.

Schon damals versuchten Mediziner, die Ursache der Cholera aufzuklären und die Ansteckungswege zu verstehen. Zu ihnen gehörte der englische Arzt

John Snow (1813–1858). Er wies 1854 nach, dass verunreinigtes Trinkwasser schuld war – eine Idee, die sich allerdings zunächst ebenso wenig durchsetzte wie der kurz vorher aufgekommene Verdacht, dass die Infektion von Mikroorganismen verursacht wird, die ein Kranker massenhaft ausscheidet. Erst Robert Koch (1843–1919) konnte die Zweifel ausräumen, als er 1883 in Ägypten den »Kommabazillus« isolierte.

Mehr sehen. Mehr erfahren.
Mehr GEO.



Auch als eMagazine.



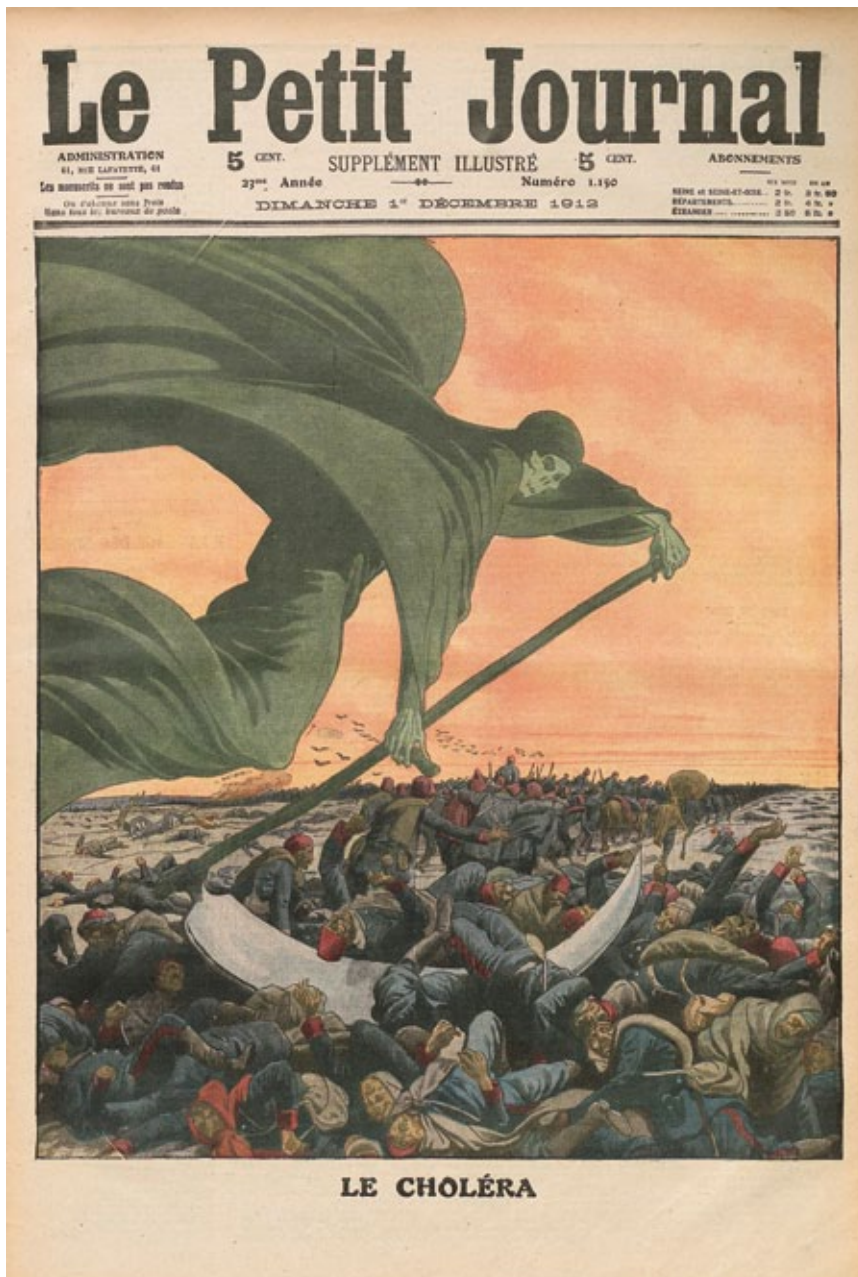
Aber warum sorgte der Erreger – *Vibrio cholerae* – so plötzlich seit dem frühen 19. Jahrhundert für weltweite Seuchen? Die Krankheit ist offenbar auf dem indischen Subkontinent im Golf von Bengalen zu Hause. Dort überleben die Choleraerregern in warmen Gewässern. Als die britische East India Company die reiche Provinz Mitte des 18. Jahrhunderts eroberte, infizierten sich Soldaten. Die Bengalen selbst suchte 1781 eine schwere Epidemie heim, weil die Bevölkerung unter der Schreckensherrschaft eines Gouverneurs verelendete. Der Koloni-

alismus mit seinen zunehmenden weltweiten Handelsbeziehungen, aber auch militärische Bewegungen leisteten der Verbreitung in andere Regionen offenbar seit Anfang des 19. Jahrhunderts Vorschub. Bereits in den frühen 1830er Jahren brachten irische Auswanderer die Seuche nach Nordamerika. In Städten wie Wien, London, Paris oder Hamburg, New York oder Philadelphia war verdrecktes Wasser ein wesentlicher Infektionsherd. Meist wurden die Abwässer ungeklärt direkt in die Flüsse geleitet, die Trinkwasser lieferten.

Unbekannt war allerdings bisher, ob der Erreger im 19. Jahrhundert neu aufgetreten, bereits im späten Mittelalter erschienen war oder sogar schon aus der frühen Menschheitsgeschichte stammte. Bislang hatten Mikrobiologen die Bakterien der ersten Pandemien nicht aufspüren können, weil sie nur im Darm von Infizierten leben und sich bald zersetzen. Bei den heutzutage kreisenden Erregern unterscheiden Forscher einen »klassischen« Typ und einen »El-Tor«-Typ. Bis etwa zur Mitte des 20. Jahrhunderts dominierten bei größeren Epidemien meist Stämme vom klassischen Typ. Seitdem treten dagegen überwiegend El-Tor-Stämme in den Vordergrund. Dieser Typ wurde erst Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckt. Sein Name bezieht sich auf eine ägyptische Quarantänestation für Mekkaheimkehrer. Nach neueren Untersuchungen verhält er sich weniger aggressiv als der klassische Typ. Schon deswegen vermuten Experten, dass im 19. Jahrhundert in erster Linie Varianten vom klassischen Typ grassierten. Doch welche Eigenschaften besaßen sie?

Eine Untersuchung von Wissenschaftlern um den Evolutionsbiologen Hendrik Poinar von der McMaster University in Hamilton (Ontario, Kanada) hilft nun weiter (*The New England Journal of Medicine* 370, S. 334–340, 2014). Es gelang ihnen, aus dem in Alkohol konservierten Darm eines Afroamerikaners, der 1849 in Philadelphia der mutmaßlich zweiten Pandemie erlag, DNA der Mikrobe zu gewinnen und zu analysieren. Dieses Erbgut verglichen sie zum einen genau mit moderneren Stämmen des klassischen Typs, zum anderen aber auch mit El-Tor-Stämmen.

Tatsächlich ähnelte der historische Erreger sehr dem klassischen Typ und



Cover des »Petit Journal«, Dezember 1912. Die Grafik bezieht sich auf einen Ausbruch unter osmanischen Soldaten in Catalca bei Istanbul. Bei der dortigen Schlacht starben, wie das Magazin anmerkt, mehr Soldaten durch die Cholera als durch Kampfhandlungen.

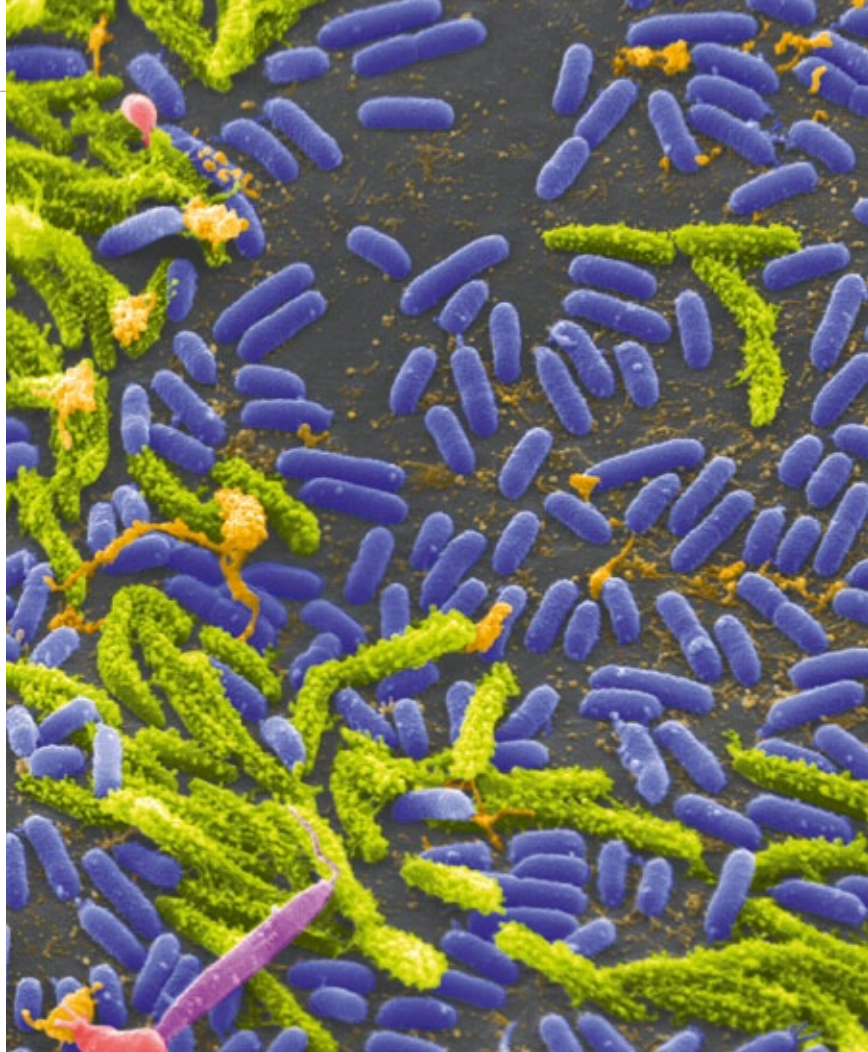
passt nicht zu den El-Tor-Stämmen. Ein Vergleich mit dem »klassischen« Auslöser der Cholera von 1965 ergab nur drei bis fünf Prozent abweichendes Erbmateriale. Im Lauf der Zeit hat sich das Waffenarsenal der Mikrobe allerdings verringert. Wie die Forscher feststellten, befinden sich die Erbsequenzen für das Cholera-toxin, das die heftigen Durchfälle auslöst, zwar bei beiden Stämmen an der gleichen Stelle im Genom. Jedoch besaß der moderne Stamm zwei der entscheidenden Gene, der alte Stamm dagegen mindestens drei, vielleicht sogar vier Ausführungen.

Das eigentliche Problem stammt von Bakteriophagen

Wie Forscher Mitte der 1990er Jahre entdeckten, handelt es sich bei den Toxingenen gar nicht um ureigenes bakterielles Material. Vielmehr erhalten Cholera-bakterien diese DNA von sie infizierenden Viren – auch Bakteriophagen genannt. Deswegen sind längst nicht alle Vertreter von *Vibrio cholerae* dem Menschen gefährlich. Sie unterscheiden sich überdies teils deutlich in ihrer Empfänglichkeit für die Virusinfektion. El-Tor-Stämme sind meist anscheinend weniger leicht infizierbar.

Das Cholera-toxin enthält zwei Bausteine: Einheit A und Einheit B. Mit letzterer dockt das komplexe Molekül an Darmzellen an, woraufhin es in die Zelle gelangt. Einheit A löst sich nun ab und veranlasst die Zelle, große Mengen negativ geladene Chloridionen nach außen abzugeben. Zum Ladungsausgleich fließen positiv geladene Natriumionen nach – sowie Wasser, da Zellen die Konzentration gelöster Salze innerhalb und außerhalb der sie umgrenzenden Membran möglichst im Gleichgewicht halten. Manche Cholera-patienten verlieren so innerhalb eines Tages 20 Liter Flüssigkeit. Und mit dem Wasser scheiden sie gleichzeitig eine Fülle an Vibrionen aus, die sich so weiterverbreiten können.

Aus den Erbgutvergleichen schloss das Team um Poinar auf die Evolutionsgeschichte des Erregers. Frühere Schätzungen anderer Forscher zum Zeitpunkt der Abspaltung der modernen



NIH/TINA CARVALHO, UNIVERSITY OF HAWAII AT MANOA

Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Cholera-bakterien (*Vibrio cholerae*; im Bild blau), die nachträglich im Computer eingefärbt wurde.

Linien von *Vibrio cholerae*, die unterschiedliche, teils auch nur vermutete Eigenschaften von frühen Erregervarianten berücksichtigten, hatten zwischen 130 und 50 000 Jahren geschwankt. Nach den neuen Berechnungen von Poinar dürfte der letzte gemeinsame Vorfahr aller heutigen pathogenen Stämme, also auch der klassischen und der El-Tor-Stämme, vor mindestens 430 bis 440 Jahren existiert haben. Jedoch halten die kanadischen Forscher dieses Alter für zu niedrig – die Schätzung beruht allein auf der Austauschrate von Nukleotiden. In einer alternativen Berechnung, bei der sie andere Mutationsereignisse einbezogen, kamen sie auf ein Abspaltungsalter in der Größenordnung von Jahrtausenden. Seitdem hätte es die beiden Erregertypen folglich nebeneinander gegeben, das heißt auch Choleraerkrankungen. Diese Zeiteinschätzung kann der Paläogenetiker Jo-

hannes Krause von der Universität Tübingen auf der Basis der Genomdaten nicht ganz nachvollziehen. »Das ist ein ziemlich schwacher Punkt in der Publikation«, meint er.

Historische Quellen sprechen allerdings dafür, dass in Indien im Delta von Ganges und Brahmaputra Menschen tatsächlich schon im Mittelalter und in der Antike von Cholera heimgesucht wurden. Zum Beispiel brach 1325 in Delhi unter den Muslimen nach dem Fest des Fastenbrechens eine Welle von schweren Durchfallerkrankungen mit den typischen Cholerasymptomen aus. Sehr ähnliche Fälle mit Todesopfern selbst unter Adligen schildert der persische Arzt Avicenna (eigentlich: Ibn Sina, 980–1037 n. Chr.), der Bengalen in der Zeit der ersten muslimischen Herrscher Indiens bereiste. Und auch antike Schriften, die auf den indischen Arzt Caraka zurück-

Der Utopie eine Chance!

Alternative Energie für Entwicklungsländer

Während in den wohlhabenden Industrieländern das Rauchen zunehmend geächtet wird, sitzen Millionen Menschen in Asien und Afrika über offenem Feuer und inhalieren die Abgase von Holz, Holzkohle und Kerosin. Das tun sie im Unterschied zu Nikotinkonsumenten nicht zum Vergnügen, sondern weil sie keinen anderen Zugang zu Licht und Wärme haben. Nach einer Schätzung der Weltgesundheitsorganisation WHO sind durch das Einatmen des Rauchs von primitiven Kochstellen und Kerosinlampen im Jahr 2012 weltweit mehr als vier Millionen Menschen vorzeitig gestorben. Damit fordert die vorindustrielle Technik der privaten Energieversorgung in den armen Ländern mehr Todesopfer als Malaria, Tuberkulose und Aids zusammen (*»Burden of Disease from Household Air Pollution for 2012«, WHO 2014*).

Die nächstliegende Antwort auf dieses Elend ist forcierte Industrialisierung – und diesen Weg haben die meisten Staaten der Dritten Welt nach dem Ende der Kolonialzeit auch einzuschlagen versucht. Natürlich, so könnte man achselzuckend feststellen, müssen sie dafür eben denselben ökologischen Preis zahlen, den wir in den Industriestaaten längst entrichtet haben. So gesehen wäre die dicke Luft in Peking oder der Smog in Neu-Delhi nur eine späte Reprise des berühmten Londoner Nebels, in dessen Schutz im 19. Jahrhundert Jack the Ripper mordete. Also habt nur Geduld, könnte man zynisch fortfahren: Heute ist die Luft in London klar und frisch wie am Meer, und auch der noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts von den Schloten der Stahlwerke stets grau verhangene Himmel über der Ruhr erstrahlt inzwischen – so der Wettergott gnädig ist – in schönstem Blau.

Doch Wissenschaft und Technik verharren nicht mehr auf dem Stand von vor 100 Jahren, und Nachkommen müssen nicht alle Fehler der Vorfahren wiederholen. In diesem Sinn hat es mich angenehm überrascht, in mehreren Großstädten der chinesischen Provinz Sezuang nur noch elektrisch betriebene Motorräder, Mofas und Dreiradtaxis anzutreffen.

Freilich fährt der in China rapide anwachsende Autoverkehr wie gehabt mit Benzin, und die Elektroenergie kommt aus fossilen Kraftwerken. Die Hoffnung, Afrika und Asien könnten den reichen Ländern ein Beispiel geben und von Beginn an nur saubere Energiequellen wie Sonne, Wind und Wasserkraft nutzen, mutet denn auch utopisch an. Noch immer kochen und heizen fast drei Milliarden Menschen mit Holz, Dung und Kohle, darunter ein Drittel der Bevölkerung Chinas. Und jede Verbesserung des Zugangs zu industriell – ob fossil oder nachhaltig – erzeugter Energie droht gleich wieder vom Bevölkerungswachstum aufgezehrt zu werden.

Darum versprechen sich führende Energieexperten der UNO wie Reid Detton und Richenda van Leeuwen mehr von dezentralen Lösungen, vor allem für relativ dünn besiedelte Regionen in der Dritten Welt (*Nature 508, S. 309–311, 2014*). Sie nehmen sich am Mobilfunk ein Beispiel: Zwei von drei Afrikanern nutzen angesichts des schleppenden Ausbaus der Telefonfestnetze inzwischen ein Handy. Ähnlich könnten auch dort, wo keine zentrale Stromversorgung existiert, Solarlaternen Licht spenden und mit Windkraft betriebene Pumpen Ackerland bewässern.

Erste Ansätze gibt es immerhin. So sorgen in afrikanischen Kreißsälen hier und da schon so genannte Solarkoffer für Unabhängigkeit vom unzuverlässigen Stromnetz; sie liefern Energie für Beleuchtung, Laptops und medizinische Geräte. Das erspart es Ärzten, notfalls sogar im Licht ihres Smartphones einen Kaiserschnitt durchführen zu müssen.



Michael Springer

gehen (wahrscheinlich um 300 v. Chr.), und andere in Sanskrit verfasste Texte beschreiben die Krankheit »Visūcikā«, die in der Region immer wieder etliche Menschen dahinraffte und bisweilen auf benachbarte Gegenden übersprang. Die erwähnten Symptome stimmen erstaunlich genau mit denen der Cholera überein: vom anhaltenden Brechdurchfall über die eingefallenen Gesichtszüge bis hin zum meist schnellen und tödlichen Verlauf. Bis heute bergen in vielen orientalischen Ländern gerade Feste mit Menschenansammlungen und gemeinsamem Essen bei mangelnder Hygiene eine große Ansteckungsgefahr.

Die siebte Pandemie ist noch nicht zu Ende

In der westlichen Welt haben Ärzte die Cholera heute weitgehend im Griff – nicht so jedoch in vielen anderen Gegenden. Der Erreger der so genannten siebten Pandemie, die 1961 in Indonesien aufflammte, ist noch immer nicht eingedämmt. Bei ihm handelt es sich – anscheinend erstmals bei einer Choleraepidemie – um einen El-Tor-Stamm. Er ist zwar weniger aggressiv als die klassischen Stämme, vermag allerdings Biofilme zu bilden, die sogar im Meer gedeihen. In Haiti forderte er nach dem Erdbeben von 2010 bislang fast 10000 Menschenleben. Dort handelt es sich um eine Variante, die das Toxin des klassischen Erregers produziert.

Poinar und seine Kollegen betonen in ihrer Studie, dass in vielen Museen und medizinischen Einrichtungen konservierte Präparate von Seuchenopfern lagern, an denen sich die Geschichte von Krankheitskeimen untersuchen ließe. Moderne Analysen historischer Erreger können auch in dieser Hinsicht dabei helfen, ihr Verhalten und die Anpassungen an den Menschen besser zu verstehen und die Erkenntnisse zum Beispiel bei Impfstoffen umzusetzen.

Maren Emmerich ist Mikrobiologin in Uppsala an der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften. Die Altertumswissenschaftlerin **Luise Loges** ist Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg und Tübingen.

JETZT NEU!

Die neue Gehirn und Geist-Digitalreihe: Ratgeber!



Nur
€ 2,49*



Ausgabe 1: Kommunikation und Rhetorik

Praktische Tipps und Methoden renommierter Trainer helfen Ihnen, klar zu formulieren, unterhaltsam zu präsentieren und in Meetings schlagfertig zu argumentieren. Den digitalen Ratgeber erhalten Sie in zwei verschiedenen PDF-Formaten:



Im Digital-Format:

Den **Gehirn und Geist**-Ratgeber erhalten Sie auch zusätzlich optimiert für digitale Endgeräte, Desktop, Tablet-PC und iPad.



Im Magazin-Format:

Wenn Sie einen Artikel aus dem **Gehirn und Geist**-Ratgeber zum Lesen ausdrucken möchten.

* Bezahlmöglichkeit



PayPal™

www.gehirn-und-geist.de/ratgeber

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen!



Wege durch die Blut-Hirn-Schranke

Forscher führen immer mehr Krankheiten auf Fehlfunktionen der Barriere zwischen Blutbahn und Gehirn zurück. Andererseits wollen sie diese Blut-Hirn-Schranke gezielt mit neuen Ansätzen durchbrechen, um Medikamente in das Gehirn einzuschleusen. Das könnte die Therapie von Krebserkrankungen und neurodegenerativen Störungen wie der Alzheimerdemenz revolutionieren.

Von Jeneen Interlandi

Bei einem seiner berühmten Gewebefärbexperimente stieß der deutsche Arzt und spätere Nobelpreisträger Paul Ehrlich (1854–1915) Ende des 19. Jahrhunderts auf ein Phänomen, das die Medizin bis heute beschäftigt: Er injizierte einer Maus einen Farbstoff ins Blut, der in die Gewebe aller Organe eindrang – mit Ausnahme des Gehirns. Unter dem Mikroskop erschienen Nieren, Leber und Herz danach violettblau, allein das Zentralnervensystem blieb weißlich gelb. Als jedoch einer seiner Studenten den Farbstoff direkt ins Hirn spritzte, passierte das genaue Gegenteil: Dieses wurde dunkel, die anderen Organe nicht. Der Forscher schloss, es müsse eine Barriere zwischen dem Gehirn und dem Blutstrom geben: die Blut-Hirn-Schranke.

Erst ein halbes Jahrhundert später gelang es, diese Barriere exakt zu identifizieren – was ein Mikroskop benötigte, das

etwa 5000-mal stärker vergrößerte als Ehrlichs Instrument. Denn sie verbirgt sich in den Wänden der Blutgefäße des Gehirns, die zusammengenommen über 600 Kilometer lang sind. Über feinstverzweigte Netzwerke versorgen die Adern jede einzelne der etwa 100 Milliarden Nervenzellen des menschlichen Gehirns und sind wie alle Blutgefäße von innen mit Endothelzellen ausgekleidet. Hier liegen diese Deckzellen jedoch viel dichter aneinander als im übrigen Körper; sie werden von besonderen Zellkontakten namens »Tight Junctions« (zu Deutsch: enge Verbindungen) zusammengeschweißt (siehe Grafik S. 27). Dies erklärt, weshalb weder Ehrlichs Farbstoff noch die meisten Medikamente aus dem Blut ins Hirngewebe gelangen.

Doch schon lange bevor sie diese Barriere sichtbar machen konnten, hatten Ärzte ihre Bedeutung erkannt. »Man war sich einig, dass sie wohl eine wichtige Funktion erfüllt und man sie besser nicht dabei stört«, sagt der Biologe Lester Drewes von der University of Minnesota, der sich auf die Erforschung der Blut-Hirn-Schranke spezialisiert hat.

Diese Haltung hat sich inzwischen geändert, denn die Mauer im Gehirn hat sich als höchst aktiv erwiesen. Zellen auf beiden Seiten – Blutstrom und Gehirn – kommunizieren unablässig miteinander und beeinflussen sich gegenseitig. Zudem regeln vielfältige molekulare Signalwege in der Endothelmembran den Grenzübergang, indem sie bestimmte Substanzen ausschließen und andere beim Durchtritt unterstützen. Sogar weiße Blutzellen, die lange als zu groß galten, um die Blut-Hirn-Schranke zu passieren, schlüpfen regelmäßig hindurch, um nach eingedrungenen Krankheitserregern Ausschau zu halten.

Die Forscher prägten daher den Begriff »neurovaskuläre Einheit«, um ihre Beobachtungen besser beschreiben zu können: Es handelt sich bei der Blut-Hirn-Schranke nicht einfach um eine Wandschicht aus Endothelzellen, sondern um ein aktives Organ, das aus vielen verschiedenen Zelltypen besteht.

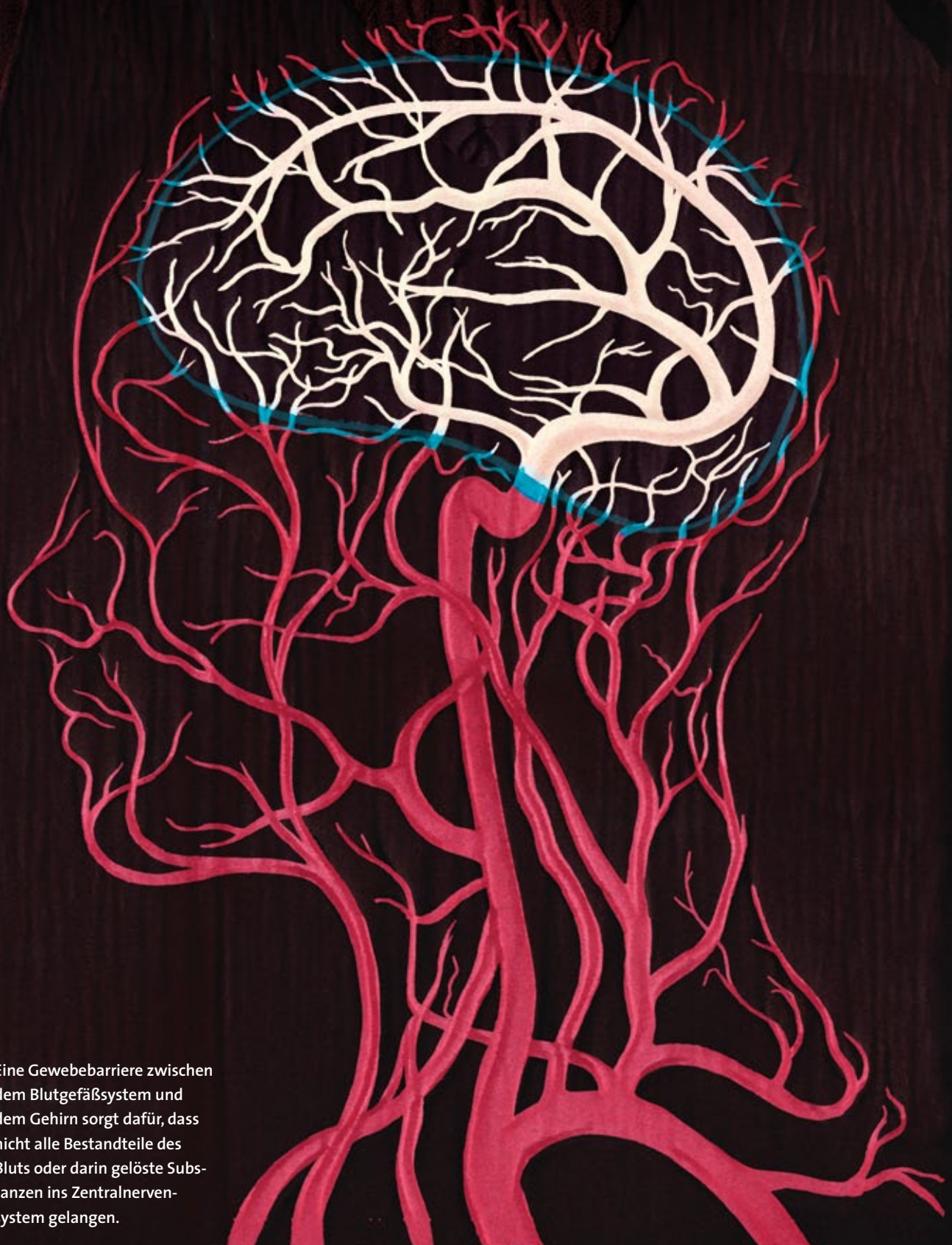
AUF EINEN BLICK

DIE GROSSE MAUER

1 Bei der **Blut-Hirn-Schranke** handelt es sich um eine schützende **Blutgefäßwand**. Die Zellen, die sie auskleiden, sind über so genannte **Tight Junctions** so eng miteinander verbunden, dass nur wenige Substanzen ins Hirngewebe vordringen können.

2 Die Schranke ist ein selbstständiges und **aktives Organ**, in dem Zellen intensiv miteinander kommunizieren. So entscheiden sie, welche Moleküle ausgeschlossen und welche aufgenommen werden. Fehler in ihrer Funktion können einer ganzen Reihe von **Erkrankungen** zu Grunde liegen, etwa multipler Sklerose oder Epilepsie.

3 Methoden, mit denen sich die Blut-Hirn-Schranke gezielt öffnen und schließen lässt, könnten die Heilung vieler Krankheiten ermöglichen. Dazu testen Forscher verschiedene Wege, etwa **hyperosmolare Mannitlösungen** oder **vibrierende Mikrobläschen**. Mittels »trojanischer Pferde« lassen sich zudem Medikamente auch ohne Öffnung der Schranke ins Gehirn bringen.



Eine Gewebebarriere zwischen dem Blutgefäßsystem und dem Gehirn sorgt dafür, dass nicht alle Bestandteile des Bluts oder darin gelöste Substanzen ins Zentralnervensystem gelangen.

ALEX NABAUM

Sie spielt eine entscheidende Rolle bei Entwicklungs- und Alterungsprozessen sowie bei verschiedensten Krankheiten.

Eine weitere Revolution in der Mikroskopie ermöglicht nun einen besonders faszinierenden Blick auf dieses Organ. Denn mit Hilfe ihres »Zweiphotonenmikroskops« kann Maiken Nedergaard an der University of Rochester im US-Bundesstaat New York das Gehirn einer lebenden, atmenden Maus beobachten. Dazu entfernt sie ein Stück des Schädels, spritzt einen Farbstoff in den Blutkreislauf und beobachtet dann die Blut-Hirn-Schranke in Echtzeit. Sie sieht etwa, wie einzelne Zellen aus dem Blut die Kapillarwände passieren – jene Schicht von Endothelzellen, die noch vor 20 Jahren, zu Beginn von Nedergaards Forscherlaufbahn, als undurchdringliche Barriere galt.

Perfekte Zusammenarbeit über die Grenze hinweg

Vor der Erfindung der Zweiphotonenmikroskope, die bis zu 300 Mikrometer tief in lebende Hirnrinde hineinblicken können, stand Forschern nur dieselbe Methode wie Paul Ehrlich zur Verfügung: totes Gewebe auf klassischen Objektträgern unter dem Mikroskop betrachten. Diese Untersuchungen gaben jedoch laut Nedergaard nur wenig Aufschluss über die Funktion der Blut-Hirn-Schranke. Denn der Blutstrom spielt hier eine entscheidende Rolle. So stimulierten Nedergaard und ihre Kollegen kürzlich in einer Reihe von Experimenten bestimmte Gruppen von Nervenzellen und stellten fest: Die umgebenden Blutgefäße erweiterten sich dabei sofort. Damit versorgten sie genau im dem Moment, da die Neurone zu feuern begannen, diese mit mehr Blut und damit auch mehr Nährstoffen. Bei abnehmender Reizung verengten sich die Gefäße wieder, und die Nährstoffzufuhr ging zurück. »Das ist unglaublich dynamisch«, meint Drewes.

Und auch äußerst komplex. Die Kapillaren sind nämlich von Astrozyten und Perizyten umschlungen – Zellen, die das gesamte Gefäßsystem umhüllen und offenbar die Kommunikation zwischen Blut, Endothel und Neuronen erleichtern. Um diese kreisen wiederum verschiedene andere Zellen, etwa die so genannte Mikroglia, die Abwehrzellen des Gehirns. Sie halten im Zentralnervensystem Ausschau nach geschädigten Zellen und infektiösen Partikeln, die sie dann aufnehmen und beseitigen. Fehlfunktionen der Mikroglia tragen möglicherweise zur Entstehung vieler neurodegenerativer Erkrankungen bei – von der Alzheimerdemenz bis hin zu Parkinsonkrankheit. Nedergaard mutmaßt, dass die Mikrogliazellen in diesen Fällen nicht in der Lage sind, die Blut-Hirn-Schranke ausreichend zu schützen.

Ihren Überlegungen zufolge entstehen jedes Mal vorübergehende Lecks in der Blut-Hirn-Schranke, wenn eine Endothelzelle stirbt – sei es aus natürlichen Gründen oder wegen einer Verletzung. Die übrigen Endothelzellen können sie nicht sofort schließen, da die Tight Junctions sie unflexibel miteinander verbinden. Deshalb muss ein anderer Zelltyp einspringen. Um herauszufinden welcher, durchlöchernte Nedergaard Blutkapillaren im Gehirn lebender Mäuse mit Laserstrahlen. Ergebnis: Bereits nach 10 bis 20 Minuten hatten Mikrogliazellen die geschädigten Abschnitte komplett umschlossen.

Ihr Team versucht nun eindeutig nachzuweisen, ob Mikrogliazellen tatsächlich wie eine schnelle Eingreiftruppe herbeieilen und die Lücken in der Barriere provisorisch abdichten, bis sich die geschädigten Endothelzellen erholt haben oder ersetzt sind. »Es ist gut vorstellbar«, so Nedergaard, »dass Nervengewebe abstirbt, wenn die Mikrogliazellen nicht ordnungsgemäß funktionieren und daher kleine Lecks zu langsam reparieren.« Allerdings ist dies nur eine von vielen Hypothesen, mit denen die Forscher die Rolle der Blut-Hirn-Schranke bei der Entstehung von Krankheiten zu erklären versuchen.

Eine andere betrifft die multiple Sklerose (MS) mit ihren schubförmig auftretenden Symptomen wie Muskelschmerzen, Lähmungen, Gefühls- und Sehstörungen. Wie schon seit Langem bekannt, entsteht die MS durch den Abbau der isolierenden Myelinhülle der Axone, die als signalleitende »Kabel« der Neurone dienen. Weshalb sie jedoch episodisch verläuft und was genau die Schübe auslöst, haben Forscher noch immer nicht vollständig verstanden. Kernspintomografische Untersuchungen legen nahe, dass MS-Attacken auf Lecks in der Blut-Hirn-Schranke zurückgehen. Durch diese Lücken gelangen zu viele Immunzellen aus den Kapillaren ins Hirngewebe, wo sie die Myelinhüllen angreifen. Einige neuere Studien legen nahe, dass so genannte reaktive Sauerstoffmoleküle die Blut-Hirn-Schranke schwächen. Entsprechend würden Antioxidanzien dann die Barrierefunktion stabilisieren. »Wir waren bisher stets der Auffassung, die multiple Sklerose sei eine Immunerkrankung«, sagt Drewes. »Inzwischen denken wir, dass es sich auch um eine Störung der Blut-Hirn-Schranke handeln könnte.«

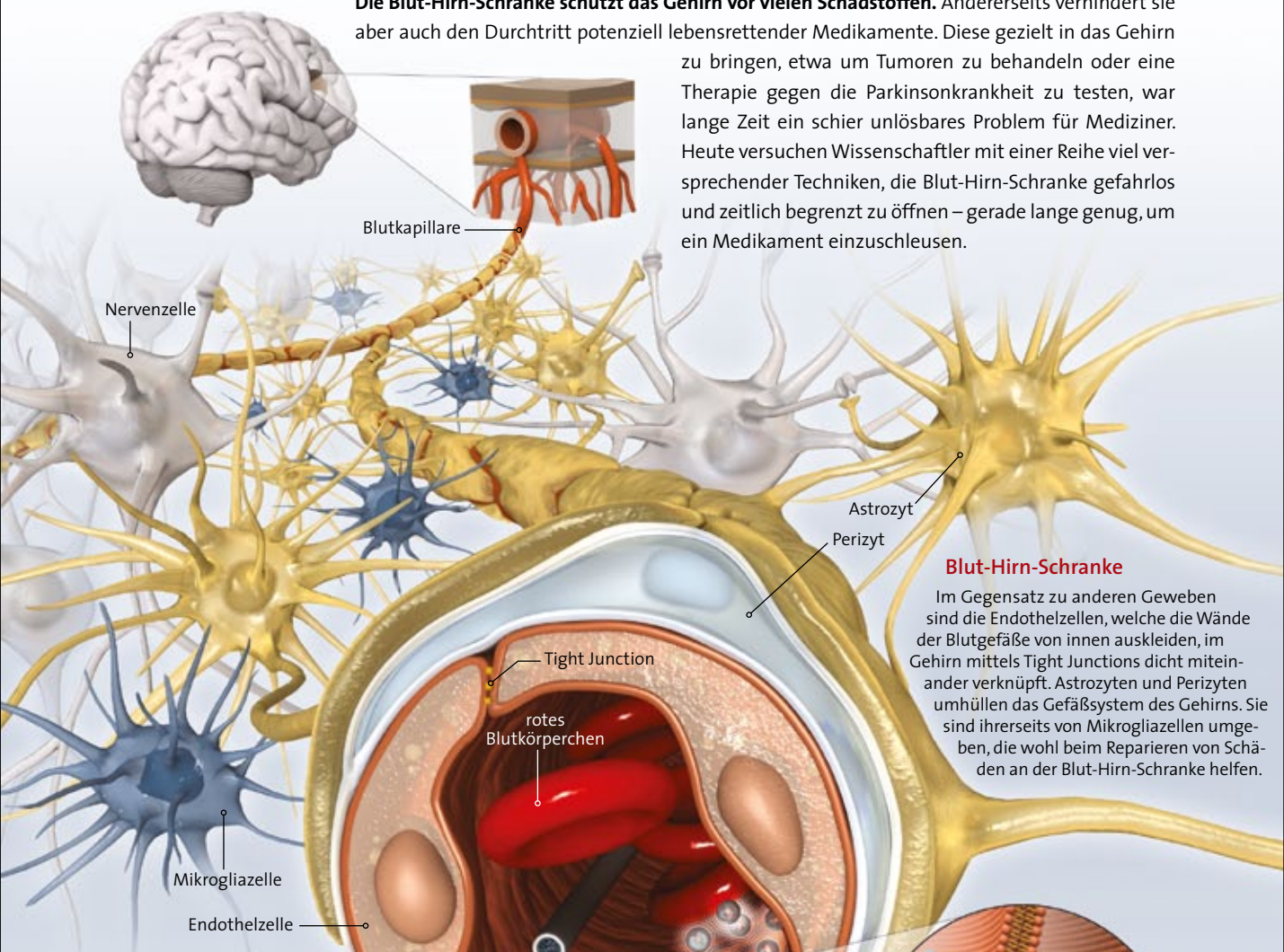
Ursache oder Folge?

Ähnliches scheint für die Epilepsie zu gelten. Ärzten und Wissenschaftlern ist schon länger bekannt, dass epileptische Anfälle mit vorübergehenden Lecks in der Blut-Hirn-Schranke einhergehen. Allerdings vermuteten die meisten bis vor Kurzem, die Defekte seien eine Folge der Anfälle und nicht ihre Ursache. Allmählich verändert sich jedoch diese Sichtweise. So steigt laut Forschern von der Universität Amsterdam die Anfallsrate bei Ratten, wenn sie bei ihnen die Blut-Hirn-Schranke experimentell öffnen. Je ausgeprägter die Schrankenstörung ist, desto wahrscheinlicher entwickeln die Tiere eine Schläfenlappenepilepsie. In die gleiche Richtung deuten an der Cleveland Clinic durchgeführte Experimente mit Schweinen sowie beobachtende Studien beim Menschen. Beide zeigten, dass Krampfanfälle nach Störungen der Blut-Hirn-Schranke auftraten und nicht etwa vorher.

Andere Forscher identifizierten zwei Proteine der Blut-Hirn-Schranke, die eine Rolle bei der Entwicklung der Alzheimerdemenz spielen könnten. Das eine davon namens RAGE schleust β -Amyloidmoleküle aus dem Blut ins Gehirn, das andere (LRP1) befördert sie hinaus. Ist das Gleichgewicht zwischen beiden gestört – gelangt also zu viel β -Amyloid hinein und zu wenig heraus –, so bilden sich die für Alzheimer typischen Amyloidplaques. Obwohl therapeutische Anwendungen dieser Erkenntnisse noch in weiter Ferne liegen, gibt

Grenzüberschreitungen im Gehirn

Die Blut-Hirn-Schranke schützt das Gehirn vor vielen Schadstoffen. Andererseits verhindert sie aber auch den Durchtritt potenziell lebensrettender Medikamente. Diese gezielt in das Gehirn zu bringen, etwa um Tumoren zu behandeln oder eine Therapie gegen die Parkinsonkrankheit zu testen, war lange Zeit ein schier unlösbares Problem für Mediziner. Heute versuchen Wissenschaftler mit einer Reihe viel versprechender Techniken, die Blut-Hirn-Schranke gefahrlos und zeitlich begrenzt zu öffnen – gerade lange genug, um ein Medikament einzuschleusen.



Blut-Hirn-Schranke

Im Gegensatz zu anderen Geweben sind die Endothelzellen, welche die Wände der Blutgefäße von innen auskleiden, im Gehirn mittels Tight Junctions dicht miteinander verknüpft. Astrozyten und Perizyten umhüllen das Gefäßsystem des Gehirns. Sie sind ihrerseits von Mikrogliazellen umgeben, die wohl beim Reparieren von Schäden an der Blut-Hirn-Schranke helfen.

Durch die Mauer

Neurowissenschaftler nutzen Katheter, Gasbläschen und Ultraschall, ja sogar »trojanische Pferde«, um Medikamente ins Hirngewebe einzuschleusen.

Hyperosmolare Lösung

Manche Flüssigkeiten wie Lösungen des Zuckeralkohols Mannit können umliegendem Gewebe Wasser entziehen. Nach ihrer Injektion in eine Arterie, die zum Gehirn führt, geben die Endothelzellen der Hirngefäße Wasser ins Blut ab und schrumpfen. Dadurch lösen sich die Dichtungen der Tight Junctions, und Medikamente können hindurchgelangen.

Mikrokatheter

Über einen dünnen Katheter, der bis in ein Hirngefäß reicht, verabreichen Ärzte eine Mannitlösung, um die Blut-Hirn-Schranke spezifisch im Zielgebiet der Therapie zu öffnen. Dann geben sie über den gleichen Katheter das Medikament. Diese Methode wird bereits für gerinnungshemmende Medikamente nach Schlaganfällen eingesetzt.

Mikroskopische Gasbläschen

Der Arzt spritzt dem Patienten eine Salzlösung, die mikroskopisch kleine Gasbläschen enthält. Sobald sie das Gehirn erreichen, versetzt ein gezielter Ultraschallstrahl sie in Vibration, wodurch sich die Blut-Hirn-Schranke öffnet und Medikamente passieren lässt.

Trojanische Pferde

Der Name suggeriert zwar, dass hier ein Medikament im Inneren eines Transportpartikels versteckt ist. Doch eigentlich wird es an ein Trägermolekül angehängt, das natürlicherweise in der Lage ist, die Blut-Hirn-Schranke zu passieren. Forscher des Pharmaunternehmens Genentech zeigten, dass die Methode zumindest bei Mäusen funktioniert. Studien beim Menschen werden wohl erst in einigen Jahren möglich sein.

es Anlass zur Hoffnung: Bei Mäusen verhinderten Forscher die Ablagerung von β -Amyloid, indem sie die Funktion des Gens blockierten, das für die Synthese von RAGE-Proteinen in Endothelzellen verantwortlich ist. Möglicherweise entfalten RAGE-hemmende Medikamente, die zurzeit entwickelt werden, beim Menschen eine ähnliche Wirkung.

Doch stellt die Reparatur der Blut-Hirn-Schranke nur eine der Herausforderungen dar. Eine andere besteht darin, ihre Durchlässigkeit gezielt zu steigern, um Medikamente kontrolliert ins Gehirn einzuschleusen. Eine geeignete Methode haben Ärzte bereits gefunden, und zahlreiche Forschergruppen arbeiten an weiteren Verfahren.

Trotz seiner Komplexität folgt der Austausch von Substanzen zwischen Blutstrom und Gehirn wenigen einfachen Regeln. Um die Schranke passieren zu können, muss eine Substanz entweder kleiner sein als 500 Kilodalton – wie die meisten Antidepressiva, Antipsychotika und Schlafmittel –, die natürlichen Übergänge in der Barriere nutzen wie das Parkinsonmedikament L-Dopa oder lipophil sein. Letztere Bedingung erfüllen etwa Alkohol, Kokain und Heroin; sie schlüpfen wegen ihrer Affinität zu Fettstoffen leicht durch die Lipidmembran des Endothels. Etwa 98 Prozent aller Medikamente erfüllen jedoch keines dieser drei Kriterien. Sie können daher im Gehirn auch keine therapeutische Wirkung entfalten.

Bislang scheiterten alle Bemühungen, diese Erkenntnisse erfolgreich zur Medikamentenentwicklung zu nutzen. Fettlösliche Wirkstoffe passierten die Blut-Hirn-Schranke zwar leicht, zeigten jedoch andere Nachteile: Einige wurden gleich darauf wieder ausgeschleust, andere blieben in der Membran stecken und konnten so ihren Zweck nicht erfüllen. Zudem drangen sie recht wahllos in alle Organe des Körpers ein.

Die Schranke durchbrechen

Vor rund 30 Jahren begann der Neurochirurg Edward A. Neuwelt als Assistenzarzt an der University of Texas Southwestern in Dallas einen anderen Ansatz zu erkunden: Der heutige Leiter des Blood Brain Barrier Program der Oregon Health & Science University entwickelte das erste chirurgische Verfahren zur Überwindung der Blut-Hirn-Schranke. Dabei spritzt er zunächst eine »hyperosmolare« Lösung des Zuckeralkohols Mannit in eine Arterie, die zum Gehirn führt.

Da die Flüssigkeit gemäß Definition mehr gelöste Teilchen enthält als das Innere der Endothelzellen, entzieht sie diesen Wasser, so dass sie schrumpfen. Der Vorgang zerreißt die Tight Junctions; es entstehen Lücken, durch die Medikamente ins Hirngewebe gelangen können, wenn sie in die gleiche Arterie gespritzt werden. Es dauert zwischen 40 Minuten und zwei Stunden, bis die Endothelzellen wieder zu ihrer normalen Größe anschwellen, die Tight Junctions abdichten und so die Blut-Hirn-Schranke wieder schließen. Seit fast zwei Jahrzehnten nutzt Neuwelt dieses Verfahren, um die Blut-Hirn-Schranke vor allem bei einer bestimmten Patientengruppe aufzureißen: Menschen mit solchen Hirntumoren, die auf eine Chemotherapie ansprechen dürften, sofern die Medikamente dorthin gelangen können.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



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



www.spektrum.de/hirnforschung

Eine seiner Patientinnen war Joanie Lafferty, 57 Jahre alt und Mutter von drei Kindern, bei der 2007 ein Lymphom des Zentralnervensystems diagnostiziert worden war. Dabei handelt es sich um eine Krebserkrankung, die im lymphatischen System beginnt und sich dann ins Gehirn ausbreitet. Die Ärzte gaben ihr damals nur noch etwa einen Monat zu leben. Als sie kurz darauf in die Klinik der Oregon Health & Science University aufgenommen wurde, war ihre rechte Körperhälfte gelähmt. Ihre Versicherungsgesellschaft hatte sie vor der Therapie gewarnt: Diese sei noch im experimentellen Stadium und könnte einen Schlaganfall, eine chronische Epilepsie und noch schlimmere Komplikationen nach sich ziehen. Doch Lafferty entschied, sie hätte nichts zu verlieren.

Neuwelt schob ihr einen Katheter von der Leiste hinauf in die linke Halsschlagader. Über diesen schleuste er dann nacheinander zwei Flüssigkeiten ein: eine hyperosmolare Mannitlösung und kurz danach das Chemotherapeutikum Methotrexat. Am nächsten Tag wiederholte er die Prozedur mit der rechten Halsschlagader. Ein Jahr lang führten Neuwelt und sein Team monatlich die gleiche Behandlung durch – jeweils erst durch die linke, dann durch die rechte Halsarterie öffnete das Mannit die Blut-Hirn-Schranke für Methotrexat, das daraufhin den Tumor angreifen konnte. Bereits nach ihrer zweiten Behandlung konnte die Patientin das Krankenhaus ohne Rollstuhl verlassen. Zwei Monate später hatte sich der Tumor vollständig zurückgebildet und war auch nach fünf Jahren nicht wieder aufgetreten.

Neuwelt und sein Team berichten bei Patienten im Alter unter 60 Jahren von einer mittleren Überlebenszeit von 13 bis 14 Jahren. Auch die geistige Leistungsfähigkeit der Patienten würde signifikant weniger leiden als nach der Standardtherapie, bei der das gesamte Gehirn bestrahlt wird. Leider lassen sich nicht alle Krebsmedikamente durch die Blut-Hirn-Schranke schleusen, und auch nicht alle Hirntumoren eignen sich für diese Behandlung. Bislang wurde nur eine Hand voll Medikamente mit dem Verfahren getestet und für sicher befunden. Da sich das Mannit im Verlauf der Behandlung über die Halsarterie im gesamten Gehirn verteilt und die Blut-Hirn-Schranke an vielen Stellen durchlässig wird, besteht das Risiko einer Schwellung des Hirngewebes; zudem können Infektionen und toxische Effekte auftreten.

Während Neuwelt und sein Team daran arbeiten, ihr Verfahren weiter zu verbessern und seine Anwendungsmöglich-

keiten zu erweitern, entwickeln Ärzte andernorts alternative Methoden. Eine der aussichtsreichsten ist die direkte Mikrokatheterisierung. Auch dabei wird die Blut-Hirn-Schranke via Katheter mit Mannit geöffnet. Doch endet die Zuleitung hier nicht in der Halsarterie, sondern reicht bis ins Gehirn hinein, wo das Mannit die Blut-Hirn-Schranke nur in einem kleinen Bereich um das Tumoreal durchlässig macht. »Dieses Verfahren ist sehr zielgenau«, betont der Neurochirurg John A. Boockvar, der am Weill Cornell Medical Center des New York Presbyterian Hospital eine klinische Studie dazu leitet.

Ob es sich dabei allerdings wirklich um einen Vorteil oder einen Nachteil handelt, muss sich noch zeigen. Einerseits mindert die räumlich eng begrenzte Öffnung der Blut-Hirn-Schranke das Risiko für Hirnödeme und Krampfanfälle. Zudem ist dadurch weniger Gewebe der Giftwirkung des Chemotherapeutikums ausgesetzt. Andererseits weist Neuwelt auf eine begrenzte Effektivität bei Erkrankungen hin, die das gesamte Gehirn betreffen, etwa bestimmte Krebsarten oder die Alzheimerdemenz. »Mit dem Mikrokatheter behandelt man nur die Geschwulste, die man sieht«, sagt er. »Gerade bei Hirntumoren sind es aber die bei der Therapie noch unsichtbaren Herde, die letztlich zum Tod führen.«

Vibrierende Gasbläschen und trojanische Pferde

Der Mikrokatheter ist bereits routinemäßig im Einsatz, um gerinnungshemmende Stoffe ins Gehirn von Schlaganfallopfern zu bringen. Boockvar und sein Team untersuchen nun die Eignung zum Verabreichen von Antitumormedikamenten. Ihrer Ansicht nach könnten sich auf diese Weise künftig auch die Alzheimerdemenz, die Parkinsonkrankheit und jede andere Hirnerkrankung therapieren lassen, für die es zwar schon Medikamente gibt, die aber erst durch die Blut-Hirn-Schranke gelangen müssen.

Bei einem weiteren Verfahren zur Überwindung der Barriere kommen mikroskopisch kleine Gasbläschen und Ultraschallwellen zum Einsatz. Dabei spritzen die Forscher eine Salzlösung, die solche Mikrobläschen enthält, in den Blutkreislauf. Dann lassen sie mit einem gezielten Ultraschallstrahl die Bläschen schnell vibrieren, was die Tight Junctions an einem präzise umrissenen Ort auftrennt. In die Blutgefäße injizierte Medikamente können dann in diesem Areal die Blut-Hirn-Schranke passieren. Einige Zeit später regenerieren sich die Tight Junctions und schließen die Barriere wieder. Dieses Verfahren wird an der Harvard University, der Columbia University und anderen Institutionen entwickelt. Bei Experimenten mit Affen hat es sich als sicher erwiesen, und Studien beim Menschen sind in Vorbereitung.

Die vorübergehende Öffnung der Blut-Hirn-Schranke ist aber nicht die einzige Möglichkeit, Medikamente ins Gehirn einzuschleusen. Auch die bereits vorhandenen Pforten in der Barriere lassen sich nutzen, etwa indem man Wirkstoffe an Substanzen anhängt, die hier natürlicherweise Einlass erhalten. Wissenschaftler, die solche Therapeutika entwickeln, bezeichnen sie als »trojanische Pferde«. Ein vom Pharmaunternehmen Genentech entwickeltes solches trojanisches

Pferd konnte in Experimenten an Nagern die Plaquebildung im Hirngewebe um 47 Prozent reduzieren. Der Wirkstoff gelangt über den Rezeptor ins Gehirn, der auch Eisenionen einschleust. Ähnliche Medikamente gegen die Alzheimerdemenz und andere neurodegenerative Erkrankungen werden an der University of California in Los Angeles und andernorts entwickelt und nähern sich nun allmählich dem großen Ziel: klinischen Studien am Menschen.

Inzwischen mehren sich die Hinweise, dass die Blut-Hirn-Schranke nicht nur für bestimmte Erkrankungen, sondern auch bei ganz grundlegenden Prozessen wie der Entwicklung und dem Altern von Bedeutung ist – also zu Beginn und gegen Ende des Lebens. Laut Experimenten bereits aus den 1920er Jahren ist die Blut-Hirn-Schranke bei Neugeborenen noch unreif. Viele Experten halten dies auch weiterhin für zutreffend, doch haben aktuelle Studien gezeigt, dass sich die Tight Junctions fast zeitgleich mit der Ausbreitung von Blutgefäßen im embryonalen Gehirn entwickeln. Die Blut-Hirn-Schranke könnte sogar eine ganz wesentliche Rolle während der Hirnentwicklung spielen, indem sie im Gehirn ein spezifisches internes Milieu schafft, ohne das Neurone vielleicht gar nicht wachsen und Verbindungen ausbilden können.

Beim alternden Menschen geht dieses Milieu des Gehirns möglicherweise langsam verloren. Forscher vermuten, dass schleichende Veränderungen in der Blut-Hirn-Schranke – etwa ein Umbau der Blutgefäße im Gehirn oder kleine Lecks in der Barriere – den Weg für altersbedingte neurodegenerative Prozesse ebnen. »Das ist das nächste große Thema, das es zu erforschen gilt«, sagt Drewes. »Es scheint, als sei unsere bisher wichtigste Erkenntnis, dass wir eigentlich erst sehr wenig wissen.«

DIE AUTORIN



Jeneen Interlandi ist Wissenschaftsjournalistin in New York. Zuvor studierte sie Wissenschafts- und Medizingeschichte an der Harvard University.

QUELLEN

Neuwelt, E.A. et al.: Engaging Neuroscience to Advance Translational Research in Brain Barrier Biology. In: Nature Reviews Neuroscience 12, S. 169–182, 2011

Ribatti, D. et al.: Development of the Blood-Brain Barrier: A Historical Point of View. In: Anatomical Record, Part B: New Anatomy 289, S. 3–8, 2006.

WEBLINKS

<http://orion.bme.columbia.edu/ueil/research.php?id=bbb>
Fokussierter Ultraschall zur Öffnung der Blut-Hirn-Schranke: Überblick über die Forschung am Ultrasound Elasticity Imaging Laboratory an der Columbia University

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281862

Primatenforschung in Europa

Seit 2010 erlaubt eine hart erkämpfte EU-Richtlinie unter strengen Vorgaben wissenschaftliche Studien an Primaten. Doch in einigen EU-Staaten droht die Umsetzung in nationales Recht zu scheitern. Der Grund: Widerstand von Tierschutzverbänden.

Von Alison Abbott

Das schlimmste Erlebnis während seines jahrelangen Kampfes um seine Forschungen war für Andreas Kreiter, als seine Frau nach der Geburt des zweiten Kindes nach Hause kam und eine Morddrohung gegen ihren Dreijährigen vorfand. Kreiter, Neurowissenschaftler an der Universität Bremen, untersucht Hirnfunktionen unter anderem bei Makaken. Seit er dort arbeitet, ist er Verleumdungen und immer wieder auch

Aggressionen von Tierschutzaktivisten ausgesetzt. Auf dem Höhepunkt der Proteste in den späten 1990er Jahren musste er unter Polizeischutz leben. Trotz alledem gab er seine Studien nicht auf. »Als ich mich für Primatenforschung entschied, habe ich mir das sehr gründlich überlegt«, sagt er. »Ich halte sie für notwendig, wenn wir das menschliche Gehirn verstehen wollen.«

Später trat ein weiterer Gegenspieler auf den Plan: der Bremer Senat. Die Stadt suchte die Primatenforschung einzudämmen, und die für die Genehmigung von Tierexperimenten zuständige Gesundheitsbehörde erlaubte Kreiters Versuche 2008 nicht mehr. Der Streit ging durch die gerichtlichen Instanzen bis zum Bundesverwaltungsgericht, das Anfang 2014 wie vorher schon die Gerichte Bremens zu Gunsten dieser Forschungen entschied (siehe Kommentar S. 32/33).

Der Vorgang ist kein Einzelfall in Europa. Vielerorts tauchen unvermittelt lokale Regelungen auf, die den Geist einer Richtlinie der EU von 2010 zu verzerren drohen, die Forschung an nichtmenschlichen Primaten ausdrücklich zulässt. Auch wenn sich einige Wissenschaftler nach eigener Aussage dadurch sicherer fühlen als vorher, was die Zukunft ihrer Arbeit betrifft, sind andere plötzlich mit schwierigen und unerwarteten Situationen konfrontiert, wenn Tier-

AUF EINEN BLICK

EU-KOMPROMISS UNTER BESCHUSS

1 Bis Anfang 2013 hätten alle EU-Staaten eine **europäische Richtlinie** zu Tierversuchen, die 2010 nach jahrelangem Ringen zu Stande kam, in **nationales Recht** umsetzen sollen. Doch nicht alle Mitgliedstaaten sind der Weisung gefolgt.

2 **Tierschutzaktivisten** und **Tierversuchsgegner** erzeugen in manchen Ländern so viel Druck, dass die Gesetzgebung sich verzögert oder das Gesetz widerrechtlich verschärft wird.

3 Das schränkt auch die **Primatenforschung** stark ein. In der Folge werden Studien zunehmend ins Ausland verlagert, nicht wenige nach Asien.



Zehn Jahre Verhandlungen auf EU-Ebene, an deren Ende eine Richtlinie mit strengen Restriktionen für Tierforschung stand, haben Tierversuchgegner nicht beschwichtigt. In manchen Ländern formiert sich die Aktivistenfront gerade neu.

schutzaktivisten bald die Forscher persönlich angehen, bald regionale politische Entscheidungsträger unter Druck setzen – das alles in einer Zeit, in der die EU die Umsetzung (»Translation«) von Grundlagenforschung in neue Therapien vorantreibt – was nun einmal oft Tests an Primaten erforderlich macht.

Parteinahme sogar von Fluggesellschaften

Es gibt Forscher, die sich der Lage stellen, indem sie ihre Arbeit verstärkt in die Öffentlichkeit tragen. Andere haben entweder Affenversuche ganz aufgegeben oder verlagern die Experimente ins außereuropäische Ausland, vor allem nach Asien. »Mit Druck muss ein Primatenforscher immer rechnen, weil wir es mit einer wertvollen, sensiblen Ressource zu tun haben. Eine traurige Ironie wäre, wenn Schlüsselentwicklungen ausgerechnet in Länder verlegt werden, die unsere hohen Standards des Tierwohls nicht erfüllen«, meint Roger Lemon vom University College London. Er untersucht,

wie das Gehirn die Feinmotorik der Hand kontrolliert; daraus sollen einmal Schlaganfalltherapien erwachsen. Druck wird auf viele Arten ausgeübt. So transportieren beispielsweise in den Vereinigten Staaten kommerzielle Fluggesellschaften keine Primaten mehr für die Forschung. Die meisten Fluggesellschaften in Europa haben ähnliche Bestimmungen; zu den Ausnahmen gehört Air France.

Besagte EU-Richtlinie zu Tierversuchen schien ein Schritt hin zu klaren Verhältnissen und akzeptablen Vorgaben für Affenexperimente. Die EU erließ sie im September 2010 nach über zehn Jahren heftiger öffentlicher Kontroverse. So sorgsam, wie die Richtlinie zwischen Tierwohl und wissenschaftlichen Anforderungen abwägt, hätte man erwartet, dass sie die Spannungen mildert. Unter anderem gibt sie für das Wohl aller Tiere Mindestanforderungen vor, definiert Schmerzintensitäten und untersagt sogar die meiste Forschung an Menschenaffen. Eine hart erkämpfte Klausel – die nach intensiver Lobbyarbeit von biomedizinischer Seite

noch quasi in letzter Minute aufgenommen wurde – erlaubt ausdrücklich Grundlagenforschung an nichtmenschlichen Primaten für den Fall, dass Studien an anderen Tieren nicht durchführbar sind. Diese Richtlinie sollten die EU-Staaten bis zum 1. Januar 2013 gesetzlich verankern, und die nationalen Gesetze durften bei den Beschränkungen nicht strenger ausfallen als das EU-Gesetz.

Trotzdem gaben die Aktivisten nicht auf. Sie setzten nun stärker auf Medienwirksamkeit und schafften es damit in mehreren Ländern, die Umsetzung der Richtlinie hinauszuzögern. Im Fokus stünden jetzt mehr die politischen Entscheidungsträger als die Forscher, erklärt Robert Molenaar, Kampagnenmanager des ADC (Animal Defence Corps), der in

den Niederlanden und Belgien tätigen Koalition gegen Tierversuche. Vorrangig würde sich der ADC auf Affenforschung an Universitäten konzentrieren, denn damit käme man leicht in die Presse und könne Einfluss auf die politische Meinung nehmen. Seine Organisation pflegt auch internationale Verbindungen. Sie arbeitet eng zusammen mit dem Schwes-terverband AVC in Großbritannien, der Anti-Vivisektions-Koalition. Deren Anführer Luke Steele saß neun Monate im Gefängnis; 2012 war er wegen fortgesetzter Belästigung von Mitarbeitern der Niederlassung von Harlan Laboratories im britischen Blackthorn verurteilt worden. Dabei handelt es sich um ein Auftragsforschungsunternehmen mit Hauptsitz in Indianapolis (USA). Im Gefängnis hatte Steel Zeit, über

KOMMENTAR

Wissenschaft unter der Knute der Politik

Ein Neurowissenschaftler schildert den Nervenkrieg, den ihm Tierschutz-Extremisten und Politiker liefern.

Von Andreas Kreiter

Üblicherweise verläuft das Leben eines Wissenschaftlers innerhalb der Grenzen der Normalität. Doch meines erschien mir in den letzten fast zwei Jahrzehnten so surreal, dass es eher einem Traum glich, aus dem man aufzuwachen erwartet. Dieser Albtraum ist nun hoffentlich endgültig Vergangenheit. Anfang Februar bestätigte das Bundesverwaltungsgericht in Leipzig ein Urteil des Oberverwaltungsgerichts Bremen. Demnach war die lang anhaltende Verweigerung der Genehmigung meiner Versuche an Makaken im Bereich der Hirnforschung durch die Bremer Gesundheitsbehörde nicht rechtmäßig. Was ich erlebt habe, lehrt einiges darüber, wie Öffentlichkeit und Politiker mitunter mit Wissenschaftlern und deren Unterstützern umspringen und dass man sich dagegen wehren kann und muss.

Der Nervenkrieg begann 1997, als ich einen Ruf an die Universität Bremen annahm. Ich bin Neurowissenschaftler und erforsche unter anderem an Makaken neuronale Mechanismen der visuellen Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. Noch bevor ich die Stelle antrat, brachten Tierversuchsgegner in der Stadtmitte Bremens ein Plakat an, das mich als Affenfolterer bezeichnete und dazu aufrief, mich aufzusuchen oder anzurufen. Zu diesem Zweck waren meine Dienst- und Privatadresse einschließlich der Telefonnummern angegeben.



HABALD BEHNING / ZOO UNIVERSITÄT BREMEN

Andreas Kreiter ist Neuro-wissenschaftler und hat seit 1997 eine Professur für Zoo-physiologie an der Universität Bremen inne. Er erforscht Mechanismen neuronaler Informationsverarbeitung des kortikalen visuellen Systems auf der Ebene der Netzwerke einzelner Nervenzellen.

Dies war der Beginn einer äußerst aggressiven und verleumderischen Kampagne – bis hin zu Morddrohungen, auch gegen meine Frau und unseren damals dreijährigen Sohn. Tierschutzaktivisten zerstörten ein Labor der Universität, und einmal wurde ich von einem aufgeputschten Mob gejagt – weshalb ich in der Folge für lange Zeit unter Polizeischutz stand. Parallel zu diesen Ereignissen war die Presse dazu übergegangen, ganz überwiegend die extremen Positionen der Tierversuchsgegner darzustellen und zu übernehmen.

Die Folgen ließen nicht lange auf sich warten: Die Universität verwarf die fertigen Umbaupläne für die Unterbringung meiner Arbeitsgruppe und wies uns stattdessen Räume in einem Gebäude zu, das besser zu sichern, aber für unsere Forschung zunächst ungeeignet war. Damit war an eine Fortführung laufender Projekte erst einmal nicht mehr zu denken. Meine Zeit und Energie musste ich weit gehend in die erneute Planung der notwendigen Umbauten und in die Auseinandersetzung mit den anhaltenden Hetzkampagnen investieren.

Vor gut zehn Jahren besserte sich die Lage ein wenig, nachdem sich die überregionale Presse des Themas angenommen und es in ausgewogener Weise zu diskutieren begonnen hatte.

Strategien nachzudenken. Forscher würden gern am Gewohntesten festhalten, sich also Alternativen nicht gern öffnen, überlegte er sich. Er habe begriffen, dass es mehr bringe, politische Entscheidungsträger anzugehen.

Die Debatte neu aufrollen – zu welchem Preis?

Vor allem AVC und ADC trieben die »Initiative gegen Vivisektion« voran, welche verlangt, die EU-Richtlinie außer Kraft zu setzen und Forschung an Tieren grundsätzlich zu verbieten. Gestartet im November 2012, bekam die Petition innerhalb eines Jahres über eine Million Unterschriften; sie werden derzeit überprüft. Sollte die Eingabe akzeptiert werden, würde die Initiative in der Europäischen Kommission

und im Europäischen Parlament Anhörung finden. »Dann wäre die Debatte wieder eröffnet. Darauf könnten wir alle gut verzichten, so viel Arbeit, wie die EU-Kommission, Wissenschaftler und Tierschutzverbände in den Kompromiss gesteckt haben«, seufzt Stefan Treue, Direktor des Deutschen Primatenzentrums in Göttingen, der die Europäische Kommission bei der EU-Richtlinie beriet.

Treue bezweifelt allerdings, dass die Kampagne die europäische Gesetzgebung verändern wird. Die Forderung der Politik nach neuen Therapien sei zu stark. Wie viele seiner Kollegen wünscht er sich jedoch, Primatenforscher würden ihre bisherige Taktik des Stillhaltens aufgeben, weil sie so den Aktivisten das Feld überließe. Zwei Monate nach

Infolgedessen wurden auch die Gewaltandrohungen vor Ort weniger. Aber der nächste Gegner lauerte schon im Hintergrund: die Politik.

Vor der Bremer Bürgerschaftswahl 2007 versprachen Kandidaten maßgeblicher Parteien, sie würden im Fall ihrer Wahl die Forschung meiner Arbeitsgruppe beenden. Und tatsächlich verfolgten die Verantwortlichen im neuen Senat dieses Ziel: Sie verweigerten die erneute Bewilligung meiner neurobiologischen Studien mit Makaken, womit sie sich über Bundesrecht und das zu Grunde liegende Grundrecht der Freiheit von Forschung und Lehre hinwegsetzten.

Vermutlich um zu begründen, warum dieselbe Art von Experiment zur selben Art von wissenschaftlicher Fragestellung wie bisher jetzt plötzlich dieselben Gesetzesanforderungen nicht mehr erfüllen sollte, wählte die Behörde einen ungewöhnlich kreativen Weg, die Rechtsvorschriften zu interpretieren – einschließlich der Auffassung, dass diese der öffentlichen Meinung untergeordnet werden sollten.

Um die Ablehnung meiner Anträge auf Tierversuche zu begründen, ließ die Behörde außerdem eine Reihe von Gutachten zum Belastungsgrad der Makaken erstellen. Aus diesen wurde dann der maximal mögliche Belastungsgrad herausgelesen, vergleichbar dem eines Tiers, das zum Beispiel an einer langen, schweren Krankheit verendet.

Diese Gleichsetzung war offensichtlich absurd. Unsere neurobiologischen Untersuchungen gelingen nur, wenn wir mit den einzelnen Versuchstieren über Jahre hinweg arbeiten und ihnen unter anderem beibringen können, komplexe Verhaltensaufgaben zu lösen. Das ist nur möglich, wenn die Makaken körperlich und hinsichtlich ihres Verhaltens völlig gesund sind. Im Rahmen des Gerichtsverfahrens wurde jedoch deutlich, dass die wenigen Stellungnahmen unabhängiger Fachleute in der Abwägung unberücksichtigt geblieben sind. Die stattdessen verwendeten Gutachten stammten ganz überwiegend von Gegnern, die bekanntermaßen Tierversuche seit Jahren ablehnten und hier über den Belastungsgrad von Tieren urteilten, die sie niemals selbst gesehen hatten.

Da es für das Verbot meiner Forschung weder eine biologisch oder tiermedizinisch tragfähige Begründung noch eine rechtliche Grundlage gab, ging ich mit Unterstützung der Universität 2008 vor Gericht.

Letztlich erhielten wir in allen Instanzen Recht: Die erste wie auch die folgenden Instanzen verwiesen auf die Unrechtmäßigkeit und Gesetzeswidrigkeit der offensichtlich politisch motivierten Verwaltungsentscheidung. Nichtsdestotrotz weigerte sich die Behörde, die Urteile zu akzeptieren, und trieb das Verfahren bis vor das Bundesverwaltungsgericht in Leipzig, vermutlich in der Hoffnung, dass ich zwischenzeitlich aufgeben würde. Meiner Ansicht nach zeigt sich hier ein beängstigender Mangel an Respekt vor dem Gesetz und den Grundrechten, der bereits totalitäre Züge aufweist.

Der Urteilsspruch von Leipzig hat mein Vertrauen in unser Rechtssystem und die im deutschen Grundgesetz verankerte Gewaltenteilung in Teilen wiederhergestellt. Nichts dergleichen lässt sich über die Politik sagen. Nach wie vor gibt es keine Anzeichen dafür, dass Behörden oder Politiker die Unvertretbarkeit ihrer Vorgehensweise einsehen oder aus den Vorgängen gelernt haben und sich um eine Wiedergutmachung des angerichteten Schadens bemühen.

Obwohl die moderne Gesellschaft zunehmend auf hoch spezialisierte Wissenschaft angewiesen ist, zeigen meine Erfahrungen und ähnliche Fälle von Kollegen, dass wichtige Gebiete mit einer relativ kleinen Anzahl beteiligter Forscher sehr leicht kurzlebigen opportunistischen Zielen von Politikern und Medienvertretern zum Opfer fallen können. Darin besteht eine bislang unterschätzte Gefahr: Von der rücksichtslosen bis brutalen Vorgehensweise dieser Gegner einmal abgesehen, bedrohen solche Aktionen essenzielle mittel- und langfristige Ziele der Gesellschaft. Dem sollte sie entschieden entgegenreten.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 506, S. 133, 13. Februar 2014



Annahme der Richtlinie brachte Treue Ende November 2010 die »Basler Deklaration zur tierexperimentellen Forschung« mit auf den Weg. Wer sie unterzeichnet – schon über 2500 Wissenschaftler –, verpflichtet sich, seine Forschung an Tieren offen zu kommunizieren und den Dialog mit der Öffentlichkeit zu suchen. Die Erklärung zog eine Reihe neuer Initiativen nach sich. So wurde im letzten Jahr im schweizerischen Fribourg das Primatenkompetenz-Forschungszentrum (Swiss Primate Competence Center for Research, SPCCR) eingerichtet. Es versteht sich als Trainingsstätte für Wissenschaftler und andere Mitarbeiter von Schweizer Einrichtungen, die mit Primaten arbeiten, und als zentrale Unterrichts- und Anlaufstelle für die Bürger.

Plädoyer für mehr Öffentlichkeitsarbeit von Seiten der Wissenschaft

Einige Wissenschaftler nutzen ihre Websites für Öffentlichkeitsarbeit, andere haben das zumindest vor – wie Pieter Roelfsema vom niederländischen Institut für Neurowissenschaft in Amsterdam. Noch hätten Tierschützer keinen seiner Mitarbeiter belästigt, erzählt er. Doch der Primatenforscher fürchtet, das könne sich bald ändern. Vor gut einem Jahr gab es im niederländischen Parlament Anfragen kleiner Parteien, darunter die Niederländische Partei für Tiere, ob Forschung an Affen nötig sei, ob sie durch alternative Methoden ersetzbar wäre und ob sich die Anzahl der staatlich geförderten Institute für Affenforschung verringern ließe. Roelfsema möchte nun eine Internetseite einrichten, die den Wert solcher Wissenschaft darstellt.

Er orientiert sich dabei an der Website von Nikos Logothetis vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik in Tübingen, die jede Woche tausende Besucher aufrufen. Sie wurde nach einem Presse-Debakel eingerichtet. 2009 hatte Logothetis Journalisten eines Fernsehsenders sein Institut gezeigt, in der Annahme, sie würden beeindruckt sein, wie komfortabel die Affen untergebracht sind und wie entspannt und zufrieden sie wirken. Heraus kam stattdessen ein Be-

richt von einem irgendwie irren Wissenschaftler inmitten leidender Tiere. Diese Erfahrung, so Logothetis, habe ihm klargemacht, dass die wissenschaftlichen Organisationen auf die eskalierenden Absurditäten von Seiten radikaler Tierschützer dringend reagieren müssen.

Im Unterschied zu Bremen werden die Forscher in Tübingen jedoch von der Politik unterstützt. Sogar der derzeitige Oberbürgermeister Boris Palmer – Mitglied der Grünen, die nicht gerade dafür bekannt sind, dass sie Tierversuchen positiv gegenüberstehen – übte an Flugblättern von Aktivisten öffentlich Kritik. Deren Inhalt bezeichnete er als unwahr und die Art, wie Logothetis behandelt wird, als inakzeptabel. »Man sieht hier, welchen Einfluss die Lokalpolitik hat«, meint Treue. Auch das Göttinger Primatenzentrum erfährt solche Unterstützung. Nicht zuletzt die EU-Richtlinie vermittelt den Forschern das Gefühl, dass sich die Zustände nun stabilisieren.

Völlig anders ist die Lage in Italien. Dort attackierten Tierschutzaktivisten 2012 eine Beagle-Zuchtstation bei Brescia, die später geschlossen wurde. 2013 sabotierten sie Experimente an der Universität Mailand. Kürzlich verteilten sie in der Nähe der Wohnungen einiger Forscher Flugblätter mit deren Fotos, Adressen und Telefonnummern. 2012 war es so weit, dass sich einige populistische italienische Politiker auf die Seite der Tierrechtler schlugen und deren Argumente bei der Umsetzung der EU-Richtlinie einbrachten. Der Gesetzesvorschlag enthielt daraufhin entgegen der EU-Vorgabe schärfere Bestimmungen: Xenotransplantationen und Suchtforschung an Tieren sollten verboten werden. Italiens Wissenschaftler reagierten zu spät. Als sie endlich eine Petition zu Stande gebracht hatten – die dann in wenigen Wochen immerhin 13 000 Unterschriften erhielt –, war das Gesetz nicht mehr aufzuhalten. Es wurde im Dezember 2013 vom italienischen Parlament verabschiedet.

Affenforscher in Italien sind nun verunsichert, wie die Klausel umgesetzt wird, die Untersuchungen an nicht-menschlichen Primaten gestattet. »Es ist überhaupt nicht

klar, ob Grundlagenforschung weiterhin zulässig ist«, sagt der Neurophysiologe Roberto Caminiti von der Universität Rom La Sapienza, der in der Föderation der europäischen neurowissenschaftlichen Gesellschaften (FENS) den Vorsitz im Komitee für Tiere in der Forschung innehat. Nach dem neuen Gesetz müssen alle Anträge, die Affen, Katzen oder Hunde betreffen, außer von den lokalen Ethikkommissionen nun auch vom Obersten Gesundheitsrat genehmigt werden, der zudem Medikamentenzulassungen und klinische Protokolle absegnet.

In Belgien sieht es ebenfalls so aus, als würde bald ein Gesetz mit ähnlichen, gegenüber der EU-Richtlinie verschärften Klauseln durchkommen. Wie das italienische soll es Suchtforschung an Primaten untersagen und für Primatenstudien die Zustimmung eines nationalen Komitees verlangen. Weil der Gesundheitsminister stets das letzte Wort hätte, wäre die Absegnung solcher Forschungsprojekte nicht länger Sache der Wissenschaft oder Ethik, sondern der Politik.

Die Situation in der Schweiz

Die Schweiz ist kein EU-Mitglied und nicht an EU-Recht gebunden. Eine Verfassungsänderung vom Jahr 2000 zum Schutz der Würde von Tieren veranlasste die Schweizer Gerichte jedoch, auch Forschung an Affen einzuschränken. Wissenschaftler in Fribourg konnten Studien an Primaten zur Rückenmarkreparatur zwar fortsetzen, doch in Zürich wurde seit 2004 die Weitergenehmigung einiger Projekte zur Grundlagenforschung an Primaten versagt. Kevan Martin, einer der Direktoren am dortigen Institut für Neuroinformatik, musste die Kartierung von Mikroschaltkreisen des Makakengehirns 2006 einstellen: Die Behörden sahen darin keinen nahen praktischen Nutzen für die Allgemeinheit. Den Einspruch des Forschers wies das Bundesgericht zurück. »Wie soll angewandte Forschung ohne Grundlagenforschung möglich sein?«, lautet Martins knapper Kommentar.

In diesem politischen Klima setzen manche Schweizer Primatenforscher auf Zusammenarbeit mit Einrichtungen anderer Länder. Botond Roska vom Friedrich-Miescher-Institut für Biomedizinische Forschung in Basel und seine Kollegen haben an Mäusen eine experimentelle Therapie für Retinopathia pigmentosa entwickelt, eine häufig auftretende Netzhauterkrankung, die bis zur Erblindung fortschreitet. Das Verfahren wäre eigentlich für Tests am Menschen reif, welche die kleine biomedizinische Firma GenSight Biologics in Paris durchführen könnte, die Roska mitbegründet hat. »Aber man darf nicht direkt von Mäusen zum Menschen gehen. Man weiß ja gar nicht, ob die neuronalen Schaltkreise überhaupt die gleichen sind«, sagt Roska. »Mäuse sind kein gutes Modell für menschliches Sehen.« Wegen der unsicheren Situation in der Schweiz führt er die Primatenversuche nun in Frankreich durch – wo Tierschutzaktivisten weniger politische Unterstützung finden –, zusammen mit GenSight und dem Pariser Institut de la Vision. Roska hofft, dass der erste menschliche Patient noch in diesem Jahr behandelt werden kann.

Vor der gleichen Schwelle stehen die Arbeiten von Per-Olof Berggren vom Karolinska-Institut in Stockholm. Er hat mit Hilfe von Mäusen eine Diabetestherapie entwickelt, die nun an Primaten getestet werden müsste. Nach seiner Einschätzung wären die Versuche in Schweden genehmigt worden, aber ihre Finanzierung hätte er nicht aufbringen können. In dem Land sind die Tierrechts- und Tierschutzvereinigungen sehr mächtig und die Vorschriften für Primatenhaltung entsprechend scharf; diese muss ausgesprochen großzügig und aufwändig gestaltet werden. Berggren entschied sich daher für Singapur. Die dortigen Einrichtungen seien erstklassig und entsprächen voll und ganz europäischen Standards. Auch bestünden langjährige Erfahrungen mit Affenforschung.

Viele europäische Wissenschaftler verlegen ihre Primatenstudien zurzeit nach Asien, was natürlich Auseinandersetzungen schürt und die Forschergemeinde spaltet. Während manche europäischen Forscher ein niedrigeres ethisches Niveau der Überwachung und des Tierwohls in einigen dieser Länder befürchten, beobachtet Martin die zunehmende Abwanderung von Experten mit Besorgnis. Laut der Europäischen Kommission wurden 2011 bereits über 25 Prozent weniger Affen in wissenschaftlichen Studien verwendet als 2008. Nach Martin ist es schon jetzt schwieriger als früher, für Eingriffe an den Tieren entsprechend spezialisierte Anästhesisten und Chirurgen zu finden. Die Entwicklung dürfte sich beschleunigen und immer schwerer rückgängig machen lassen.

Ein europäischer Forscher, der anonym bleiben möchte, erzählt nach einem zweiwöchigen Besuch bei einem führenden Institut in China, dass viele Europäer jetzt Arbeitsbeziehungen dorthin aufbauen würden. Wie er selbst äußern sich diese Kollegen darüber nicht öffentlich – sie möchten dem Ruf ihrer Herkunftseinrichtung nicht schaden. Ethische Bedenken hält er nicht für angebracht, weil die Standards denen in Deutschland und den Vereinigten Staaten entsprechen. Sein Anliegen ist zukunftsorientierte Forschung. Es tue gut, Energie und Optimismus zu erleben, statt immer nur ein Nein zu hören. ~

DIE AUTORIN



Alison Abbott ist Europakorrespondentin von »Nature«.

WEBLINK

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281869

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 506, S. 24–26, 6. Februar 2014

Ultraleichten Teilchen auf der Spur

Bisherige Ansätze bei der Suche nach neuen Teilchen, vor allem den Bestandteilen der Dunklen Materie, blieben bislang erfolglos. Physiker setzen daher auf unkonventionelle Strategien. Mit auf den ersten Blick erstaunlich einfach wirkenden Experimenten wollen sie ultraleichte Axionen und deren Verwandte aufspüren.

Von Joerg Jaeckel, Axel Lindner und Andreas Ringwald

Im Juli 2012 eroberten die Physiker die Schlagzeilen. Am CERN bei Genf, genauer am Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider), hatten sie mit dem Higgs-Boson ein neues Elementarteilchen gefunden. Die Aufregung war verständlich: Es handelte sich dabei um den lange gesuchten letzten Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik, das die elementarsten Materiebausteine und ihre zugehörigen Wechselwirkungen beschreibt und damit das, was die Welt im Innersten zusammenhält. Außerdem belegte der Fund, dass die Physiker auf die richtige Strategie gesetzt hatten, nämlich auf den Bau eines Riesenbeschleunigers, der mit seinen hohen Energien auch

besonders schwere Teilchen nachweisen kann. Sogar über den Bau noch größerer Maschinen wird nun nachgedacht.

Andererseits verdeckt dieser Erfolg die Tatsache, dass der LHC eine weitere mit ihm verbundene Hoffnung bislang nicht erfüllt hat: nämlich auch Teilchen der so genannten Dunklen Materie nachzuweisen. Möglicherweise sorgen erst die höheren Energien, die der Beschleuniger ab 2015 erreichen wird, für den Durchbruch. Daneben lassen theoretische und experimentelle Fortschritte aber auch die Suche in entgegengesetzter Richtung sehr viel versprechend erscheinen, nämlich die nach extrem leichten Teilchen.

Bereits vor der Entdeckung des Higgs war klar, dass das Standardmodell die uns umgebende Materie auf einer fundamentalen Ebene und höchst präzise beschreibt. Bis heute hat kein Laborexperiment eine signifikante Abweichung von seinen Vorhersagen ergeben. Auch das Higgs selbst hat diesen theoretischen Rahmen glänzend bestätigt. Trotzdem suchen die Forscher nach Physik jenseits des Standardmodells; unter anderem deshalb, weil astronomische Beobachter in den vergangenen Jahrzehnten zu dem überraschenden Befund gekommen sind, dass sich nur 15 Prozent der Materie im Kosmos mit den üblichen Teilchen erklären lassen. Die verbleibenden 85 Prozent – und damit der Löwenanteil – entfallen dagegen auf Dunkle Materie. Über die Teilchen, aus der sich diese Substanz vermutlich zusammensetzt, wissen wir lediglich, dass sie allenfalls ein wenig mit Licht und anderen Teilchen aus dem Standardmodell wechselwirken. Trotzdem sind sie kaum aus dem Universum wegzudenken: Dank ihrer

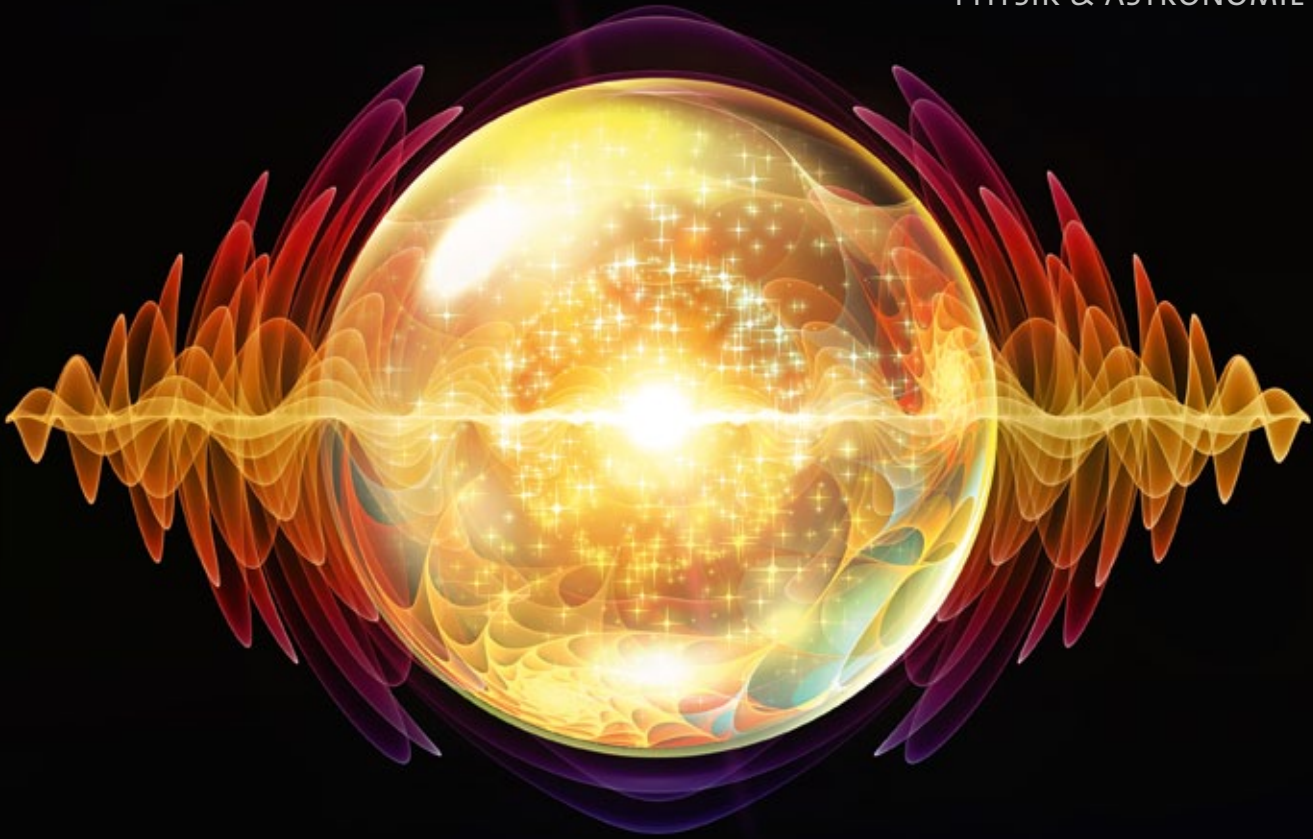
AUF EINEN BLICK

ERKLÄRT DAS AXION DIE DUNKLE MATERIE?

1 Nach der Entdeckung des Higgs-Bosons blieben weitere Erfolgsmeldungen der Teilchenphysiker aus: Die Suche nach **noch schwereren Teilchen**, die das so genannte Standardmodell erweitern würden, stagniert derzeit. Lohnt es sich, auch nach ultraleichten Teilchen Ausschau zu halten?

2 Eines dieser noch hypothetischen Teilchen ist **das Axion**. Es könnte einige fundamentale Probleme der Teilchenphysik erklären und ist möglicherweise sogar der lange gesuchte Baustein der Dunklen Materie.

3 Neben dem Axion könnte es einen ganzen **Zoo ähnlicher Teilchen** geben. Mit hochpräzisen Experimenten wollen Wissenschaftler sie schon in den kommenden Jahren aufspüren.



ISTOCKPHOTO / ANDREW OSTROVSKY

Das Axion ersannen Physiker schon Ende der 1970er Jahre. Es sollte lediglich ein Symmetrieproblem im Zusammenhang mit der starken Kernkraft lösen. Aber vielleicht hat es auch das Zeug dazu, fundamentale physikalische Fragen bis hin zum Rätsel um die Dunkle Materie zu beantworten.

Schwerkraftwirkung ballen sie sich bevorzugt zu gigantischen Klumpen, innerhalb derer sich Galaxien wie unsere Milchstraße bilden können (siehe »Der Dunkle Kosmos«, Spektrum der Wissenschaft 9/2013, S. 60).

Doch woraus besteht die Dunkle Materie? Und warum haben wir sie noch nicht gefunden? Zwei mögliche Antworten gibt es: Entweder sind die neuen Teilchen sehr schwer, oder sie treten nur sehr selten mit normaler Materie in Wechselwirkung. Wenn wir Pech haben, ist sogar beides der Fall. Denn um sehr schwere Teilchen zu erzeugen und dann nachzuweisen, brauchen wir extrem hohe Energien. Und um solche aufzuspüren, die kaum mit anderer Materie in Wechselwirkung treten, brauchen wir extrem empfindliche Präzisionsexperimente. Beides zusammen lässt sich im Labor nur schwer realisieren.

Jagd nach den »Schwächlingen«

In den letzten zwei Jahrzehnten konzentrierten sich die Teilchenphysiker vor allem auf schwere Teilchen. Hoffnung machten ihnen Fortschritte bei der Theorie der so genannten Supersymmetrie, die einen ganzen Zoo von Teilchen jenseits des Standardmodells voraussagt, insbesondere eben auch solche mit sehr hoher Masse. Außerdem begannen um das

Jahr 2000 die Bauarbeiten am LHC. Mit dessen hohen Energien im Teraelektronvoltbereich rückten auch die Möglichkeiten zum experimentellen Nachweis der Teilchen in greifbare Nähe. Besonders interessant erschienen vielen Forschern dabei die so genannten WIMPs (»weakly interacting massive particles«, schwach wechselwirkende massereiche Teilchen). Ihr Name – »wimp« steht im Englischen für Schwächling – spielt auf ihre relativ schwache Wechselwirkung mit anderen Teilchen an.

Nach wie vor gelten WIMPs als wichtigste Kandidaten für Dunkle-Materie-Teilchen. In den Energie- und damit Massebereichen, die wir mit unseren Experimenten ausmessen können, haben sie sich aber nicht gezeigt. Selbst am 27-Kilometer-Ring des LHC, in dem energiereiche Protonenstrahlen miteinander kollidieren, ließen sie sich bislang nicht nachweisen. Trotzdem gibt es keinen Grund, die Hoffnung schon aufzugeben: Möglicherweise offenbaren sie sich eben erst bei noch höheren Energien.

Darüber hinaus haben Physiker begonnen, auch nach WIMPs aus dem Weltall zu suchen. Die dafür konzipierten unterirdischen Teilchendetektoren, die Namen wie LUX, XENON, DAMA und CoGeNT tragen, erbrachten allerdings ebenfalls keine überzeugenden Nachweise. Zwar registrie-

ren einige von ihnen Signale, doch lassen sich die Ergebnisse der verschiedenen Experimente nicht miteinander vereinbaren – oder nur um den Preis, dass man weitere neue Teilchen und viel komplexere Wechselwirkungen postulieren müsste.

Es ist deshalb an der Zeit, zusätzlich auch nach ultraleichten Teilchenkandidaten Ausschau zu halten. Zum einen sind etwa mit dem in den USA beheimateten Axion Dark Matter Experiment (ADMX) heute die experimentellen Voraussetzungen dafür gegeben, die hypothetischen Partikel auch tatsächlich nachzuweisen. Zum anderen liefern die Theoretiker besser untermauerte Vorhersagen. Sie listen mittlerweile eine ganze Reihe sehr leichter Teilchen auf, die als Bestandteile der Dunklen Materie in Frage kommen könnten. In ihrer

Abneigung, mit gewöhnlicher Materie zu wechselwirken, übertreffen diese die WIMPs sogar noch bei Weitem. Im Fachjargon werden die Leichtgewichte WISPs genannt (»weakly interacting slim particles«, schwach wechselwirkende leichte Teilchen), nach dem englischen »wisp« für schwächling. Sie erinnern an Neutrinos, die ebenfalls lange Zeit heiße Kandidaten für die Dunkle Materie waren. Aber mittlerweile weiß man, dass diese bei sehr energiereichen Prozessen entstehen und sich deshalb zu schnell durchs Universum bewegen, um zur Bildung etwa von Galaxien beizutragen. WISPs hingegen würden sich sehr langsam bewegen und wären deshalb ideale Schwerkraft-»Keime« für größere Masseansammlungen.

Um die Theorien über WISPs voranzubringen und daraus Erfolg versprechende experimentelle Tests zu entwickeln, müssen wir möglichst konkrete Vorstellungen von den neuen physikalischen Phänomenen haben, nach denen wir suchen. Das vielleicht am besten verstandene WISP ist das Ende der 1970er Jahre postulierte Axion, um dessen Nachweis sich Forscher schon seit mehr als 20 Jahren bemühen. Um das Teilchen zu erklären, müssen wir ein wenig ausholen. Physiker lieben Symmetrien: Fast die ganze Physik ist auf Symmetrieprinzipien aufgebaut, aus denen sich Kraftgesetze und Erhaltungssätze ergeben. So ist etwa der berühmte Energieerhaltungssatz nichts anderes als eine Folge

der mathematisch in Form einer Symmetrie beschreibbaren Tatsache, dass physikalische Gesetze unabhängig von der Zeit sind. Das bedeutet: Wenn wir jetzt ein Experiment durchführen und es später wiederholen, sollten dieselben Resultate herauskommen. Dies ist einer der fundamentalsten Zusammenhänge der Physik; erkannt hatte ihn die Physikerin und Mathematikerin Emmy Noether zu Beginn des 20. Jahrhunderts.

Das Axion hängt mit einer weiteren zeitlichen Symmetrie zusammen, nämlich der Zeitumkehr. Sie lässt sich folgendermaßen verstehen: Filmt man einen physikalischen Prozess,

der bezüglich der Zeitumkehr symmetrisch ist, zeigt der Film auch dann noch einen physikalisch möglichen Ablauf, wenn man ihn rückwärts ablaufen lässt. Sieht ein Beobachter nur den Film,

kann er also nicht erkennen, in welcher Richtung der Prozess vor sich ging, während die Kamera lief. Ein Beispiel aus der Alltagswelt wäre ein Ball, den sich zwei Personen zuwerfen. Konzentriert man sich allein auf diesen, bleibt unklar, ob der Film gerade vorwärts oder rückwärts läuft. Für makroskopische Prozesse gilt die Zeitumkehr im Allgemeinen nicht, weil jedes System im Lauf der Zeit Energie in Wärme umwandelt, womit sie für die Bewegung verloren geht. Beispielsweise macht ein hüpfender Gummiball allmählich immer kleinere Sprünge, woran sich die Richtung der Zeit eindeutig erkennen lässt.

Die starke Kernkraft lässt sich nicht von der Symmetrieverletzung »anstecken«

Die Zeitumkehrsymmetrie spielt auch im Standardmodell eine Rolle. Von den drei elementaren Kräften, die dieses Modell beschreibt, kann eine, nämlich die elektromagnetische Kraft, die Zeitumkehrsymmetrie prinzipiell nicht verletzen. Hingegen enthalten sowohl die schwache als auch die starke Kernkraft Parameter, welche die Möglichkeit einer Symmetrieverletzung erst einmal offen lassen. Erst ihr genauer Wert – der sich nur durch Messungen bestimmen lässt – entscheidet, ob es einen Unterschied zwischen vorwärts und rückwärts gibt. Ist er null, gilt die Symmetrie, andernfalls ist sie verletzt. Das Erstaunliche ist nun, dass nur die schwache Kernkraft die Möglichkeit nutzt, die Zeitumkehrsymmetrie zu verletzen, während die starke Kernkraft dies nicht tut, zumindest nicht im Rahmen der bisherigen Messgenauigkeit. Dabei gibt es sogar Teilchen, die beiden Wechselwirkungen unterliegen, etwa die Quarks, aus denen sich unter anderem Protonen und Neutronen zusammensetzen. Eigentlich sollten diese Teilchen die Symmetrieverletzung an die starke Kernkraft übertragen, sie gleichsam damit anstecken.

Warum ist die starke Kernkraft immun gegen die Verletzung der Zeitumkehr? Die bisher eleganteste Antwort gaben Ende der 1970er Jahre Roberto Peccei und Helen Quinn. Die

Fast die ganze Physik ist auf Symmetrieprinzipien aufgebaut, aus denen sich Kraftgesetze und Erhaltungssätze ergeben

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

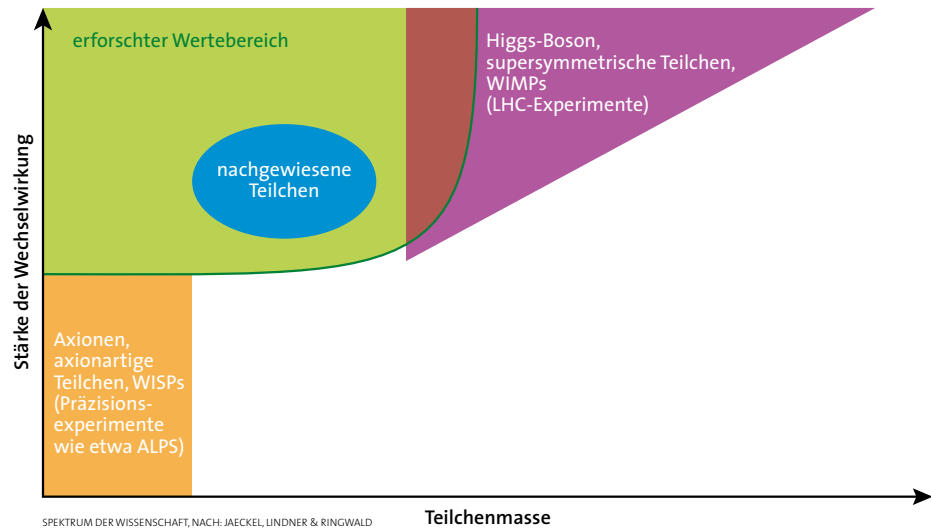


Unser Online-Dossier zum Thema »Teilchenphysik« finden Sie unter



www.spektrum.de/thema/teilchenphysik/1136209

Wo können wir auf der Suche nach bislang unbekanntem Teilchen fündig werden? Der Bereich relativ kleiner Teilchenmassen und starker Wechselwirkungen ist bereits erforscht (grüner und blauer Bereich). Am LHC und anderen Hochenergieexperimenten fahnden Wissenschaftler vor allem nach Teilchen mit großen Massen, darunter WIMPs (violett). Bei immer mehr Experimenten geht es aber auch um die ultraleichten WIMPs (orange). Diese kommen ebenso wie WIMPs als Bestandteile der Dunklen Materie in Frage.



beiden gingen der Frage nach, welche Folgen es für die Energie des Vakuums hätte, wenn der Wert des genannten Parameters veränderlich wäre. Letzteres ist manchen Theorien jenseits des Standardmodells zufolge nämlich durchaus möglich. Die erstaunliche Antwort: Wäre der Parameter tatsächlich variabel, nähme er nach einiger Zeit automatisch seinen energetisch bevorzugten Zustand ein – und darin wäre die Zeitumkehrsymmetrie der starken Kraft gesichert.

Wie die Nobelpreisträger Steven Weinberg und Frank Wilczek bald erkannten, hat dieser Mechanismus aber eine unausweichliche Konsequenz. Ein dynamischer Parameter ist mathematisch nichts anderes als ein Feld, und die fundamentalen Anregungen dieses Felds lassen sich physikalisch als Teilchen interpretieren – genauso wie man Photonen als Anregungen des elektromagnetischen Felds verstehen kann. Mit Pecceis und Quinns Überlegung kam also auch eine neue Teilchensorte in die Welt. Wilczek taufte den Fund etwas eigenwillig auf den Namen eines amerikanischen Waschmittels: Das Axion soll also gewissermaßen die Kernkraft von der Verletzung der Zeitumkehrsymmetrie reinigen.

Die Eigenschaften eines solchen Axions kann man fast vollständig aus der Theorie berechnen. Die einzige Ausnahme ist seine fundamentale Energieskala. Diese Skala gibt den ungefähren Wertebereich vor, in welchem die Energie beziehungsweise Masse der anderen Teilchen liegen sollte, mit denen im Rahmen desselben Modells zu rechnen ist; nur die Masse des Axions selbst ist viel geringer. Außerdem bestimmt die Axionskala die Stärke der Wechselwirkung des Axions mit den Teilchen des Standardmodells. Dabei gilt eine umgekehrte Proportionalität: je größer die Skala, umso kleiner die Masse des Axions und umso schwächer seine Wechselwirkung.

Bei Versuchen im Labor ebenso wie bei der Vermessung stellarer Objekte stellte sich schon früh heraus, dass die Axionskala größer als 10^9 Gigaelektronvolt (GeV) sein muss, das ist 100 000-mal mehr als die am LHC erreichbare Energie. Mit einer Masse von je nach Modell typischerweise zwischen

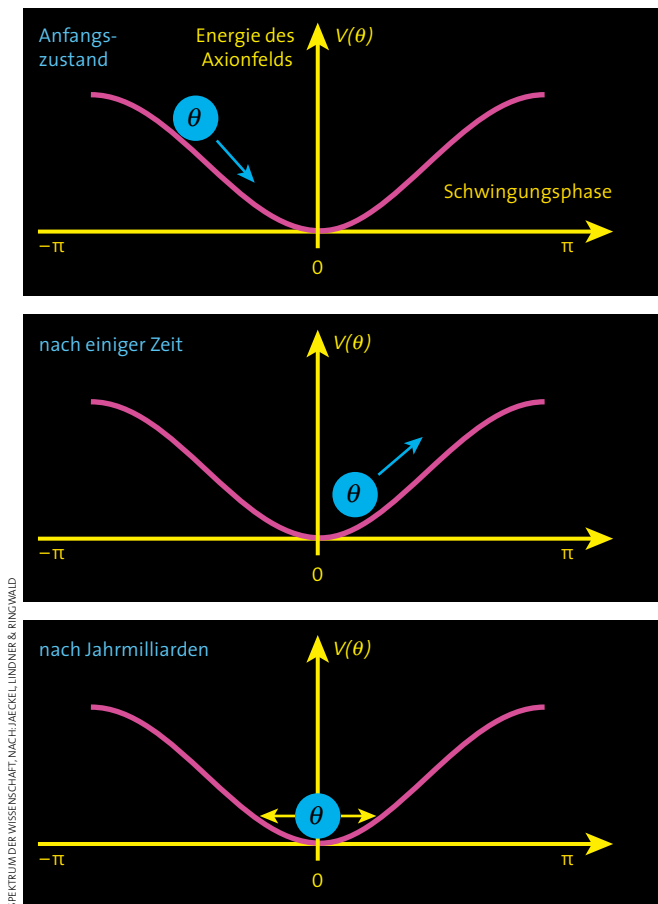
einem hundertstel und einem millionstel Elektronvolt (eV) – zum Vergleich: die des Elektrons liegt bei rund 0,5 Megaelektronvolt (MeV, 10^6 eV) – ist das Axion also ultraleicht und damit ein Paradebeispiel für ein WIMP.

Die Energieskala eines Teilchens beziehungsweise des theoretischen Modells, in dem es vorkommt, hat noch eine weitere Konsequenz. Physiker messen ihr nämlich eine allgemeinere Bedeutung zu, die über das Modell selbst hinausreicht. Demzufolge »passen« Modelle, welche die Existenz unterschiedlicher Teilchen voraussagen, eher in einen gemeinsamen theoretischen Rahmen, wenn ihre Skalen ungefähr dieselbe Größenordnung aufweisen – dann bestätigen sie sich gewissermaßen gegenseitig. Umgekehrt schließen Modelle, deren Skalen sich erheblich voneinander unterscheiden, einander eher aus.

Ruht das Standardmodell überhaupt auf den richtigen Fundamenten?

Bei Vermutungen über das Axion kann man sich daher auch auf theoretische Überlegungen beispielsweise zu der Frage stützen, warum Neutrinos nur etwa ein Millionstel der Elektronmasse besitzen. Einige der möglichen Antworten implizieren nämlich eine Energieskala, die in derselben Größenordnung wie die Axionskala liegt. Sie sagen die Existenz von schweren Partnerteilchen der Neutrinos voraus, die vielleicht eine Lösung für eines der größten Rätsel der modernen Physik bieten könnten: Warum besteht der Kosmos fast nur aus Materie und kaum aus Antimaterie? Falls es die schweren Neutrino-partner wirklich gibt, dann sind viele ihrer Vertreter im heißen Plasma kurz nach dem Urknall sowohl in Materie- als auch in Antimaterieteilchen zerfallen, allerdings mit leicht unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten. So wäre der Grundstein für die heutige Teilchen-Antiteilchen-Asymmetrie im Universum gelegt worden.

Außerdem kann man sich fragen, ob eine kleine Erweiterung des Standardmodells tatsächlich ausreicht, um das Axion zu integrieren. Müsste man nicht vielleicht prüfen,



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH JAECKEL, LINDNER & RINGWALD

Gibt es Axionen tatsächlich, dann existiert auch ein so genanntes Axionfeld, beschrieben durch den Parameter θ . Seine Energie ist unmittelbar nach dem Urknall sehr hoch (oben), anschließend bewegt es sich seinem energetischen Minimum entgegen und erreicht auf der anderen Seite fast wieder die Ausgangshöhe – es rollt wie eine Kugel in einer flachen Schale (Mitte). Die Energie, die in dieser abnehmenden Oszillation gespeichert ist, entspricht der Zahl der Axionenteilchen im Universum. Heute, nach knapp 14 Jahrmilliarden, ist nur noch eine kleine Schwingung übrig geblieben (unten). Trotzdem wäre in der Umgebung der Milchstraße mit rund einer Milliarde Axionen in jedem Kubikzentimeter zu rechnen.

ob das Theoriegebäude überhaupt auf den richtigen Fundamenten ruht? Denn in der Tat weist das Modell einige seltsame und bislang unerklärte Eigenschaften auf. So mag man sich wundern, warum ausgerechnet vier fundamentale Kräfte existieren. Und warum haben die Teilchen des Standardmodells so unterschiedliche Massen? Schließlich liegt beispielsweise die Masse des Neutrinos um elf Größenordnungen niedriger als die des Higgs-Bosons. Und weshalb gehen die Werte von so vielen seiner Parameter nicht aus der Theorie selbst hervor, sondern müssen durch Experimente ermittelt werden?

Um Antworten zu finden, suchen Physiker nach einer so genannten vereinheitlichten Theorie. Kandidaten gibt es

bereits, darunter die Stringtheorie, die Loop-Quantengravitation, die Theorie der Renormierungsgruppenfixpunkte und viele weitere. Sie sind jedoch alle mit mehr oder weniger großen Schwierigkeiten behaftet. Insbesondere gelingt es bis jetzt nur selten, aus diesen Theorien Vorhersagen abzuleiten, die wir mit unseren heutigen Möglichkeiten experimentell testen können. Anders als in der Vorstellungswelt mancher Theoretiker stößt man eben auf beachtliche technische Probleme, wenn der Umfang eines Beschleunigers nicht knapp 30 Kilometer, sondern 30 000 Lichtjahre betragen soll.

Doch auch hier kommen die leichten Teilchen ins Spiel. Mehrere Forscher, darunter die Autoren Jaeckel und Ringwald, haben festgestellt, dass viele stringtheoretische Ansätze die Existenz eines Axions sowie einer ganzen Reihe anderer leichter Teilchen nahelegen. Manche von Letzteren ähneln dem Axion, man fasst sie gemeinsam mit diesem unter dem Begriff ALPs (»axion-like particles«, axionartige Teilchen) zusammen. Andere, wie die so genannten dunklen Photonen, haben Ähnlichkeit mit Lichtteilchen, wechselwirken aber viel schwächer als diese. Gelingt der Nachweis von Axionen oder anderen WISPs, könnte dies also auch als erster experimenteller Test der Stringtheorie gelten.

Das Axionfeld »rollt« seinem Minimum entgegen

Doch zurück zu der Überlegung, ob Axionen zu den wichtigen Bestandteilen der Dunklen Materie zählen können. In diesem Fall müssen die Teilchen nicht nur bestimmte Eigenschaften besitzen, sondern im Universum auch in ausreichender Menge vorkommen. Welcher Mechanismus kommt für ihre Erzeugung in Frage? Betrachten wir das frühe, sehr heiße und sehr energiereiche Universum. Gibt es das Axionfeld wirklich, befindet es sich zu diesem Zeitpunkt in einem Zustand hoher Energie und verletzt die Zeitumkehrsymmetrie. Wenn anschließend das Universum abkühlt, ist jedes System darin bestrebt, seine Energie zu minimieren. Daher »rollt« das Axionfeld, mathematisch durch den Parameter θ beschrieben, seinem Minimum entgegen. Dort hält es nicht abrupt an, sondern schießt über das Ziel hinaus, bis es auf der anderen Seite wieder die Ausgangshöhe erreicht – wie eine Kugel in einer flachen Schale. Dann rollt θ zurück, und der Vorgang wiederholt sich (siehe Grafiken links oben).

Die in dieser Oszillation gespeicherte Energie ist eng mit der Zahl der Axionenteilchen im Universum verbunden. Da das Universum expandiert und sich die Axionen über das wachsende kosmische Volumen verteilen, wird die Schwingung zwar allmählich gedämpft. Doch das Maß, in dem dies geschieht, können wir aus nur wenigen Parametern, unter anderem der Dichte im Universum kurz nach dem Urknall, genau berechnen. Daher wissen wir, dass auch heute, 14 Milliarden Jahre später, die Energie der Oszillation noch ausreicht, um die gesamte Dunkle Materie oder zumindest einen großen Teil von ihr mit Axionen erklären zu können.

Denn was diese an Masse nicht mitbringen, machen sie durch ihre große Anzahl wieder wett. Demnach wären Axionen sogar ausgesprochen häufig: Im Durchschnitt sollten mehr als eine Milliarde von ihnen jeden Kubikzentimeter unserer galaktischen Umgebung bevölkern.

Wir haben also gute theoretische Gründe für die mögliche Existenz von WISPs. Doch gibt es auch experimentelle Hinweise? In der Tat deuten einige astrophysikalische Beobachtungen darauf hin. Aufschlussreich sind zum Beispiel energiereiche Photonen, die uns aus fernen Galaxien erreichen. Nachdem die Lichtteilchen unter extremen physikalischen Umständen entstanden sind, treffen sie bei ihrem Flug durchs All auf das energieärmere Licht gewöhnlicher Sterne und können mit ihm in Wechselwirkung treten. Dabei verwandeln sie sich in Paare aus Positronen und Elektronen (siehe die Abbildung auf S. 43) – die Lichtteilchen gelangen also oft gar nicht bis zur Erde. Neue Daten zeigen aber, dass das gewöhnliche Sternlicht für die energiereichen Photonen gar nicht so sehr als undurchdringliche »Wand« wirkt wie angenommen. WISPs liefern eine mögliche Erklärung: Den Theoretikern zufolge können sich Photonen unter bestimmten Umständen in ALPs verwandeln und wieder zurück. Es ist also denkbar, dass energiereiche Photonen nahe ihrer Quelle zu WISPs werden, dann ohne Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie – quasi mit Tarnkappe – das Weltall durchmessen, um sich in unserer kosmischen Nachbarschaft wieder in Photonen zurückzuverwandeln.

Auch eine weitere Überlegung verfolgen die Forscher, die allerdings noch deutlich spekulativer ist. Sterne wie unsere Sonne enden, nachdem ihr nuklearer Brennstoff verbraucht ist, als weiße Zwergsterne, die allmählich immer schwächer »glühen«. Berechnet man diesen Vorgang, stößt man auf Probleme: In der Realität scheinen die Sterne schneller auszukühlen als in der Theorie. Lässt sich das möglicherweise mit einer unbekanntem Teilchenstrahlung erklären, die Energie aus dem Inneren der Weißen Zwerge abtransportiert? Also zum Beispiel mit WISPs, die praktisch wechselwirkungsfrei aus dem Kern der Zwergsterne ins freie Weltall entkommen?

Bevor wir einen möglichen Zusammenhang dieser Phänomene mit WISPs nachweisen können, ist aber noch viel theoretische und experimentelle Arbeit nötig. Falls die Teilchen tatsächlich als Erklärung in Frage kommen, dann besitzen sie auch die »richtige« Wechselwirkungsstärke, um gleichzeitig als das gesuchte Baumaterial für die Dunkle Materie in Frage zu kommen.

In der Zwischenzeit müssen wir versuchen, den Teilchen auch im Labor auf die Schliche zu kommen. Dazu brauchen wir Experimente, mit denen wir extrem seltene Ereignisse nachweisen können. Die Umwandlung von Photonen in WISPs und zurück findet nämlich nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit statt. Zwei von uns, Lindner und Ringwald, suchen deshalb mit dem ALPS-Experiment (Any Light Particle Search) am Deutschen Elektronen-Synchrotron

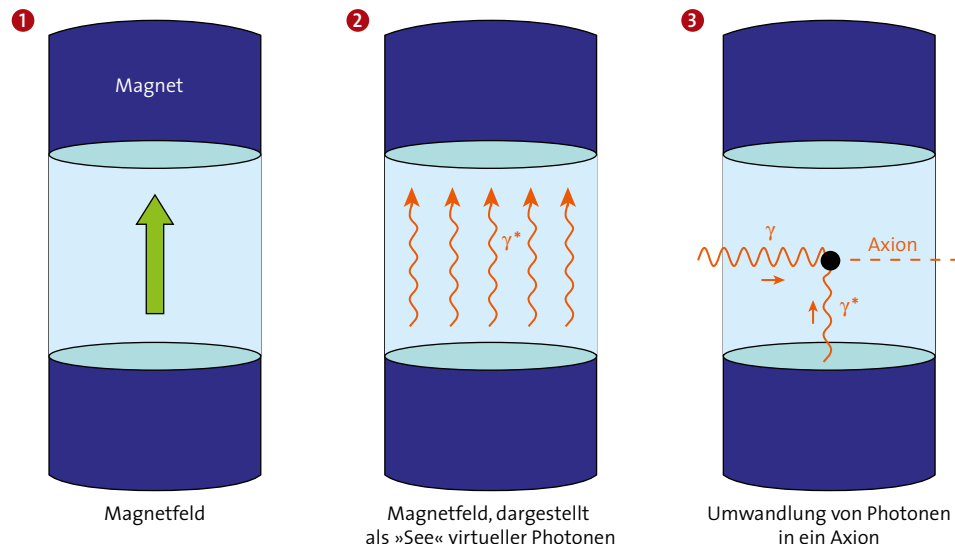
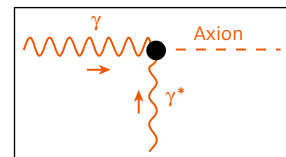
Trickreiche Verwandlung

Axionen und axionartige Teilchen, so genannte ALPs, können sich in zwei Photonen (Lichtteilchen) umwandeln und wieder zurück. Diesen Prozess zeigt das Diagramm rechts. Dabei stehen die sinusförmigen Linien für Photonen (γ) beziehungsweise für kurzlebige, so genannte virtuelle Photonen (γ^*); die gestrichelte Linie steht für das Axion. Von links nach rechts gelesen beschreibt es, wie zwei aufeinandertreffende Photonen zu einem Axion verschmelzen. Nur das Photon γ stammt aus einem Laser;

das langwelligere virtuelle Photon (γ^*) wird vom Magnetfeld **1** beigesteuert. Dieses lässt sich nämlich physikalisch auch als »See« virtueller Photonen auffassen **2**.

Grafik **3** zeigt die typische experimentelle Anordnung zur Erzeugung von Axionen im Labor.

Das Diagramm oben rechts kann man auch in umgekehrter Richtung lesen. Dann zeigt es den physikalisch ebenfalls möglichen Zerfall des Axions.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH ADAXX GROUP/UNIVERSITY OF WASHINGTON

(DESY) in Hamburg nach Licht, das durch eine völlig undurchsichtige Wand scheint – auch wenn das etwas verrückt wirken mag. Dafür schicken wir einen intensiven Laserstrahl durch ein starkes Magnetfeld (siehe die obere Abbildung unten) und hoffen, dass ein Photon aus dem Laser mit einem virtuellen Photon des Felds wechselwirkt und sich in ein Axion umwandelt. Dieses lässt sich von der Wand nicht aufhalten, trifft dahinter erneut auf ein Magnetfeld und wandelt sich wieder in ein Photon zurück, das wir anschließend detektieren. Ob es das »richtige« ist, erkennen wir daran, dass es dieselbe Energie und Polarisierung wie die Photonen aus dem Laser besitzt. Mit dem Prinzip kann man auch andere WISPs wie etwa die dunklen Photonen suchen.

Dieser Versuch funktioniert dann am besten, wenn man mit möglichst vielen Lichtteilchen pro Sekunde arbeitet. Betrachten wir das ALPS-I-Experiment am Hamburger DESY, das derzeit empfindlichste seiner Art. Es ist in der Lage, Photonen auch dann nachzuweisen, wenn nur alle 100 Sekunden ein einziges eintrifft. In diesem Zeitraum sendet ein 1000-Watt-Laser etwa 10^{24} Photonen aus. Im Prinzip reicht es also, wenn sich von je einer Billion ($= 10^{12}$) eines in ein Axion verwandelt, das die Wand durchquert. Dann kommen eine Billion Teilchen auf der anderen Seite an, von denen sich wieder eines zurück in ein Photon verwandelt.

Zu ALPS I gehört ein komplizierter optischer Resonator, in dem das Laserlicht vor der Wand viele Male hin- und hergespiegelt wird. Die Photonen laufen also ständig von Neuem durch das Magnetfeld und haben jedes Mal die Chance, dass sich zwei davon in ein Axion umwandeln. Auf diese

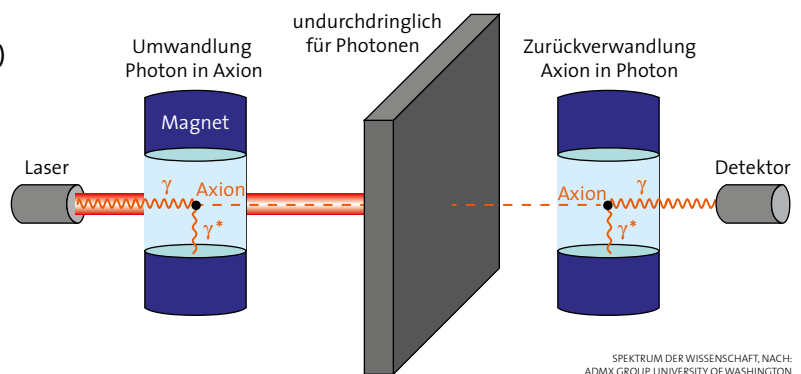
Weise verstärkt der Resonator die effektive Leistung des 4-Watt-Lasers auf 1200 Watt.

Doch erst mit dem im Bau befindlichen ALPS II stoßen wir in Bereiche vor, in denen wirklich Hoffnung auf den Fund neuer Teilchen besteht. Es soll mit einem 150-Kilowatt-Laser arbeiten, mit 20 Magneten statt mit nur einem, und außerdem kommt ein supraleitender Photonendetektor mit noch höherer Empfindlichkeit zum Einsatz. Darüber hinaus befinden sich bei ALPS II nun auch hinter der Wand Resonatorspiegel. Das Experiment wird so empfindlich sein, dass es auch noch ALPs nachweisen kann, die 1000-mal weniger stark mit Licht wechselwirken als diejenigen Teilchen, nach denen ALPS I sucht. Erste Versuchsläufe sind für das nächste Jahr geplant, das vollständige Experiment soll ab etwa 2018 betriebsbereit sein. Dann steht auch die erwähnte astrophysikalische Tarnkappen-Erklärung (siehe die Grafik rechts) auf dem Prüfstand: Trifft sie zu, dürften die Eigenschaften der axionartigen Teilchen in dem für ALPS II »sichtbaren« Wertebereich liegen.

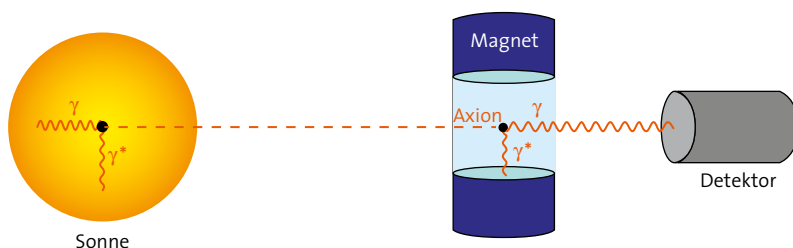
Ist die Sonne ein idealer Ort für die Produktion von Axionen?

Noch empfindlicher sind Experimente, bei denen der erste Schritt der Anordnung, nämlich die seltene Umwandlung von Photonen in WISPs im Labor, entfällt. Mit so genannten Helioskopen suchen Forscher darum auch nach WISPs aus der Sonne. Hier sind die Umstände für ihre Produktion extrem günstig: Unmengen von Photonen schwirren umher, außerdem herrschen starke elektromagnetische Felder. Vom Kern der Sonne aus schaffen es die WISPs ungehindert bis ins

LICHT-DURCH-DIE-WAND-VERSUCH (RECHTS): Bei Experimenten wie ALPS (Any Light Particle Search) am Hamburger DESY schießen Forscher mit einem Laser auf eine undurchsichtige Wand. Zuvor treten die Lichtteilchen durch ein Magnetfeld, in dem sich ein Photon aus dem Laser (γ) zusammen mit einem virtuellen Photon (γ^*) aus dem Magnetfeld in ein Axion umwandelt. Dieses durchquert die Wand und verwandelt sich dahinter wieder in ein detektierbares Photon (γ) zurück. Die beiden Umwandlungsprozesse sind jeder für sich allerdings sehr unwahrscheinlich; entsprechend ausgeklügelt sind die Experimente.

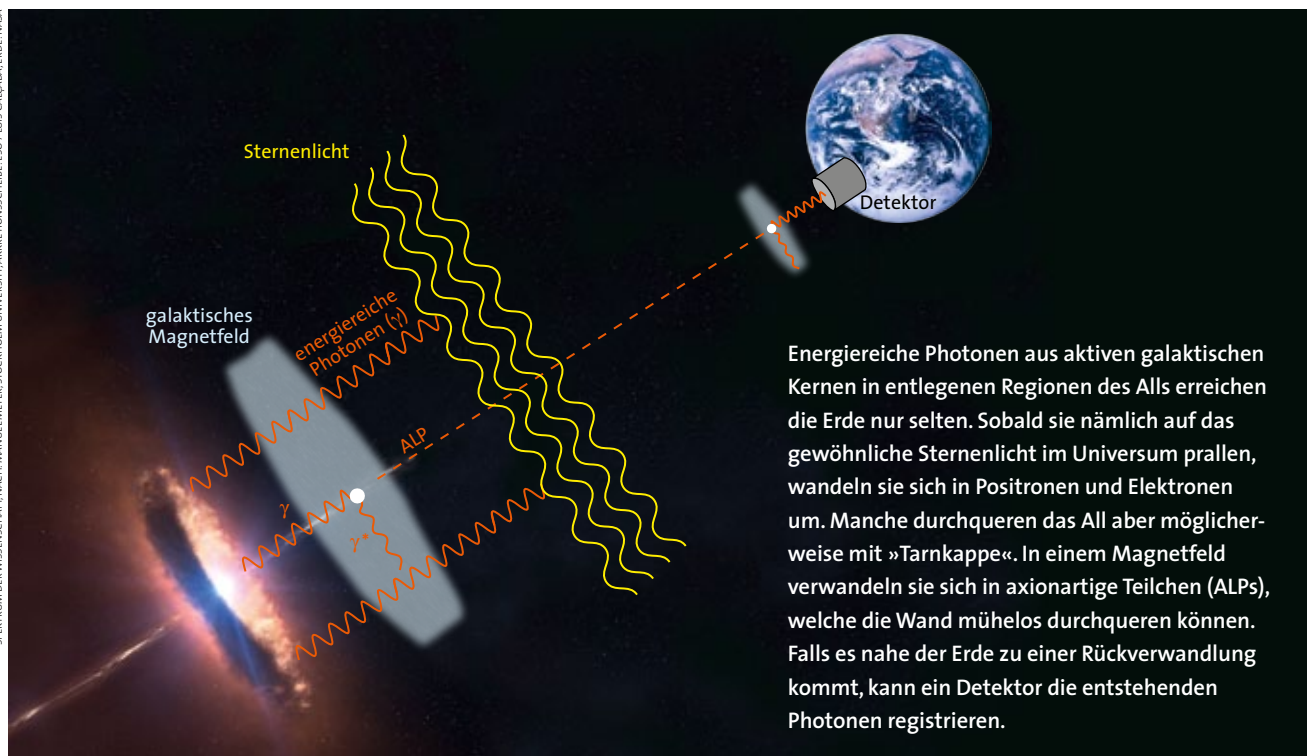


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: ADMX GROUP, UNIVERSITY OF WASHINGTON



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: GEORG G. RAFFELT, MPI FÜR PHYSIK

HELIOSKOP (LINKS): Im Kern der Sonne herrschen beste Bedingungen für die Erzeugung von Axionen. Anders als beim Licht-durch-die-Wand-Versuch (oben) können sich Experimente wie CAST (CERN Axion Solar Telescope) am CERN bei Genf daher auf die Rückverwandlung der solaren Axionen in detektierbare Photonen (γ) konzentrieren.



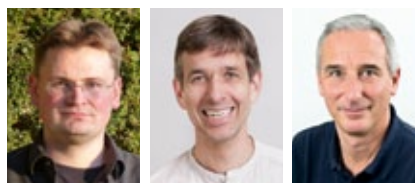
Energiereiche Photonen aus aktiven galaktischen Kernen in entlegenen Regionen des Alls erreichen die Erde nur selten. Sobald sie nämlich auf das gewöhnliche Sternlicht im Universum prallen, wandeln sie sich in Positronen und Elektronen um. Manche durchqueren das All aber möglicherweise mit »Tarnkappe«. In einem Magnetfeld verwandeln sie sich in axionartige Teilchen (ALPs), welche die Wand mühelos durchqueren können. Falls es nahe der Erde zu einer Rückverwandlung kommt, kann ein Detektor die entstehenden Photonen registrieren.

Labor, in dem man dann nur noch die zweite Hälfte des Experiments aufbauen muss, das sie in detektierbare Photonen zurückverwandelt. Das zurzeit beste Helioskop ist das CERN Axion Solar Telescope (CAST), ab 2020 könnte auch das International Axion Observatory (IAXO) in Betrieb gehen.

Aus dem Weltraum könnten uns Axionen ebenfalls in hoher Zahl erreichen, zumindest falls sie tatsächlich die lange gesuchten Dunkle-Materie-Bestandteile sind. Für Teilchen mit sehr schwachen Wechselwirkungen sind entsprechende Experimente sogar noch empfindlicher als Helioskope – denn in diesem Fall würden sehr viel weniger von ihnen aus der Sonne austreten. Der fortgeschrittenste Versuch, Axionen aus dem All zu detektieren, ist derzeit das Axion Dark Matter Experiment (ADMX) an der University of Washington in Seattle. In Europa überlegt man, ob sich das erwähnte IAXO dank seiner flexiblen Magnetfeldtechnologie auch für diese Art von Messung eignet oder ob andere Ansätze mehr Erfolg versprechen.

Festzuhalten bleibt: Die meisten Forscher vermuten weiterhin, dass die Dunkle Materie aus sehr schweren Teilchen besteht. Doch auch für die Existenz sehr leichter, sehr schwach wechselwirkender Teilchen, die als Bausteine der Dunklen Materie in Frage kommen, gibt es mittlerweile sehr gute Gründe. Angesichts ausgebliebener Erfolge anderswo ist die Suche nach ihnen nun wieder deutlich attraktiver geworden – umso mehr, als wir unsere experimentellen Möglichkeiten dramatisch verbessert haben und in den nächsten paar Jahren noch einmal deutlich steigern werden. Hinzu kommt, dass selbst große Experimente wie ADMX oder ALPS II für nur wenige Millionen Euro zu haben sind. Kein Zweifel: Die Früchte hängen niedrig – pflücken wir sie! ~

DIE AUTOREN



Joerg Jaeckel (links) ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg und forscht über Physik jenseits des Standardmodells. Er beschäftigt sich mit ultraleichten Teilchen, aber auch mit LHC-Physik. **Axel Lindner** (Mitte) ist experimenteller Teilchenphysiker am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) in Hamburg und Sprecher des ALPS-Projekts. **Andreas Ringwald** ist ebenfalls Physiker am DESY. Er konzentriert sich auf theoretische Vorhersagen der Eigenschaften ultraleichter Teilchen sowie auf ihre Überprüfung in Laborexperimenten und hat in diesem Rahmen das ALPS-Projekt angestoßen.

QUELLEN

Bähre, R. et al.: Any Light Particle Search II – Technical Design Report. In: Journal of Instrumentation 8, T09001, 8. September 2013
Baker, K. et al.: The Quest for Axions and other New Light Particles. In: Annalen der Physik 525, S. A93–A99, 2013
Jaeckel, J., Ringwald, A.: The Low-Energy Frontier of Particle Physics. In: Annual Review of Nuclear and Particle Science 60, S. 405–437, 2010
Redondo, J., Ringwald, A.: Light Shining through Walls. In: Contemporary Physics 52, S. 211–236, 2011

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281871

In stetem Fluss

Von Flüssigkeiten durchströmte Netzwerke bilden komplexe Strukturen aus, folgen dabei aber einem einfachen ordnenden Prinzip: der Minimierung der Energie-»Verluste« pro Zeiteinheit.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Der Begriff der Selbstähnlichkeit hat es weit gebracht: Zunächst war er lediglich unter Wissenschaftlern gebräuchlich, heute ist er auch der Öffentlichkeit mehr oder weniger geläufig. Doch das ist kein Wunder. Schließlich taucht das Phänomen nicht nur bei mathematischen Betrachtungen auf, sondern lässt sich auch im Adersystem von Organismen, bei Entladungen von Blitzen oder in schlichten Farnblättern, im Verlauf von Küstenlinien oder am Ast- und Wurzelwerk von Bäumen beobachten. Eine wichtige Erkenntnis geht dabei allerdings oft unter: Selbstähnlichkeit ist keineswegs eine irgendwie mysteriöse Eigenschaft bestimmter natürlicher Systeme, sondern sichtbarer Ausdruck ihrer Funktionsweise.

Zum Beispiel an einem verzweigten Netzwerk kleiner Flüsse lässt sich Selbstähnlichkeit gleich mehrfach beobachten. Obwohl die konkreten Verläufe der Flüssen weitgehend vom Zufall mitbestimmt sind, ähneln sich Netzwerke solcher Art doch zum Verwechseln. Auch gleicht ein Ausschnitt dem ganzen Netzwerk, ebenso wie ein Aus-

schnitt eines Ausschnitts und so weiter. Darüber hinaus ähneln Flussnetzwerke einander nicht nur selbst, sondern auch den Strukturen etwa von Adersystemen und Wurzelwerken. Doch wie sehr darf uns das eigentlich überraschen?

Ein Gleichgewicht, das Energie »verbraucht«

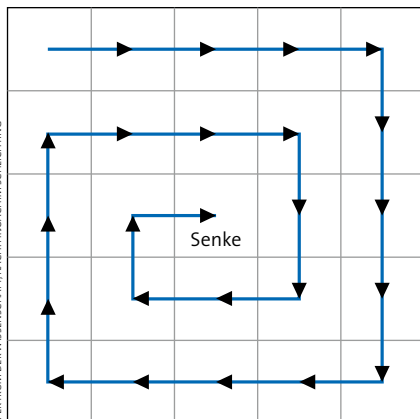
In dem betrachteten Flussnetzwerk sammelt sich im Idealfall nirgendwo Materie und Energie an. Es nimmt also im Mittel pro Zeiteinheit genau so viel Materie und Energie auf, wie es wieder an die Umgebung verliert. Wissenschaftler bezeichnen einen solchen stationären Zustand als Fließgleichgewicht. Diese besondere Art des Gleichgewichts »verbraucht« allerdings Energie: In Form des Materieflusses gewinnt das System hochwertige mechanische Energie – solche, mit der sich allerhand Nützliches anstellen ließe – und gibt sie als minderwertige, nämlich in Form von Wärme, an die Umgebung ab. Damit ist die Energie dissipiert (lateinisch für zerstreut), also für die weitere Nutzung »verloren« gegangen.

Die Natur wählt den kürzesten möglichen Weg.

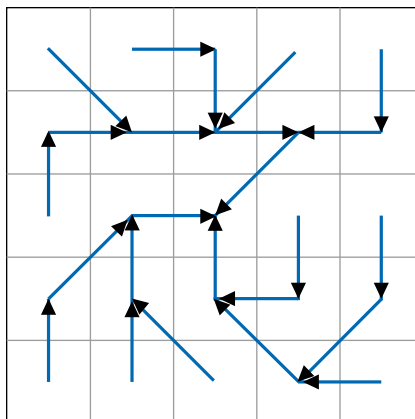
Aristoteles (384–322 v. Chr.)

Doch warum bringen Fließgleichgewichte oft gleichartige Formen und Strukturen hervor? Wie der belgisch-russische Nobelpreisträger Ilya Prigogine (1917–2003) zeigte, haben Fließgleichgewichte eines gemeinsam: Sie dissipieren pro Zeiteinheit nur ein Minimum an Energie. Das klingt zwar sehr abstrakt, lässt sich aber ganz konkret und Schritt für Schritt nachvollziehen. Dazu muss man sich klarmachen, von welchen Größen die Dissipation der Energie abhängt, etwa anhand einer geeigneten Fläche, auf die es regnet. Auf Grund der Reibung des fließenden Wassers auf dem Untergrund wird Energie dissipiert, und zwar umso mehr, je längere Wege das Wasser zurücklegt. Außerdem leuchtet ein, dass die dissipierte Energie mit der Fläche wächst, auf der Reibung stattfindet. Andererseits: Transportiert das Flussbett mehr Wasser, so sinkt die Dissipation pro transportierter Masseneinheit. Bei größeren Volumina ist nämlich die sie begrenzende Fläche verhältnismäßig kleiner und damit auch die Reibung.

1



2



Regenwasser, das auf eine zur Senke in der Mitte hin geneigte 5×5 -Fläche fällt, kann auf unterschiedliche Weisen abfließen. Zwei Beispiele sind gezeigt (1 und 2). Welche Variante ist energetisch günstiger? Aus den Grafiken rechts lässt sich das ermitteln. Um die Dissipationsrate \bar{P} als Summe aller $\sqrt{Q_i} \cdot l_i$ berechnen zu können, muss man durch einfache Überlegung die einzelnen Durchflussmengen (Q_i , gemessen in der Zahl der Tropfen) und Weglängen (l_i) ermitteln. 2a: In der Matrix der Durchflussmengen Q_i bezeichnet jede Zahl

Am wenigsten Energie geht folglich dann »verloren«, wenn sich die anfänglich kleinen Entwässerungsströme schnell zu größeren Strömen vereinigen. Andererseits ist ihr Anschwellen dadurch begrenzt, dass sie sich gegenseitig das Wasser abgraben, denn ein Teilstrom vermag seinen eigenen Energieverlust lediglich dadurch zu verringern, dass er den eines anderen erhöht. Außerdem können einzelne »Flussbetten« nicht gänzlich austrocknen, schließlich fällt der Regen überall hin.

Bis ein Netzwerk optimal im Sinn minimaler Energiedissipationsrate ist, durchläuft es daher eine Art evolutionären Prozess, bei dem es von einer anfänglichen Zufallskonfiguration ausgeht und nach und nach abweichende Möglichkeiten »durchspielt«. Die im Sinne des prigogineschen Prinzips günstigeren Möglichkeiten haben dabei größere Chancen zu überleben. Am Ende steht ein System, das nur noch ein wenig um seinen Idealzustand herum fluktuiert.

Prigogines Behauptung Schritt für Schritt nachrechnen

Eine aus 5×5 Elementen bestehende und zur Mitte hin vertiefte Fläche liefert ein einfaches Modell. Regnet es darauf, fließt das Wasser letztlich in die zentrale Senke. Jedes Flächenelement i wird pro Zeiteinheit von einem Tropfen getroffen und auf diese Weise mit Energie und Materie versorgt. Gehen wir weiter davon aus, dass der beim

die Summe der Tropfen, die auf das jeweilige Feld herabregnen (pro Zeiteinheit je einer) sowie von Nachbarfeldern hineinfließen. In der zentralen Senke sammeln sich alle 25 auf das Feld gefallenen Tropfen. **2b:** Jede Zahl bezeichnet die Weglänge l_i , die ein Tropfen vom jeweiligen Feld aus zum nächsten zurücklegt. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten horizontaler oder vertikaler benachbarter Flächen wird einheitlich als $l_i=1$ angenommen. Dementsprechend beträgt der Abstand zwischen »diagonalen« Nachbarn $\sqrt{2}$.

Fließen des Wassers durch ein Flächenelement i dissipierte Energiestrom – die Dissipationsrate P_i – proportional zur von dort zum Nachbarelement zurückgelegten Weglänge l_i , zum Gefälle s_i und zur Zahl der pro Zeiteinheit geflossenen Tropfen Q_i ist.

Das lässt sich noch vereinfachen, denn man weiß aus empirischen Untersuchungen, dass s_i umgekehrt proportional zur Wurzel aus Q_i ist, und

kann daher das Produkt $s_i \cdot Q_i$ durch $\sqrt{Q_i}$ ersetzen. Für jedes Flächenelement i ergibt sich so die zugehörige Dissipationsrate $P_i = \alpha \cdot \sqrt{Q_i} \cdot l_i$. Da es uns auf den absoluten Wert dieser Größe nicht ankommt, betrachten wir aber nur die durch die Proportionalitätskonstante dividierte Größe $\bar{P}_i = P_i / \alpha = \sqrt{Q_i} \cdot l_i$ genauer.

Der Einfachheit halber nehmen wir für die einzelnen Elemente eine Seiten-



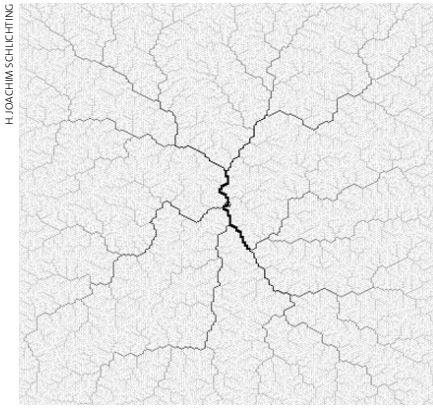
Auch das gewaltige Netzwerk des Amazonas (blau; die anderen Farben im hellen Bereich geben unterschiedliche Höhen an) entsteht, weil jedes Fleckchen Erde so entwässert werden muss, dass die Energiedissipation des Gesamtsystems möglichst klein wird.

2a Durchflussmengen Q_i

1	1	2	1	1
2	4	8	11	2
1	6	25	1	1
2	3	7	2	2
1	1	1	4	1

2b Weglängen l_i

$\sqrt{2}$	1	1	$\sqrt{2}$	1
1	1	1	$\sqrt{2}$	1
1	1	0	1	1
$\sqrt{2}$	1	1	1	$\sqrt{2}$
1	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{2}$	1



Dieses simulierte »Flussnetzwerk« basiert auf einem hexagonalen Gitter mit 200×200 Feldern. Jeder Teilfluss ist mit einer Dicke dargestellt, die der Stärke des durch ihn fließenden Wasserstroms entspricht. Der Abfluss befindet sich in der Mitte.

länge von 1 an. Dann kann die Länge l_i nur die Werte 1 oder $\sqrt{2}$ annehmen – je nachdem, ob die Tropfen in ein Feld fließen, das an einer Seitenlinie angrenzt oder das diagonal benachbart ist. Nun müssen wir zur Ermittlung von \bar{P}_i nur noch die jeweilige Wegstrecke l_i mit der Wurzel aus der Anzahl der Tropfen multiplizieren, die das jeweilige Element i aufgenommen hat. Die Gesamtdissipationsrate \bar{P} erhält man, indem man die einzelnen \bar{P}_i aufsummiert.

Vergleichen wir zwei Beispiele. Im ersten Fall (Grafik 1, S. 44) fließt das Wasser ab, indem es entlang eines spiralartigen Wegs »systematisch« alle Felder durchquert und schließlich in der zentralen Senke landet. Dieser Weg geht offenbar mit einer sehr großen Dissipationsrate einher. Der zweite Fall (Grafik 2) kommt natürlichen Verhältnissen schon näher. Von außen heranfließende Tropfen vereinigen sich, vermeiden Umwege und streben mehr oder weniger direkt in Richtung des Zentrums. Dass diese Variante energetisch günstiger ist, lässt sich nach unserem Berechnungsschema leicht überprüfen. Die Werte für die Zahl Q_i der durch das Feld i fließenden Tropfen und die von ihnen zum nächsten Feld zurückgelegten Strecken l_i kann man sich leicht überlegen (Grafik 2a und 2b).

Addiert man nun die Produkte $\sqrt{Q_i} l_i$ für jedes Feld, erhält man als Dissipationsrate $\bar{P} = \sqrt{1} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{2} \cdot 1 + \sqrt{1} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{2} \cdot 1 + \sqrt{4} \cdot 1 + \sqrt{8} \cdot 1 + \sqrt{11} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{2} \cdot 1 + \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{6} \cdot 1 + \sqrt{25} \cdot 0 + \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{3} \cdot 1 + \sqrt{7} \cdot 1 + \sqrt{2} \cdot 1 + \sqrt{2} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{1} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{4} \cdot \sqrt{2} + \sqrt{1} \cdot 1 \approx 41,07$. Führt man dieselbe Rechnung für den spiralförmigen Verlauf durch (Grafik 1; zugehörige Wertepaare Q_i, l_i nicht abgebildet), so erhält man den fast doppelt so großen Wert 80,63. Erwartungsgemäß erweist sich die natürlicher wirkende Variante als energetisch günstiger.

»Evolution« eines Netzwerks

Überlassen wir das System nun sich selbst. Ganz gleich, welche Ausgangskonfiguration vorliegt: Prigogine zufolge wird sich das System allmählich einem Zustand mit geringster Dissipationsrate annähern. Denn im Lauf der Zeit erzwingen Störungen unterschiedlicher Art, etwa im Weg liegendes Geröll, neue Verzweigungen. Falls diese zufällig »besser« sind als die alten – sie das Wasser also Energie sparend auf insgesamt kürzeren Wegen ableiten –, sind sie widerstandsfähiger gegen weitere Störungen und »überleben« entsprechend länger.

Am Ende steht eine Idealgestalt des Netzwerks. In unserer überschaubaren 5×5 -Modelllandschaft können wir sie noch durch systematisches Probieren ermitteln, für die Berechnung größerer Flächen brauchen wir aber einen Computer. Dann erweist sich, dass schon die Simulation einer aus 200×200 Elementen bestehenden Fläche ein Ergebnis liefert, das einem realen Flussnetzwerk ziemlich ähnlich sieht (oben).

Allerdings nur, wenn wir einige Details beachten. Ausgehend von einer beliebigen Struktur müssen wir für Störungen sorgen, also dafür, dass die Wege zufällig variieren können. Außerdem hat die Software tolerant zu sein: Zumindest vorübergehend muss sie auch Entwässerungswege erlauben, die zwar lokal, jedoch nicht global optimal sind – mit dem Ziel, das System bei einem der nächsten Iterationsschritte in einen global noch günstigeren Zustand gelangen zu lassen. Besonders realis-

tisch wirkt die Darstellung des simulierten Netzwerk übrigens dann, wenn die Flussabschnitte umso dicker gezeichnet sind, je größer die Stärke des in ihnen fließenden Wasserstroms ist – so wie auch in der Natur die Breite des Flusses im Allgemeinen mit der transportierten Wassermenge zunimmt.

Offenbar lässt sich die so komplex wirkende Struktur energie- und materiedurchflossener Netzwerke tatsächlich auf ein einfaches Prinzip zurückführen. In diesem drückt sich wiederum ein noch einfacheres aus, nämlich die Tendenz jedes Systems, ein thermodynamisches Gleichgewicht, also einen Zustand maximaler Entropie, anzustreben. In diesem ist alle hochwertige Energie in »nutzlose« Wärme umgewandelt, die völlig gleichmäßig den Raum erfüllt. Weil dies aus Sicht unseres Systems allerdings ein unerreichbarer Zustand ist – schließlich wird ihm ständig neue Materie und Energie zugeführt –, tut es das Zweitbeste: Es bildet ein Fließgleichgewicht aus und kommt auf diese Weise dem thermodynamischen Gleichgewicht so nah wie nur möglich. ∞

DER AUTOR



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

QUELLEN

Schlichting, H.J., Nordmeier, V.:

Thermodynamik und Strukturbildung am Beispiel der Entstehung eines Flussnetzwerkes. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 53/8, S. 450–454, 2000

Sun, T. et al.: Minimum Energy Dissipation Model for River Basin Geometry. In: Physical Review E49, S. 4865–4872, 1994

WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281872

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Wie hängen Schlaf und Bewusstsein zusammen?
Warum schlafen wir?
Können wir im Schlaf lernen?

Do 05.06.2014 / 19.00 / HANNOVER SCHLAF SCHÖN! – WIESO SCHLÄFT DER MENSCH?

MIT **Prof. Dr. Jan Born** Centrum für Integrative Neuwissenschaften, Universität Tübingen, **Prof. Dr. Petra Gehring** Philosophin, Technische Universität Darmstadt, **Dr. Michael Czisch** Max-Planck-Institut für Psychiatrie
MODERIERT VON **Steve Ayan** Redaktion Gehirn+Geist

VERANSTALTUNGSORT Tagungszentrum Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG <https://veranstaltungen.volkswagenstiftung.de/>

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

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Europas karolingisches Erbe

Im Mittelalter galt Karl der Große als vorbildhafte Herrscherpersönlichkeit. Heute scheint er nur noch eine nostalgische Erinnerung zu sein. Doch auch für das moderne Europa taugt er noch als Leitfigur.

Von Max Kerner

Seine Zeitgenossen bezeichneten den Frankenkönig Karl, den der Papst am Weihnachtstag des Jahres 800 zum Kaiser krönte, als einen »großen und rechtgläubigen Herrscher« sowie als »Vater und Leuchtturm Europas«. Anders als wir heute verstanden sie unter Europa aber noch kein Staatengebilde, denn die Nationen und ihre Grenzen sollten sich erst im Lauf des Mittelalters ausbilden. Europa war für diesen Herrscher daher vor allem der Entwurf einer gemeinsamen Kultur – geschaffen von Intellektuellen, die das geistige Leben von der Sprache über die Schrift bis hin zur kalendarischen Zeitrechnung reformierten und antikes Wissen aus Mathematik, Astronomie und Logik zusammentrugen. In der Rückschau der Historiker wird daraus eine »karolingische Renaissance«, welche die berühmte italienische Rückbesinnung auf die Antike sozusagen vorwegnahm.

In der ersten Hälfte seiner Herrschaftszeit beschäftigte Karl den Großen allerdings vor allem der Ausbau seines Machtbereichs. Ausgehend von den Gebieten der fränkischen Merowinger und ihrer Nachfolger, der frühen Karolinger, schuf er ein Großreich (siehe Karte S. 50), das der römisch-germanischen Welt der Spätantike und des frühen Mittelalters eine zukunftsweisende politische und kulturelle Struktur gab und, wenn man so will, eine erste Einigung Europas darstellte.

AUF EINEN BLICK

ERNEUERUNG UND INTEGRATION

- 1 Karl der Große ist heute vielen eine zwiespältige Figur, da er sein Reich mit brachialer Gewalt schuf. Doch in der Phase der Konsolidierung setzte er auf eine kluge **Integrationspolitik**.
- 2 Statt eine zentralistische Regierung nach dem Vorbild des antiken Roms anzustreben, ließ der Frankenherrscher den verschiedenen Stämmen viel **Eigenständigkeit**.
- 3 Zusammenhalt schuf die Förderung einer **Gelehrtenkultur** – als karolingische Renaissance in die Geschichte eingegangen – sowie die Verbreitung und Stützung des **christlichen Glaubens**.

Dazu setzte er auf aggressive Expansion und zog gegen etliche Gegner zu Felde: gegen die Langobarden in Italien, die Sachsen zwischen Weser und Elbe, die Bayern südlich der Donau, die christlichen Basken und muslimischen Sarazenen im Pyrenäenraum sowie schließlich gegen verschiedene Grenzvölker von den Dänen im Norden bis zu den Awaren im Südosten. Aus Sicht des Historikers zeitigten diese Kriege, so blutig sie auch mitunter waren, fruchtbare Wirkungen: In Italien etwa beschränkte Karl den Einfluss Ostroths – Byzanz sollte nie wieder genug Macht besitzen, um das einstige Kernland des verlorenen Imperiums zurückzugewinnen. Dadurch konnte sich ein römisch-germanisch geprägtes Zusammenleben in Oberitalien entwickeln, während in Mittelitalien der Kirchenstaat zur festen Größe wurde. Aus der fränkischen Grenzmark in Nordspanien sollten sich später die Königreiche Katalonien und Aragon entwickeln, die im Hochmittelalter maßgeblich die »Reconquista« vorantrieben, die Rückeroberung Spaniens von den Muslimen.

Die Sachsenkriege sowie sein gewaltsames Vorgehen gegen Tassilo III., den letzten der bayerischen Herzöge aus der Familie der Agilolfinger, verliehen dem im ehemaligen Gallien verankerten und damit stark romanisch geprägten Frankenreich ein deutliches germanisches Gewicht. Sachsen – das Gebiet des heutigen Westfalen und Niedersachsen – wurde christianisiert sowie durch Münzstätten und Markttorte, Schulen und Bibliotheken, durch eine lateinische Schriftkultur und Graftschäftsverfassung karolingisch geformt.

Um 800 erstreckte sich Karls Herrschaftsgebiet von der Nordsee bis nach Mittelitalien, von den Pyrenäen bis an die Elbe – eine Fläche von gut einer Million Quadratkilometer. Damit stand der Frankenherrscher nach der Reichsgröße bemessen gleichrangig neben dem Kaiser in Byzanz und dem Kalifen in Bagdad. So war es nur konsequent, dass Karl am Weihnachtstag des Jahres 800 zum römischen Kaiser gekrönt wurde und eine vergleichbare weltgeschichtliche Bedeutung erhielt.

Es handelte sich bei diesem Frankenreich mit seinen Bistümern, Abteien, Königshöfen und Pfalzen aber keineswegs

um ein homogenes Gebilde oder gar einen Einheitsstaat mit einer zentral ausgerichteten Verwaltung wie im Römischen Reich. Eher träfe der moderne Begriff Vielvölkerstaat zu: Die verschiedenen Volksgruppen behielten ihre Stammesgebiete, ihre Rechts- und Gesellschaftsgefüge. Die jeweilige Muttersprache hat Karl der Große sogar nachdrücklich unterstützt. Für die fränkisch-germanischen Sprachen hat er ange-regt, eine Grammatik zu erstellen, sowie den Monaten wie den Winden fränkische Namen geben lassen. Solchen Eigenständigkeiten standen kirchliche und weltliche Verordnungen gegenüber, die über den Stammesrechten rangierten. Hinzu kamen Treueide, die Untergebene auf Herrscher und Reich verpflichteten. Außerdem installierte Karl ein System von geistlichen und weltlichen Königsboten, die er in die Amts- und Gerichtsbezirke schickte, um dort die Arbeit der Grafen

SCHWERPUNKT

KARL DER GROSSE – 1200. TODESJAHR

- | | |
|--|-------|
| ▶ Europas karolingisches Erbe | S. 48 |
| ▶ Aachen – Spiegelbild der Reichspolitik | S. 52 |

und damit der vor Ort Verantwortlichen zu kontrollieren. »In Vielfalt geeint« – das Motto der heutigen Europäischen Union passte durchaus auf dieses frühmittelalterliche Reich.

Vermutlich war dem Kaiser bewusst, dass dieser durch ihn verordnete Überbau noch nicht ausreichte. Daher stellte er der Vielfalt weitere einheitsstiftende Maßnahmen an die Seite. So wurde mit der karolingischen Minuskel eine Schrift



DOMKAPITEL AACHEN / ANDREAS HERRMANN

Die aus Silber gefertigte und teilvergoldete »Karlsbüste« zeigt ein idealisiertes Porträt Karls des Großen. 1349 stiftete König Karl IV., ein Bewunderer des Franken, das Reliquiar: Es enthält ein Schädelfragment des Karolingers.

entwickelt, die um 800 als Teil insbesondere einer Schul- und Bildungsreform allgemeine Verbreitung fand. Sie wirkt noch heute nach: Über verschiedene Zwischenstufen entstanden daraus die Kleinbuchstaben unserer heutigen lateinischen Schrift.

Auf Einheit zielte auch die Pflege der aus der Spätantike überkommenen lateinischen Sprache. Diese war das Kommunikationsmittel der kirchlichen und der gelehrten Welt. Man sprach sie am Kaiserhof und verwendete Latein in den Skriptorien der großen Klöster (in Tours, Lyon, Verona, Fulda und an anderen Orten), sei es bei Abschriften der Bibel oder der Rezeption antiker Werke christlicher wie heidnischer Autoren.

Frühmittelalterliche Einheitswährung

Auf Initiative des Kaisers wurde zudem eine Münze geprägt, die im gesamten Frankenreich galt: der karolingische Denar. Verglichen mit der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft von 1957 und ihren Grenzen war dies sozusagen die erste und vor dem Euro auch letzte »Einheitswährung« in Europa (siehe Bilder rechts). Einige der wenigen erhaltenen Stücke zeigen auf der Vorderseite Karl im Stil eines römischen Imperators mit Lorbeerkranz und der dazu passenden Umschrift »KAROLUS IMPERATOR AUGUSTUS«. Die Rückseite ziert eine stilisierte, an antike Vorbilder angelehnte Tempelarchitektur, deren Legende »religio christiana« lautet, wobei die ersten Buchstaben des Wortes »christiana« griechisch, die letzten lateinisch sind. Folgt man dem Frankfurter Mittelalterforscher Johannes Fried dann dürfte Karl der Große sich hier »als wahrer Schutzherr der Christenheit« und insbesondere als Verteidiger des Heiligen Grabes in Jerusalem verstanden haben.

Der gemeinsame Glaube war die stärkste Einheitskraft im karolingischen Großreich. Ihn zu schützen und zu fördern war zentraler Bestandteil des politischen Programms Karls, der laut Einhard »die christliche Religion, mit der er seit seiner Kindheit vertraut war, gewissenhaft und fromm in höchsten Ehren hielt«. Dies veranlasste Karl auch dazu, die Christianisierung der Sachsen und deren Eingliederung ins Frankenreich mit Schwert und Gewalt zu betreiben, was bereits in

seiner Zeit nicht ohne Kritik blieb. Neben der äußeren Missionierung prägte Karl das kirchliche Leben seiner Zeit durch die Ernennung von Bischöfen und durch Bestimmungen für Verfassung und Verwaltung der fränkischen Kirche. Er kümmerte sich um die Geistlichen, indem er deren theologische und sprachliche Kenntnisse verbessern half, die ihrerseits dafür sorgen sollten, dass die Laien das »Vater unser« und das »Credo« als religiöses Grundwissen beherrschten.

Seine Einflussnahme ging so weit, dass Beschlüsse der Synoden seiner Zustimmung bedurften. Auch bei dogmatischen Streitigkeiten innerhalb der Kirche sollte sich selbst der Papst mitunter seinem Willen beugen. So sorgten zu seiner Zeit unter anderem zwei Fragen für Zündstoff: Durften religiöse Bilder verehrt werden? Und: War Jesus Christus als Gottes Sohn ein Gott, ein Mensch oder ein Adoptivsohn Gottes? Diese und andere theologische Fragen hat Karl der Große in seiner Zeit weit gehend klären können. Die von ihm erbaute Aachener Marienkirche wurde zum sakralen Zentrum einer reichsweiten Liturgie. Mit ihrem Ritus, ihren Gebets- und Liedtexten sowie mit den für die Messe ausgewählten Bibelpassagen erhielt die abendländische Kirche – dem Kölner Mediävisten Theodor Schieffer (1910–1992) zufolge – ihre römisch-fränkische Eigenart. Sein Selbstverständnis dokumentierte Karl in einem Schreiben, das er 796 dem neu gewählten Papst Leo III. (795–816) überreichen ließ: »Unser ist es, mit der Hilfe des göttlichen Erbarmens die heilige Kirche Christi ... außen mit den Waffen zu verteidigen und innen mit der Erkenntnis des katholischen Glaubens zu festigen. Euer ist, heiligster Vater, mit zu Gott erhobenen Händen wie Moses unser Waffenwerk zu unterstützen.«

Trotz seines Bemühens zerfiel dieses Europa kurz nach Karls Tod 814, aufgeteilt unter seinen streitenden Enkeln;

Um das Krönungsjahr 800 war die Welt des einstigen römischen Imperiums und seiner Nachbarn vor allem in drei Einflusssphären aufgeteilt: Das Byzantinische Reich, die islamischen Kalifate sowie das Reich Karls des Großen, das sein fränkisches Königreich sowie Gebiete in Italien umfasste.





Der karolingische Silberdenar war die im Frankenreich gültige Währung. Seine Vorderseite präsentierte Karl den Großen als römischen Imperator, die Rückseite zeigte einen griechischen Tempel – ebenfalls ein Anklang an die verlorene Größe der Antike.

später gingen aus dem Frankenreich unter anderem Frankreich und Deutschland hervor. Trotzdem ist nach Meinung des vormals Münchener Historikers Rudolf Schieffer das, was die europäischen Völker geschichtlich verbindet, auf Karl den Großen zurückzuführen. Dies gelte insbesondere für die christliche Ausrichtung, die im Mittelalter »über alle politischen oder sprachlichen Grenzen hinweg auf den Pilgerwegen, in den großen Orden, an den Universitäten, auf den Kreuzzügen, bei den allgemeinen Konzilen im universalen Verbund der lateinischen Kirche« gelebt wurde.

Christentum und Kirche bildeten bis weit in die Neuzeit hinein die Grundlagen europäischer Kultur. Während sie in anderen Erdteilen eher an Bedeutung gewinnen, Tendenz steigend, haben sie in ihrem früheren Kernland an Boden verloren. Der Münchener Neuzeithistoriker Thomas Nipperdey (1927–1992) spricht gar von einem »Stück Altertum, erhaltenswert, aber nicht eigentlich mehr existenziell«. Technik, Medizin und soziale Sicherungssysteme haben diese Funktionen übernommen. Darüber hinaus lässt sich der Wahrheitsanspruch des Christentums durch die Erkenntnisse moderner Wissenschaften anzweifeln.

Ist Karl der Große ebenfalls nur mehr eine nostalgische Erinnerung? In den 1950er Jahren, als die Welt sich nach zwei verheerenden Weltkriegen neu erfinden musste und die europäischen Staaten eine Annäherung versuchten, diente er noch einmal als Leitbild einer neuen Einheit. Adenauer, Schumann und De Gasperi – sie traten in Karls Fußstapfen und sind selbst inzwischen Geschichte.

Die Frage, ob Karl der Große noch zum Vorbild taugt, verweist auf eine andere: Welche Werte halten Europa heute zusammen? Nicht zuletzt die jüngsten Ereignisse in der Ukraine machen die Antwort leicht: Friede und Freiheit, die Achtung der Menschenrechte, Solidarität, Aufklärung und Toleranz. Wir stellen uns zudem der Herausforderung, den Reichtum einheimischer Kulturen zu bewahren und zu entfalten, gleichzeitig aber Einheit zu stiften. Dies ist kein einfacher Weg, wie die Zuwanderungsdebatte zeigt.

Zu den schwierigsten Aufgaben gehört wohl, den Islam in Europa zu integrieren. Durch Beitritte osteuropäischer Staaten in die Gemeinschaft sowie durch Zuwanderung ist die muslimische Religionsgruppe gewachsen und verlangt nach adäquaten Lösungen für die verschiedenen Problemthemen. Und auch dafür bietet Karl der Große Anknüpfungspunkte, wie der belgische Mediävist Henri Pirenne (1862–1935)

schon vor knapp 80 Jahren darlegte. In »Mahomet et Charlemagne« postulierte er, dass gerade das Vordringen der Araber im 7. und 8. Jahrhundert bis nach Spanien die Spätantike beendete. Mit anderen Worten: Die Entstehung Europas war schon in seinen Anfängen zumindest indirekt mit dem Aufkommen des Islam verbunden.

Das illustriert auch der westöstliche Kulturaustausch, den Karl der Große mit dem abbasidischen Kalifen Harun al-Rashid in Bagdad pflegte. 797 hatte der Frankenherrscher eine Gesandtschaft dorthin geschickt, um über die Zugangsrechte von Christen zu den heiligen Stätten Jerusalems zu verhandeln. Als sie fünf Jahre später wieder in Aachen eintrafen, brachten die Diplomaten einen weißen Elefanten mit, Abul Abaz genannt und mit diesem Namen auf die Herrschaftsfamilie der Abbasiden verweisend – nicht nur ein kostbares diplomatisches Geschenk, sondern auch laut dem Jenaer Mediävisten Achim Hack »ein Mittel der Herrschaftsrepräsentation«, das für den Schenker wie den Beschenkten eine Zeichenfunktion besaß.

Ungeachtet der eigentlich unvereinbaren religiösen Glaubensauffassungen von Christentum und Islam bekundete der Kalif dem westlichen Kaiser gegenüber Respekt und Anerkennung, was er durch eine Gesandtschaft seinerseits bezeugte. Darüber hinaus bahnten diese diplomatischen Kontakte die kulturellen und wissenschaftlichen Wanderwege, auf denen antike Texte zur Geografie, Astronomie, Medizin und Religion aus dem arabischen Raum nach Europa gelangten. Hier wurde jener bedeutsame Einfluss vorbereitet, den die arabische Kultur auf das Abendland entfaltete. ~

DER AUTOR



Der Mediävist **Max Kerner** ist Emeritus am Historischen Institut der RWTH Aachen und hat sich eingehend mit Karl dem Großen und dessen Zeitalter befasst. Er ist Sprecher des Wissenschaftlichen Beirats zur Vorbereitung der Aachener Karlsaustellungen 2014.

QUELLEN

Fried, J.: Karl der Große. Gewalt und Glaube. C.H.Beck, München 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281875

Aachen – Spiegel- bild der Reichspolitik

Mit dem Königssaal und der Marienkirche – dem heutigen Aachener Dom – setzte Karl der Große seine weltliche Macht monumental in Szene und präsentierte sich als tiefgläubiger Herrscher.

Von Clemens M.M. Bayer

Wohl um das Jahr 829 notierte der fränkische Gelehrte Einhard (um 770–840) in seiner Biografie Karls des Großen, dieser habe die Dämpfe der Aachener Thermalquellen genossen und gern im warmen Wasser gebadet. »Deshalb errichtete er in Aachen einen Königspalast und wohnte dort dauerhaft in den letzten Jahren seines Lebens bis zu seinem Tod.« Diese Aussage ist keineswegs selbstverständlich, denn im fränkischen Reich der Merowinger wie der Karolinger gab es keine Hauptstadt, in der ein Herrscher residierte, sondern eine Vielzahl so genannter Pfalzen (von lateinisch »palatium«), bei denen es sich meist um königliche Gutshöfe handelte, die mitunter palastartig ausgebaut waren. Solch dezentrale Herrschaftsausübung war die einzige Möglichkeit, das ausgedehnte und heterogene Reich zu regieren. Weitere Großpfalzen ließ Karl auch in Nimwegen und Ingelheim errichten, doch deutet manches darauf hin, dass er etwa ab 794 vorhatte, in Aachen mehr Zeit als andernorts zu verbringen. Das auffälligste und wohl auch wichtigste Indiz dafür ist die Gründung des Marienstifts: Nirgendwo sonst richtete Karl selbst eine geistliche Gemeinschaft ein.

Aachen liegt am nördlichen Rand der Eifel in einem weiten Talkessel. Seine ergiebigen und mit gut 50 Grad Celsius recht heißen Thermalquellen sprudeln aus der Flanke eines lang gestreckten Hügels. Die Römer, immer an Badeanlagen und Thermalquellen interessiert, legten um Christi Geburt dort eine Plansiedlung an, deren Hauptachse auf dem Hügelrücken verlief (heute: Jakobstraße und Nordseite des Markts), Querstraßen gingen im rechten Winkel davon ab. Vermutlich hieß die in keinem antiken Text erwähnte Siedlung »Aquae« (deutsch: »Wasser«), wie dies bei anderen römischen Orten mit Thermalquellen auch der Fall war; der ab etwa 790 belegte Zusatz »Grani« (»Aquae Grani«, deutsch: »Wasser des Granus«) dürfte ebenfalls bereits römischen Ursprungs sein und soll auf einen keltischen Heilgott zurückgehen.

Noch im späten 4. Jahrhundert erfolgten Umbauarbeiten an einer der Thermen – dieses Bad war also damals noch in

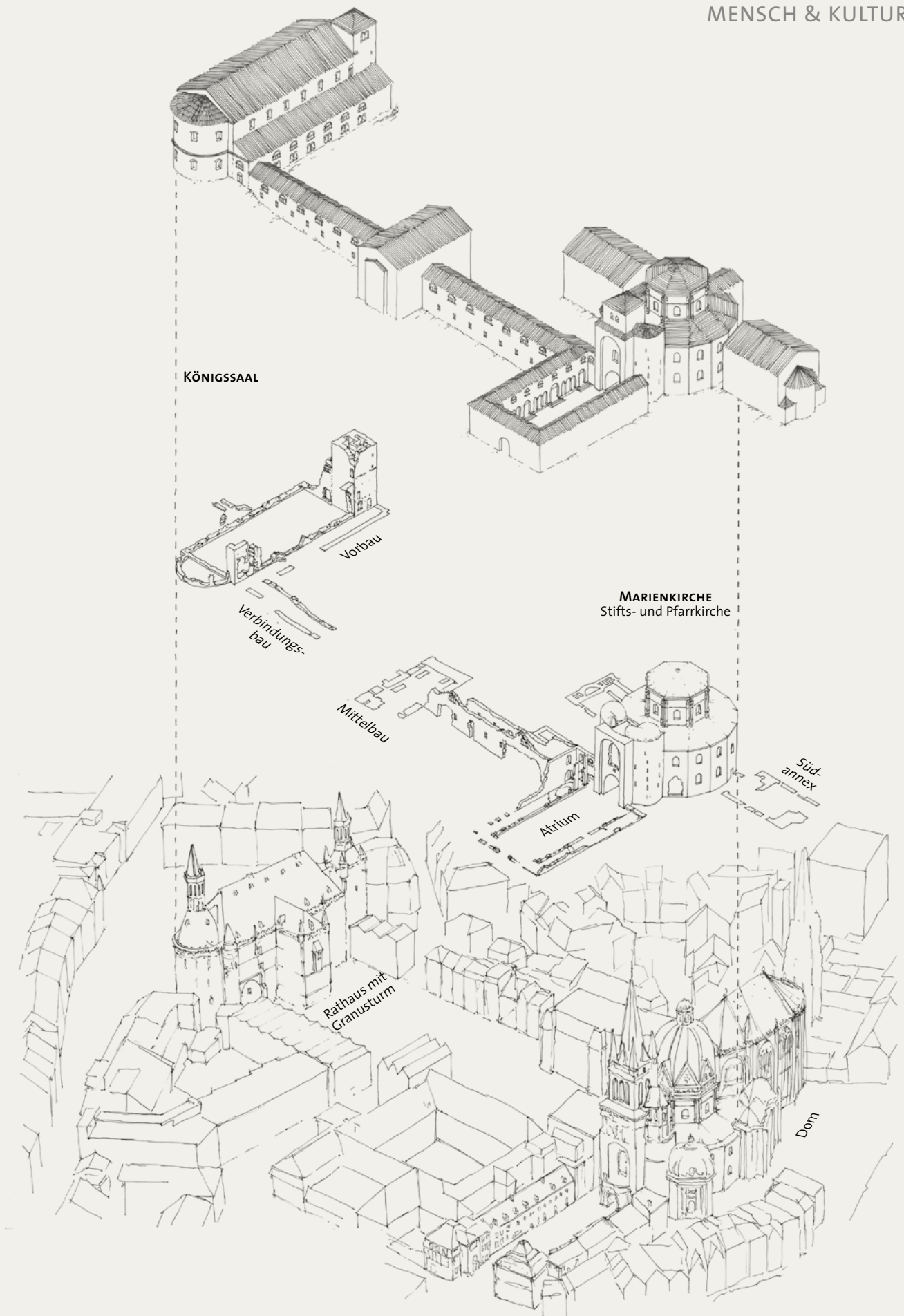
Betrieb. Zur gleichen Zeit wurde ein aufwändiges Gebäude mit Fußbodenheizung und Marmorausstattung errichtet. Archäologische Untersuchungen der letzten Jahre haben außerdem gezeigt, dass zumindest der untere Bereich des Erdgeschosses zahlreicher römischer Häuser noch in karolingischer Zeit, manche sogar bis in das 12. Jahrhundert genutzt wurden.

Für eine kontinuierliche Besiedlung Aachens seit römischer Zeit sprechen auch sprachhistorische Befunde. Anhand bestimmter Ortsnamen konnte nämlich nachgewiesen werden, dass die dort und in der Umgebung ansässige Bevölkerung wohl bis ins 10. Jahrhundert einen romanischen, also aus dem Lateinischen entstandene Dialekt sprach, während das weitere Umland eine germanische Sprache benutzte. Ohne eine ununterbrochene Besiedlung sowie ohne fest eta-



Aachener Dom heute, Nordansicht

Archäologen, Bauhistoriker und Historiker erforschen Struktur und Funktionen karolingischer Bauwerke in Aachen anhand von erhaltenen Gebäudeteilen, Bauresten und überlieferten Texten.



ZEICHNUNG: JUDITH LEY UND FREDERIC SCHNEE, BESCHRIFTUNG: CLEMENS MAM, BAYER

KÖNIG, KAISER, KIRCHENLENKER

1 Im Sinn des **mittelalterlichen Reisekönigtums** unterhielt Karl der Große zwar etliche **Pfalzen**; Aachen ließ er aber besonders monumental ausbauen und gab ihm gern den Vorzug.

2 Zur **Aachener Pfalz** gehörte ein großer Wirtschaftsbetrieb, dem auch entfernte Königsdomänen zuarbeiten mussten. Nur so ließ sich die Versorgung des Hofes und seiner Besucher sichern.

3 Während der **Königssaal** (heute: Rathaus) der Repräsentation weltlicher Macht diente, kamen der **Marienkirche** (heute: Aachener Dom) liturgische und seelsorgerische Funktionen zu.

bierte soziale Strukturen wäre ein solches »Beharrungsvermögen« kaum möglich gewesen.

Diese Befunde widersprechen allerdings der älteren Meinung, die römische Siedlung sei spätestens im 5. Jahrhundert im Zuge der »Völkerwanderung« beziehungsweise der damit einhergehenden Krise aufgegeben und erst unter der Regierung des Vaters Karls des Großen, Pippins (um 714–768), erneut in nennenswertem Umfang besiedelt worden.

Wie wir aus den Schriftquellen wissen, bestand die Pfalz Karls aus einer Vielzahl von Bauwerken verschiedener Art: Zu nennen wären der großen Königssaal und die Wohnung des Herrschers und seiner Familie, Wohngebäude für sonstige Angehörige des Hofes sowie Unterkünfte für Besucher. Des Weiteren gab es eine Bibliothek, ein Schreibatelier und anderes mehr. Zudem stand im engeren Pfalzbereich eine dem heiligen Martin geweihte Kirche; auch das von Einhard erwähnte Badehaus, in dem bisweilen über hundert Personen gleichzeitig badeten, dürfte sich dort befunden haben. Weiter außerhalb lag ein großes umfriedetes Wildgehege, in dem einheimische Tiere gehalten wurden. Ein solcher »Brühl« gehörte als Element fürstlicher Repräsentation zur Ausstattung wohl aller größeren Pfalzen. In Aachen gab es darüber hinaus (vermutlich in der Nähe des Brühls) einen Park für exotische Tiere wie den berühmten Elefanten Abul Abaz, den Karl als Geschenk des Kalifen Harun al-Raschid erhalten hatte (siehe den vorigen Beitrag). Manche Große, die sich häufig und über längere Zeit am Hof aufhielten wie der genannte Einhard, bewohnten in der Ortschaft (»vicus«) eigene Häuser.

Der Wirtschaftshof des Königs, das administrative Zentrum der Domäne Aachen, wird eine größere, eigenständige Gebäudegruppe gebildet haben. Angesichts der damals wenig effektiven landwirtschaftlichen Produktion bedurfte es erheblicher Flächen und einer gut funktionierenden Infrastruktur, um den Hof und seine Besucher, die je nach Rang mit einer stattlichen Entourage anreisten, zu versorgen. Aachen war das Zentrum einer ausgedehnten königlichen Domäne (»fiscus«), zu der neben dem Haupthof in Aachen noch fünf Nebenhöfe im Umland gehörten. Aber auch die entfernteren königlichen Domänen hatten ihren Teil beizutragen.

Die Lage und die Beschaffenheit der allermeisten hier genannten Gebäude sind trotz der intensiven archäologischen

Forschung der letzten Jahre nicht bekannt. So konnte leider auch noch nicht ermittelt werden, wo Karl selbst mit seiner Familie wohnte und wie die Wohnarchitektur des Herrschers ästhetisch und funktional ausgestaltet war. Selbst über die Lage und die Ausdehnung der Ortschaft Aachen lassen sich allenfalls Vermutungen anstellen: Sie wird sich vor allem südlich und westlich des heutigen Doms erstreckt haben.

Das größte und architektonisch anspruchsvollste Bauwerk der Pfalz im engeren Sinn war der Königssaal, auf dessen Fundamenten das heutige Rathaus steht. Knapp 130 Meter südlich davon erhob sich die Marienkirche; sie hat sich weitgehend im heutigen Dom erhalten. Königssaal und Kirche waren jeweils mit verschiedenen Nebenbauten verbunden. Diese beiden Komplexe waren zwar rechtlich voneinander geschieden – der Königssaal gehörte zum Rechtsbezirk der Pfalz, die Marienkirche hatte einen eigenen so genannten Immunitätsbezirk –, aber ästhetisch aufeinander bezogen: Die Achse des Königssaals wurde parallel zur Achse der Kirche ausgerichtet, und da die beiden Komplexe durch ein lang gestrecktes Gebäude verbunden waren, ergab sich ein monumentales orthogonales Ensemble.

Die Neuausrichtung hinterließ Spuren

Das römische Straßensystem, das ebenfalls orthogonal strukturiert war, hatte sich am Landschaftsrelief ausgerichtet (der *cardo* lag auf dem Rücken des Hügels), das monumentale karolingische Architekturensemble richtete sich dagegen an der Marienkirche aus, die genau geostet war; ihre (wörtlich zu verstehende) Orientierung entsprach, wie üblich, der bei den Christen seit frühester Zeit geltenden Gebetsrichtung. So überschneiden sich seitdem im Zentrum Aachens zwei jeweils orthogonale Fluchungssysteme, das pragmatisch-römische und das sakral-christliche, und zwar im Winkel von ungefähr 39 Grad. Mancher Straßenknick und die Dreiecksgestalt einiger Plätze gehen darauf zurück.

Die archäologischen Forschungen der letzten Jahre haben ergeben, dass die Gebäude in mehreren Phasen entstanden. Etwa ab 794 oder 795 wurde zuerst die Kirche errichtet, dann der Königssaal mit dem Verbindungsbau; erst in der zweiten Hälfte des 9. Jahrhunderts fügte man den nach seiner Lage so genannten Mittelbau hinzu. Anhand der verwendeten Materialien und der heute noch erkennbaren Absteckungen lässt sich gut ablesen, wie durchdacht die Großbaustelle organisiert war.

Der Königssaal war ein einziger, eindrucksvoller Raum von nahezu 50 Meter Länge und jeweils mehr als 20 Meter Breite und Höhe. Die Westwand öffnete sich zu einer fast 15 Meter breiten Apsis, in der Mitte der Nordwand befand sich eine weitere, gut zehn Meter weite Apsis. Wie der Saal einst ausgestattet war, ist leider nicht bekannt, auch nicht, ob und wie die Wandflächen dekoriert waren. An der Südostecke schloss sich ein Turm mit quadratischem Grundriss an, auf der südlichen, der Kirche zugewandten Seite war dem Hauptbau auf ganzer Länge ein zweigeschossiger, etwa sechs Meter tiefer Vorbau zugeordnet. Erhalten hat sich von alledem nur

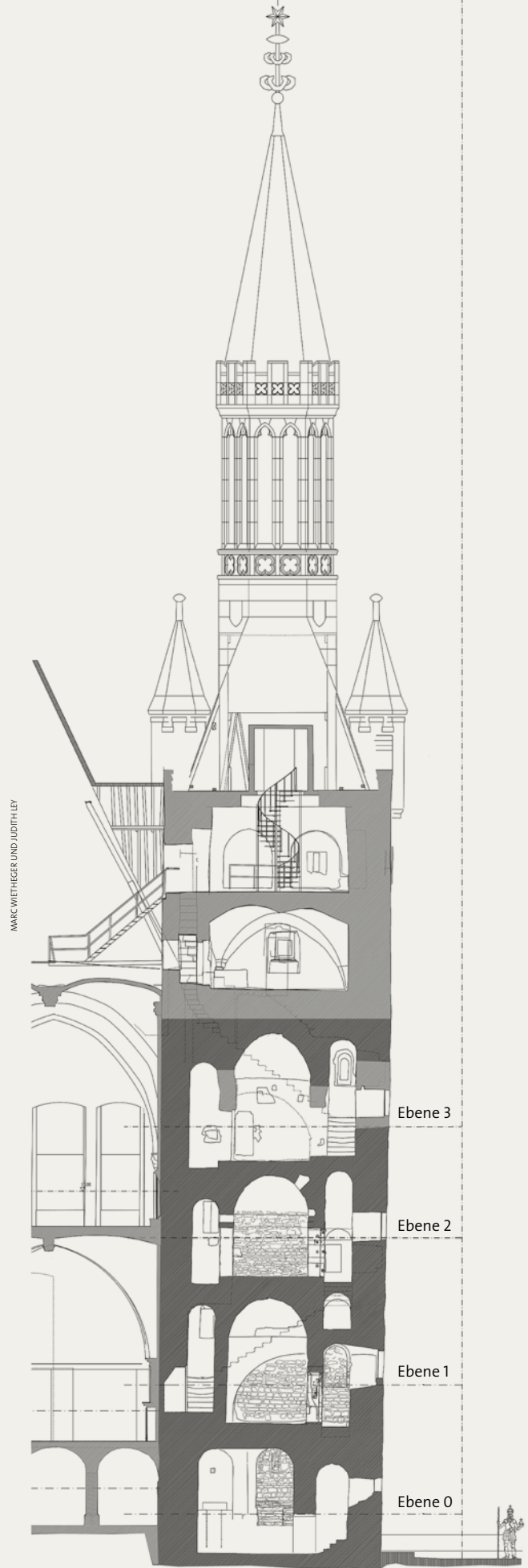
wenig: die Fundamente sowie Streifen aufgehenden Mauerwerks im Südwesten und Osten des Saalbaus und vor allem der Turm bis zu einer Höhe von 20 Metern. Dieser Turm war kein Anbau des Königssaals, er wurde vielmehr im Verbund mit diesem errichtet, wie das Mauerwerk erkennen lässt. Er weist eine interessante architektonische Struktur auf: Innen befinden sich in vier Geschossen vier übereinanderliegende Kammern, ab dem ersten Stock sind um diese Kammern die Treppen geführt; alle Kammern haben eine gewölbte Decke, Außenfenster besitzt nur der Treppengang. Der ursprüngliche karolingische Turm hatte wohl fünf Geschosse, die heutigen Geschosse fünf und sechs entstanden in späterer Zeit.

Der monumentale Saal wie die Apsiden entsprechen antiken Bauformen, die übernommen und in eine eigene Architektursprache übersetzt wurden. So war die Zweigeschossigkeit mancher Teilbauten der antiken Herrschaftsarchitektur fremd. Über die Funktionen dieses Gebäudekomplexes ist erstaunlich wenig bekannt. Was den Königssaal betrifft, gab er wahrscheinlich den feierlichen Rahmen für wichtige Ereignisse und Festlichkeiten ab. Es wird vermutet, dass in der großen westlichen Apsis ein Thron für den Herrscher stand. Wozu diente dann aber die kleinere im Norden? Welchen Zweck hatte der südlichen Vorbau? Und wozu diente der ungewöhnliche Turm? Eine im Erdgeschoss eingebaute Latrinenanlage veranlasste Forscher vor einigen Jahren, in ihm das Wohngebäude Karls des Großen zu sehen, doch wird diese Meinung aus guten Gründen nicht mehr vertreten: Die Kammern waren klein, lichtarm und durch Treppen voneinander getrennt, also alles andere als repräsentative Wohnräume. Die Forschungen sind hier noch nicht abgeschlossen. Sicher ist allerdings: Die heute übliche Bezeichnung »Granusturm« ist nicht die ursprüngliche.



Aachener Rathaus

Das Aachener Rathaus ist heute im Kern ein gotischer Bau aus dem 14. Jahrhundert, der auf den Grundmauern des karolingischen Königssaals steht. Der so genannte Granusturm (rechts) hingegen ist tatsächlich bis zum vierten Geschoss ein Überrest der Karlspfalz. Über seine Funktion wird noch gerätselt. Möglicherweise diente er schlicht als Treppenaufgang.



MARC WIETHEGER UND JUDITH LEY

Ebene 3

Ebene 2

Ebene 1

Ebene 0



- Laienbereich, vornehmlich für die Pfarrei
- Chor
- Sanktuarien

Längsschnitt, Blickrichtung Norden

Die Marienkirche umfasste zwei Hauptfunktionsbereiche: Im Obergeschoss wurde der Gottesdienst der Pfarrei gefeiert, im Erdgeschoss der des Stifts. Auf beiden Ebenen gab es jeweils im Osten abgegrenzte Altarräume (Sanktuarien). Im Erdgeschoss des Oktogons versammelten sich die Mitglieder des Stifts zum Stundengebet. Zur Innenausstattung gehörten auch antike Säulen aus Italien (Foto ganz rechts).

Von dem westlichen Ende des Vorbaus führte der fast 130 Meter lange Verbindungsbau zum Atrium der Marienkirche, von dem aus man über einen weiteren Gang in das Gotteshaus gelangte. Das Gelände fiel auf dieser Strecke ab, so dass man vom Obergeschoss des Verbindungsbaus über wenige Stufen direkt ins Obergeschoss der Kirche eintreten konnte.

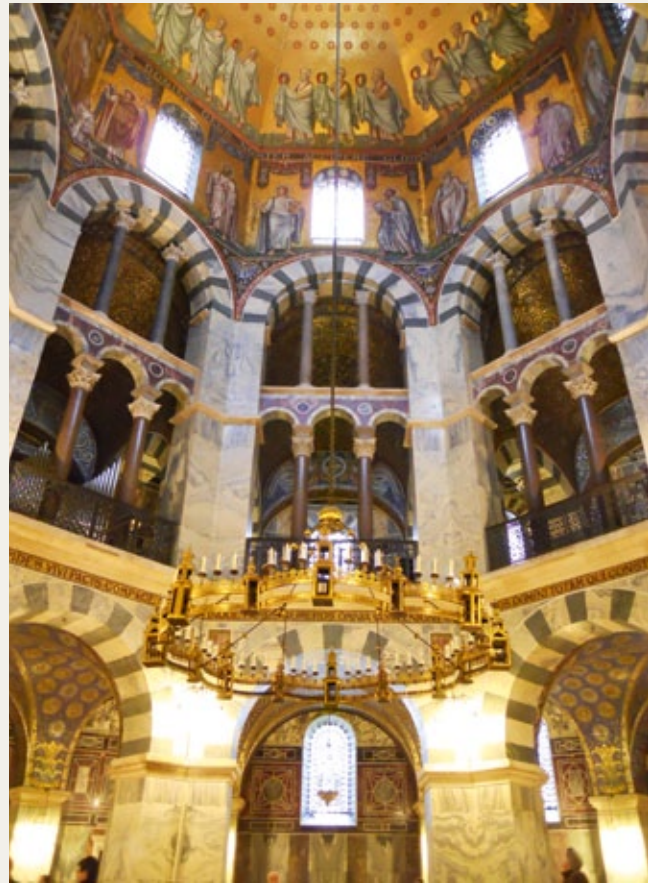
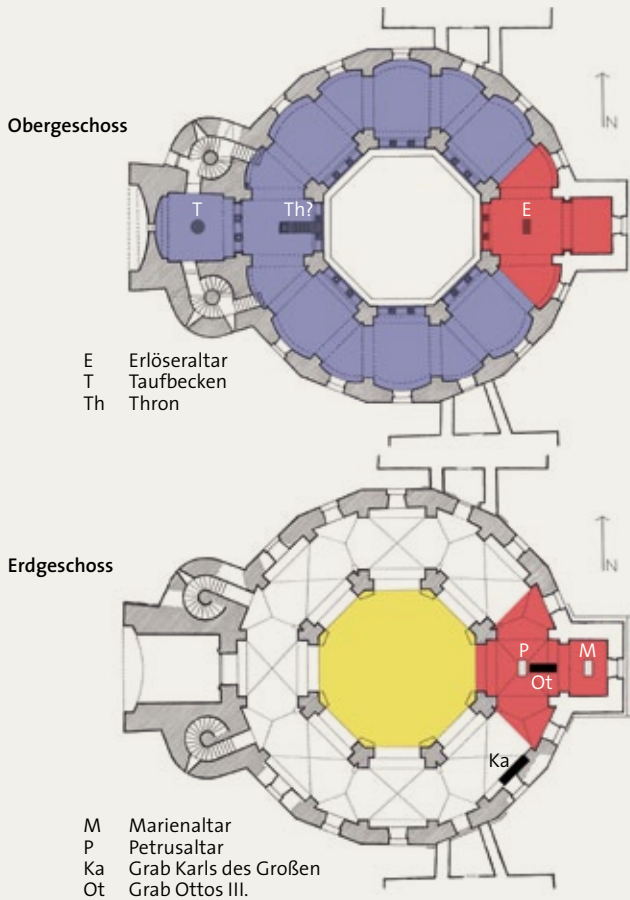
Da die Fundamente des in der zweiten Hälfte des 9. Jahrhunderts eingefügten Mittelbaus untersucht werden konnten, weiß man: Er war knapp 16 Meter breit und etwa 30 Meter lang. Mauern im Inneren lassen erkennen, dass er wenigstens im Erdgeschoss in drei schmale Segmente unterteilt war. Aber auch hier gilt: Die Funktion ist unbekannt, nur ein Torbau, wie früher angenommen, war er wohl nicht. Denn dort, wo sich dessen Durchfahrt befunden haben müsste, sind Quader erhalten, die höher liegen als das damalige Straßenniveau.

Großprojekt Marienkirche

Das in jeder Hinsicht bedeutendste Bauwerk, das Karl der Große in Aachen errichten ließ, war ohne Zweifel die Marienkirche – das haben schon die Zeitgenossen so gesehen. Der Neubau ersetzte eine Vorgängerkirche, über die kaum etwas bekannt ist. Frühestens 793 begannen die Arbeiten, wie nunmehr auf Grund der dendrochronologischen Datierung eines unterhalb des Fundaments geborgenen Gründungspfahls gesichert ist. Der Bau schritt offenbar rasch voran,

denn bereits im Juli 798 schmückten importierte antike Säulen das Obergeschoss, wie aus einem Brief des Gelehrten Alkuin (um 730–804) an den König hervorgeht. Durch das obere Mauerwerk des Oktogons, unterhalb des Zentralgewölbes, verliefen sechs Ringanker, vier aus Eisen und zwei aus Holz; sie sollten die seitlichen Schubkräfte des großen Gewölbes auffangen. Die hölzernen Ringanker wurden nach dem dendrochronologischen Befund spätestens 813 hergestellt. Ein Jahresdatum für die Kirchweihe ist nicht überliefert, sie wurde aber später jährlich am 17. Juli gefeiert; vielleicht erfolgte sie im Jahr 802, in dem der 17. Juli auf einen Sonntag fiel (die Kirchweihe wird bevorzugt an einem Sonntag oder einem besonderen Festtag vorgenommen).

Im Unterschied zum Königssaal ist die karolingische Kirche weitgehend erhalten. Es handelt sich um einen Zentralbau: Eine achteckige Mitte mit mehr als 15 Meter Durchmesser und gut 30 Meter Höhe, das Oktogon, ist von einem nach außen 16-eckigen, zweigeschossigen Gebäudeteil umgeben, der seinerseits ursprünglich Erweiterungen nach allen vier Haupthimmelsrichtungen aufwies, von denen aber nur der Westbau erhalten blieb. Sicher ist auf Grund des archäologischen Befunds, dass der scheinbare Anbau im Norden in Wahrheit älter als die Marienkirche war, eine absolute Datierung war allerdings noch nicht möglich. Vor dem Haupteingang der Kirche gab es zudem einen Vorhof. Heute umgibt ein Kranz zumeist gotischer



DOMKAPITEL AACHEN, DOOMBAULEITUNG, FOTO: HELMUT MARITZ

Anbauten das karolingische Sechzehneck, und die beiden unteren Geschosse des noch vorhandenen Westbaus bekrönt ein neugotischer Turm.

Säulen aus Italien

Karl ließ seine Kirche auf das Kostbarste ausstatten. Dazu gehörten nicht nur die Marmorsäulen, die nach dem Zeugnis Einhards aus Rom und Ravenna stammten (siehe Foto oben). Die Fußböden waren mit Platten aus verschiedenfarbigem Marmor und anderen Steinen ausgelegt. Kunstvolle Bronzarbeiten wurden am Ort von einer auswärtigen Werkstatt hergestellt; erhalten sind das große Türflügelpaar des Hauptportals und drei kleinere Türen für die Zugänge zu den Annexbauten, darüber hinaus die acht großen Brüstungsgitter auf der Empore. Diese Aachener Bronzen gehören zu den bedeutendsten Zeugnissen karolingischer Antikenrezeption. Bis auf die angenieteten Türzieher wurden sie in einem Stück gegossen, was eine beachtliche technische Kompetenz belegt.

Die Wände und die Gewölbe des Zentralbaus dürften ursprünglich nur bemalt worden sein. Im Erdgeschoss verlief gleich unter dem stark vortretenden Gesims eine rote Inschrift in acht Versen, die allgemein von der Kirche als Gebäude und als Gemeinschaft der Gläubigen sprach sowie Karl den Großen als den Erbauer des Gotteshauses nannte. Das große Zentralgewölbe über dem oktogonalen Mittelteil wurde zu-

nächst wohl ebenfalls nur ausgemalt, aber wahrscheinlich schon bald mit einem großen Mosaik geschmückt, das eine Szene aus der Apokalypse zeigte. All dies ist jedoch verloren, man weiß davon nur durch geringe Reste sowie durch Zeichnungen und Kupferstiche des 17. Jahrhunderts. Die heutige, sehr aufwändige Schmuckausstattung in Marmor und Mosaik entstand erst von 1880 bis 1913.

Das Erdgeschoss wurde ursprünglich vor allem für den Gottesdienst des Stifts in Anspruch genommen. Dort stand im Ostbau der Maria geweihte Hauptaltar und im Ostjoch des Sechzehnecks der Petrusaltar. Das Chorgestühl, also die Plätze der Geistlichen, dürfte sich im Oktogon befunden haben, das somit funktional als eigentlicher Chor dieser Kirche zu gelten hat (siehe Grafiken, gelb). Im Obergeschoss fand der Gottesdienst der Pfarrei statt. Wohl im Ostjoch des Sechzehnecks stand dort der Erlöseraltar, im Westbau das Taufbecken. Im Westjoch des oberen Sechzehnecks ist der berühmte Thron zu sehen, der Karl dem Großen zugeschrieben wird. Seine Datierung ist jedoch umstritten; nach derzeitigem Forschungsstand lässt sich nur sagen, dass er zwischen der Erbauung der Kirche um 800 und der ersten Königskronung 936 errichtet wurde.

Die Form des Zentralbaus war in der Westkirche wenig verbreitet. Sie wurde vermutlich gewählt, um bestimmte Bedeutungen zum Ausdruck zu bringen. Die Aachener Kirche sollte wohl, wie sich aus verschiedenen Texten erschließen



AUSSTELLUNGSHINWEIS

KARL DER GROSSE. MACHT KUNST SCHÄTZE

Ausstellung
zum 1200. Todesjahr
vom 20. Juni bis zum
21. September 2014
im Rathaus, im Centre Charle-
magne und in der Domschatz-
kammer Aachen

lässt, das Hauptheiligtum des Alten Bundes, den »Tempel Salomos« darstellen. Ihr Vorbild ist allerdings umstritten: War es der ebenfalls oktogonale »Felsendom« auf dem Jerusalemer Tempelberg, ein islamisches Heiligtum, das später im Abendland als Nachbildung des Salomonischen Tempels angesehen wurde? Oder war es die ebenfalls in Jerusalem befindliche Grabeskirche? Eine zweite Deutung der Aachener Kirche ist mit der Vorstellung vom »Himmlichen Jerusalem« gegeben, einem biblischen Bild für den Himmel und für die uneingeschränkte Herrschaft Gottes am Ende der Zeit. In diesen Zusammenhang sind auch bestimmte Zahlen und Zahlverhältnisse am Bauwerk zu sehen: So ist die Acht, die für Vollkommenheit stand, allgegenwärtig, bisweilen in ihrer Halbierung oder Verdopplung, als Vier oder Sechzehn.

Die Aachener Marienkirche – der Neubau nicht anders als sein Vorgänger – war Eigentum des Königs. Im Zusammenhang mit dem Neubau gründete Karl der Große an dieser Kirche das erwähnte Stift, das heißt, er hat dort eine Gemeinschaft von Klerikern eingerichtet, die unter der Leitung eines Oberen lebte. Anfangs umfasste sie zwölf Kanoniker, entsprechend dem Apostelkollegium.

Der eigentliche Daseinszweck des Stifts war die Feier der Liturgie. Sie umfasste im Wesentlichen die Messe und das aus acht Horen bestehende Stundengebet, das sich über einen Teil der Nacht und über den Tag verteilte. Entsprechend der allgemeinen Ausrichtung der von Karl in der fränkischen Kirche betriebenen Liturgiereform wird die Liturgie des von ihm gegründeten Stifts besonders deutlich auf die liturgischen Texte und Gebräuche der Stadt Rom Bezug genommen haben. Dem unablässigen, feierlichen Gebet der Aachener Kanoniker kam nach dem Willen Karls eine besondere Aufgabe zu: Es sollte dazu beitragen, das Seelenheil des Herrschers und dasjenige seiner Angehörigen sowie den Bestand des Reichs zu sichern. Kostbare Reliquien, die Karl seiner Kirche übereignete, sollten die Heiligkeit des Orts mehren und die Kraft der Gebete verstärken.

Religion war in jener Zeit von fundamentaler Bedeutung, gerade auch für Karl den Großen selbst. Er saß kirchlichen Synoden vor, er ließ in seiner Gegenwart theologische Streitfragen erörtern, er förderte mit Nachdruck die schon von

seinem Vater Pippin begonnene Reform der im fränkischen Reich gefeierten Liturgie, er veranlasste und beaufsichtigte die Revision des lateinischen Bibeltexes; es kam vor, dass er in schwierigen Situationen ein reichsweites Fasten und zusätzliche Gottesdienstbesuche an bestimmten Tagen anordnete. Gelegentlich kümmerte er sich auch um Einzelheiten der religiösen Praxis der Gläubigen: Als er beispielsweise bemerkte, dass manche Taufpaten in Aachen nicht über die geforderten religiösen Kenntnisse verfügten, trug dies dem zuständigen Bischof in Lüttich umgehend einen Tadel wegen mangelhafter Wahrnehmung seiner Aufsichtspflichten ein. Nach dem Zeugnis Einhards nahm Karl, wenn er sich in Aachen aufhielt, täglich mehrmals am Gottesdienst in St. Marien teil, solange seine Gesundheit es ihm erlaubte; er besuchte, wie Einhards Worte erkennen lassen, die drei so genannten »großen Horen«, nämlich die Matutin (kurz nach Mitternacht), die Laudes (am frühen Morgen) und die Vesper (am Abend), sowie die Messe (am fortgeschrittenen Morgen).

Am Tag seines Todes, dem 28. Januar 814, wurde Karl der Große in »seiner« Kirche bestattet. Die Gestalt und genaue Lage des Grabs innerhalb der Kirche war lange umstritten; nach älteren, jüngst bestätigend wieder aufgenommenen Forschungen war das Grab des großen Herrschers als Bogengrab (Arkosolium) angelegt, das im südöstlichen Joch des unteren Umgangs seinen Platz hatte (siehe Grafik S. 57). ~

DER AUTOR



Clemens M. M. Bayer ist Historiker, Kunsthistoriker und Medi latinist und lebt in Bonn und Lüttich. Der Artikel fasst Forschungsergebnisse verschiedener Projekte, Institutionen und Wissenschaftler zusammen: Stadtarchäologie Aachen (Andreas Schaub); Historisches Institut der RWTH Aachen, Mittelalter (Harald Müller); Landschaftsverband Rheinland, LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland (Ulrike Heckner); Dombauleitung Aachen (Helmut Maintz); DFG-Projekt »Aula Regia in Aachen« (RWTH: Judith Ley); Investitionsprogramm Nationale Welterbestätten (RWTH: Marc Wietheger, Christian Raabe; Stadt Aachen: Monika Krücken); »Archäologie zwischen Dom und Rathaus« (Baubefunde und spätantik-merowingerzeitliche Funde: Sebastian Ristow, Universität zu Köln; karolingerzeitliche Funde: Wolfram Giertz, Aachen); »Erforscht, ergraben und erdeutet – 200 Jahre Forschungsgeschichte der karolingischen Pfalz Aachen« (Frank Pohle, RWTH Aachen, im Auftrag des LVR-Amts für Bodendenkmalpflege im Rheinland); Ludwig Falkenstein (Aachen); sowie eigene Forschungen.

LITERATURTIPPS

Heckner, U., Bechmann, E.-M. (Red.): Die karolingische Pfalzkapelle in Aachen. Material – Bautechnik – Restaurierung. Arbeitshefte der rheinischen Denkmalpflege 78, Wernersche Verlagsgesellschaft, Worms 2012

Müller, H. et al.: Pfalz und vicus Aachen in karolingischer Zeit. In: Kraus, T. R. (Hg.): Aachen. Von den Anfängen bis zur Gegenwart. Band 2: Karolinger – Ottonen – Salier. 765–1137. Veröffentlichungen des Stadtarchivs Aachen 14 sowie Beihefte der Zeitschrift des Aachener Geschichtsvereins 8, Mayersche Buchhandlung, S. 1–408, Aachen 2013

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281875

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projektes nicht möglich, und deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebritzer Agrarbetriebsgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Förderverein des Thomas-Mann-Gymnasium Stutensee | Förderverein der Leibnizschule Wiesbaden e. V. | KIT Karlsruhe | Volksbank Bigge-Lenne eG | Meissner AG | Förderverein der Justus-Liebig-Schule Darmstadt | Dominique Mayer | Rotary Club Buchloe | Förderverein des Johanneum-Gymnasiums Herborn | Freundeskreis der Konrad-Duden-Realschule Mannheim | Förderverein des Eichsfeld-Gymnasiums Duderstadt | Abertus-Magnus-Gymnasium Stuttgart

GEOMETRIE

Wer hat das schönste Ornament konstruiert?

Teilnehmer aus aller Welt haben sich ein neues Mittel zur Produktion von Kunst zu eigen gemacht – mit sehr vielfältigen und zum Teil überraschenden Ergebnissen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

An dieser Stelle haben wir im Märzheft zu einem Wettbewerb um das schönste Ornament aufgerufen, das mit einer App (einem Computerprogramm für Tablets und Smartphones) namens »iOrnament« zu erstellen war.

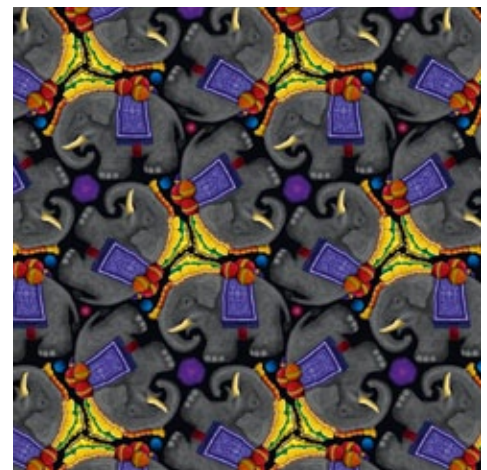
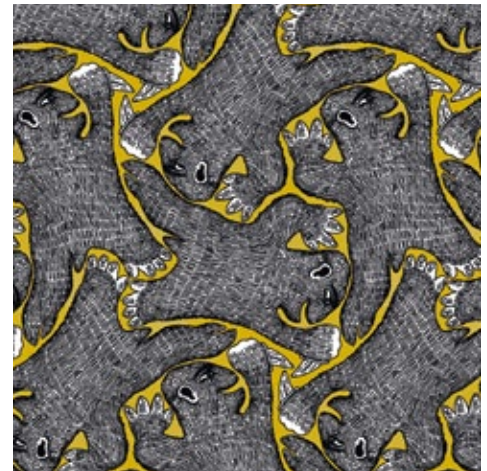
Bis zum Ende der Einreichungsfrist am 31. März sind mehr als 3300 Beiträge eingegangen.

Da der Wettbewerb nicht nur an dieser Stelle, sondern auch online im Zusammenhang mit der App ausge-

schrieben wurde, haben sich Menschen aus 52 Ländern angesprochen gefühlt. Die Jury, bestehend aus Jürgen Richter-Gebert, Inhaber des Lehrstuhls für Geometrie und Visualisierung der TU München und Urheber der App,

1. PLATZ: HIMPTEL

Ulli Haag (www.gmbhaag.de), Lehrer für Kunst und Deutsch an der Realschule der Freien christlichen Schulen Siegen, zeichnet schon seit 15 Jahren Ornamente am Computer. Sein Werk überzeugte die Jury durch die ungewöhnliche Vielfalt der Ideen.



ALLE DREI ULLI HAAG, DEUTSCHLAND

dem Mathematiker Martin von Gagnern und der Grafikerin Katharina Rasp, die am selben Lehrstuhl arbeiten, sowie mir selbst, traf zunächst eine Vorauswahl aus ungefähr 200 Ornamenten, die unter <http://youtu.be/3wr6nDufYlg> zu besichtigen sind.

Am Ende sahen wir uns genötigt, unsere eigenen Kriterien etwas zu modifizieren: Wir vergaben Preise nicht an einzelne Werke, sondern an einzelne Personen; sonst hätte wohl dieser oder jener sehr vielseitige Autor mehrmals gewonnen. Und wir sahen uns nicht in der Lage, eine begründbare Rangordnung mit den Nummern 1 bis 30 aufzustellen – zu vielfältig waren die Ideen, um so präzise vergleichbar

zu sein. Stattdessen haben wir die Plätze in der Rangordnung zusammengefasst, denen ohnehin der gleiche Preis zugedacht war. In der Tat haben zum Beispiel die 15 Autoren auf den Plätzen 16 bis 30 (Bilder S. 65) annähernd die gleiche Begeisterung bei den Juroren erregt. (Die männliche Form »Autor«, »Teilnehmer« und so weiter schließt hier und im Folgenden selbstverständlich auch die – recht zahlreich vertretenen – Frauen unter den Wettbewerbsteilnehmern ein.)

Wir hatten die Teilnehmer gebeten, sich einen »nickname« zuzulegen, einen selbstgewählten Kurznamen, damit man Werke ein und desselben Autors einander zuordnen kann. Zugleich

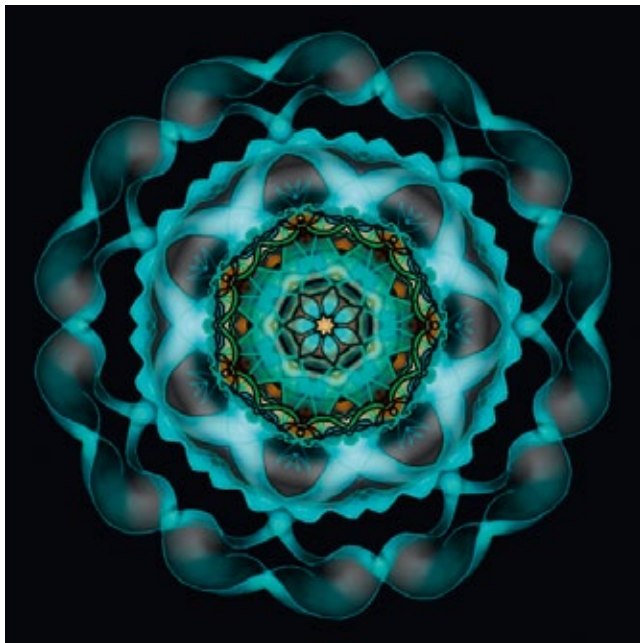
hatten wir Anonymität zugesichert. Bei den hier abgedruckten Bildern stehen daher jedes Mal der Nickname des Autors und sein Heimatland – der echte Name und weitere Angaben jedoch nur dann, wenn der Autor ausdrücklich zugestimmt hat.

Vor allem für Jürgen Richter-Gebert selbst war es faszinierend zu beobachten, wie die Wettbewerbsteilnehmer sich des neuen Werkzeugs bemächtigten und nach eher zaghaften Anfängen ihren jeweils eigenen Stil entwickelten. Hier konnte man online einem Prozess zuschauen, der in der Kunst sonst Monate bis Jahre in Anspruch nimmt.

Zu allem Überfluss hat Richter-Gebert aus Anlass des Wettbewerbs seine

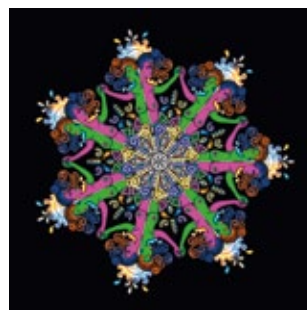
2./3. PLATZ: dNA

Die Künstlerin aus den USA arbeitet bereits seit März 2013 mit der App iOrnament. Bemerkenswert fand die Jury ihre ausgewogenen und feinen Farbübergänge.



2./3. PLATZ: AUTISMOM

Michelle Martin (www.facebook.com/AutisMomsArt), Hausfrau und Mutter aus Casper (Wyoming, USA), hat mehr als 100, häufig psychedelisch wirkende Ornamente eingesandt.

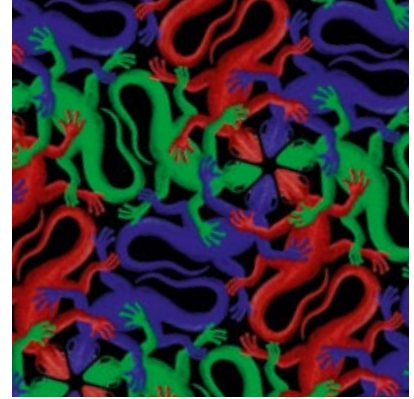
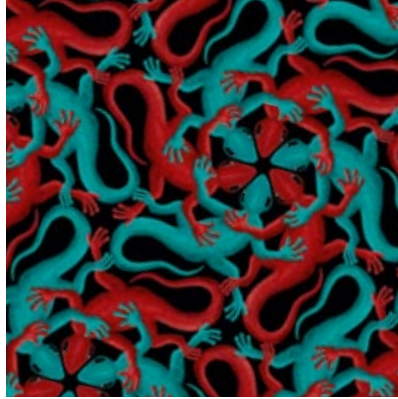
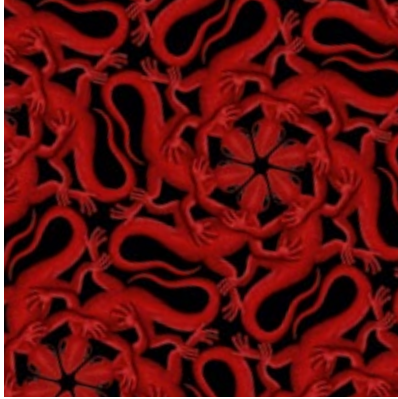


DIESE DREI: dNA, USA

DIESE DREI: MICHELLE MARTIN, USA

Farbsymmetrien

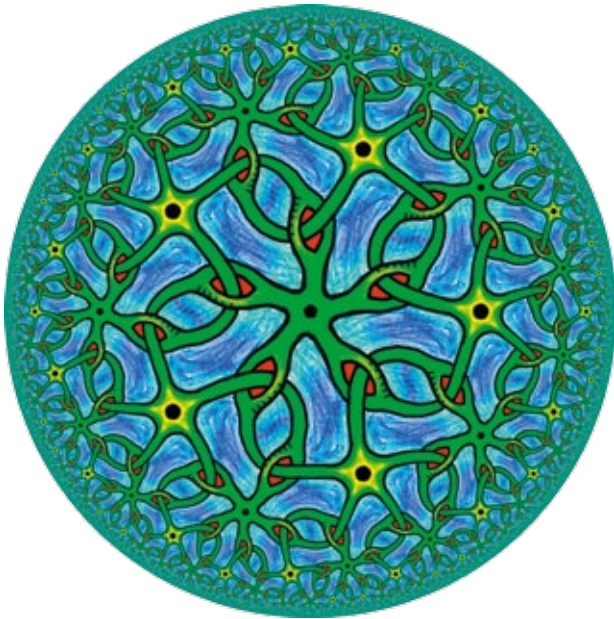
Die App **iOrnament** gibt dem Benutzer die Möglichkeit, eine Drehung, die sich unter den aktuellen Symmetrietransformationen befindet, mit einem Farbwechsel zu koppeln. Dadurch erscheinen gedrehte Bilder desselben Elements in verschiedenen Farben. Ulli Haag alias Himpfel (siehe S. 60) hat von dieser Möglichkeit bei seinen »Geckos« Gebrauch gemacht.



DIESE DREI: ULLI HAAG, DEUTSCHLAND

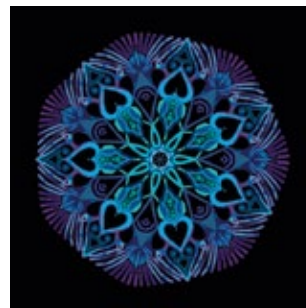
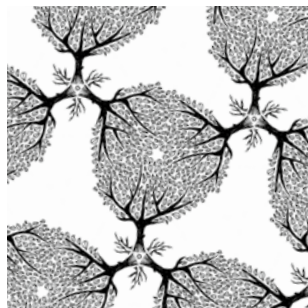
4./5. PLATZ: HEXE_SERAFINA

Susanne Sumi, 23, ist Mathematikstudentin in Ilmenau. Das große Bild zeigt, wie man mit Symmetriegruppen ohne Spiegelung (diesmal im Hyperbolischen) Verknotungen erzeugen kann.



4./5. PLATZ: AGNES

Agnes Künnecke aus Hamburg fand zu den computergrafischen Ornamenten über den langen Weg von Buntstiften auf Papier über Pastellkreide, Glasmalerei, Tiffany-Technik und Seidenmalerei.



DIESE DREI: SUSANNE SUMI, DEUTSCHLAND

DIESE DREI: AGNES KÜNNECKE, DEUTSCHLAND

App um einen wesentlichen Teil erweitert: die nichteuklidischen Geometrien. So waren auch jene, die schon eine frühere Version des Programms kannten, mit den Möglichkeiten und Grenzen einer völlig neuen Darstellungsform konfrontiert.

Nichteuklidische Geometrien

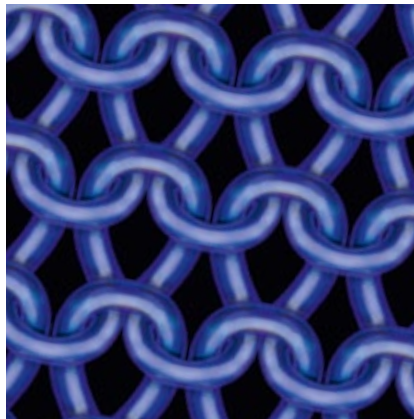
In der gewöhnlichen Ebene fühlen wir uns zwar dank Alltagserfahrung und Schulunterricht zu Hause; aber für Mathematiker ist die zugehörige (die »euklidische«) Geometrie nur eine von mehreren möglichen. Denn dass es zu einer Geraden durch einen Punkt außerhalb von ihr genau eine Parallele gibt und die Winkelsumme in jedem Dreieck 180 Grad beträgt, trifft zwar auf die uns umgebende Welt zu, ist aber nicht die einzig denkbare Wahrheit. Man kann ebenso gut und widerspruchsfrei Geometrie treiben, wenn man unterstellt, dass die Winkelsumme im Dreieck stets größer oder stets kleiner als 180 Grad ist.

Im ersten Fall findet man sich in der »sphärischen« Geometrie wieder, die auf der Kugeloberfläche gilt und bei der die Kreise mit Mittelpunkt im Kugelmittelpunkt (»Großkreise«) die Rolle der Geraden einnehmen. Der andere, die »hyperbolische Geometrie«, kommt in unserer Erfahrungswelt nicht vor (Spektrum der Wissenschaft 10/1990, S. 12). Wenn die Winkelsumme im Dreieck kleiner als 180 Grad ist, dann gibt es durch einen Punkt außerhalb einer Geraden mehr als eine Parallele zu dieser Geraden – und dann auch gleich unendlich viele. Es gibt regelmäßige Fünfecke, die sich zu viert um jeden ihrer Eckpunkte scharen, weil sie fünf rechte Winkel haben, Vierecke mit gleich langen Seiten und gleichen Winkeln, die man aber nicht Quadrate nennen sollte, weil ihre Winkel 72 Grad haben und sie deswegen zu fünf um einen Punkt passen, und viele derartige Merkwürdigkeiten mehr.

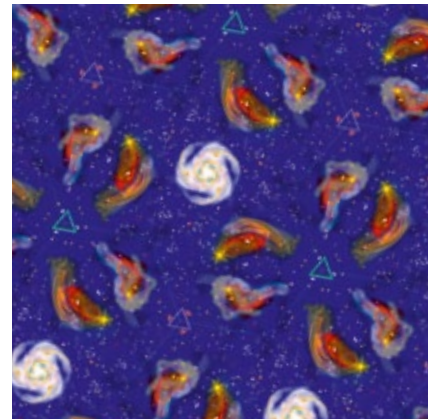
So etwas kann man einleuchtenderweise nicht auf gewöhnlichem Papier abbilden; und selbst die hyperbolischen Topflappen der Daina Taimina (Spektrum der Wissenschaft 2/2010,

6.–10. PLATZ:

Links von oben nach unten: Lopguy (Mark Loppe, Calgary, Kanada), Jesse Morlan (USA); rechts von oben nach unten: Linda Cecilie (Norwegen), Cultjr (Deutschland), Meggy Schlümer (Deutschland).



MARK LOPPE, KANADA



CULTJR, DEUTSCHLAND



JESSE MORLAN, USA



MEGGY SCHLÜMER, DEUTSCHLAND

S. 49) bieten nur einen unvollkommenen Ersatz. Man muss sich mit einem verzerrten Abbild der hyperbolischen Ebene begnügen, ebenso wie jeder Versuch, die kugelförmige Erdoberfläche auf einer ebenen Landkarte abzubilden, in einer Verzerrung endet.

Es gibt eine besonders schöne Verzerrung der hyperbolischen Ebene, die nach ihrem Entdecker Henri Poincaré (1854–1912) poincarésche Kreisscheibe genannt wird. Die ganze unendliche hyperbolische Ebene wird dabei in das

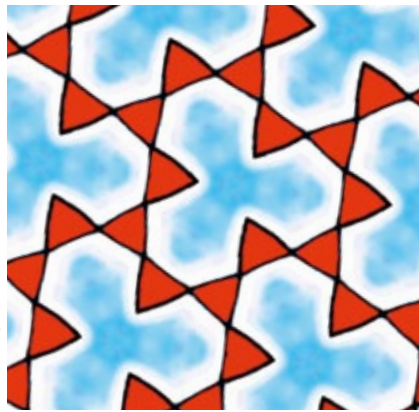
Innere eines Kreises abgebildet; Geraden werden zu Kreisbögen, die auf dem Umfang des Grenzkreises senkrecht stehen, und vor allem ist die Verzerrung winkeltreu! Für den Künstler eröffnet sich damit die reizvolle Möglichkeit, unendlich viele Elemente auf die begrenzte Fläche eines Kreises zu packen – im Prinzip. Gegen den Rand des Grenzkreises werden die Elemente immer kleiner, bis man sie nicht mehr zeichnen und schon gar nicht mehr sehen kann. Der Niederländer Maurits C.



LINDA CECILIE, NORWEGEN



SADOK, MAROKKO



GUNTHER KLEIM, DEUTSCHLAND



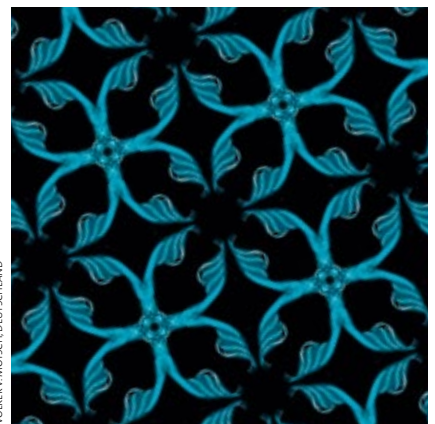
GEORG GEORG, DEUTSCHLAND

11.–15. PLATZ:

Obere Reihe von links nach rechts: Sadek (Marokko), Moonman (Gunther Kleim, Drensteinfurt), Georg Georg (Deutschland); **untere Reihe:** Gerd (Gerd Wernke, Bielefeld), Volker Valerian Motsch (Köln).



GERD WERNKE, DEUTSCHLAND



VOLKER MOTSCH, DEUTSCHLAND

Escher (1898–1972) hat dieses Prinzip in seinen »Kreislimit«-Grafiken als Erster künstlerisch angewandt.

Das geometrische Handwerkszeug, das man zum Erzeugen von Ornamenten braucht, lässt sich nämlich fast vollständig auf die nichteuklidischen Geometrien übertragen. Es gibt auch in diesen exotischen Welten Längen und Winkel, Kongruenzabbildungen und Muster, die unter der Aktion einer Gruppe von derartigen Abbildungen (der »Symmetriegruppe«) unverändert bleiben: Ornamente eben. Insbesondere hat ein Ornament in jeder Geometrie einen Fundamentaltyp: eine Teilmenge der Ebene/Kugeloberfläche/hyperbolischen Ebene, die man durch Drehen, Spiegeln und/oder Parallelverschieben beliebig oft vervielfältigen kann, bis ihre Abbilder die jeweilige Welt lückenlos ausfüllen (»pflastern«).

Die wesentlichen Kongruenzabbildungen auf der Kugeloberfläche sind Drehungen um eine Achse, die durch den Kugelmittelpunkt verläuft, und Spiegelungen an einer Ebene, die eben-

falls den Kugelmittelpunkt enthält. Parallelverschiebungen (Translationen) haben keine eigenständige Existenz; was immer man darunter verstehen könnte, lässt sich besser als Drehung beschreiben. Deswegen ist das Sortiment der Symmetriegruppen auf der Kugeloberfläche auch eher übersichtlich. Es gibt bis auf – künstlerisch wenig reizvolle – Versionen der Rosettengruppen nur die Symmetrien, die in den platonischen Körpern verwirklicht sind. Dabei haben Würfel und Oktaeder einerseits, Dodekaeder und Ikosaeder andererseits dieselbe Symmetriegruppe.

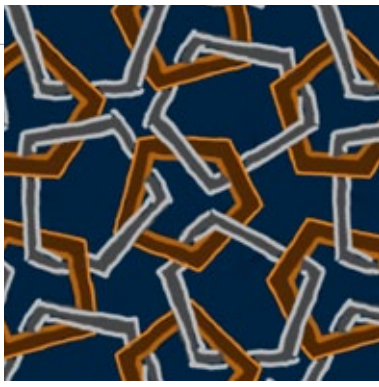
Pflasterungen mit Fünfersymmetrie

Aber im Hyperbolischen ist fast alles erlaubt! Während sich fünf- oder siebenzählige Drehungen in der euklidischen Ebene nicht mit der Translationssymmetrie vereinbaren lassen, hat die hyperbolische Ebene Platz dafür – und für noch viel mehr. Zum Beispiel gibt es dort ein Dreieck mit den Winkeln $360^\circ/4$, $360^\circ/6$ und $360^\circ/14$, denn seine Winkelsumme ist kleiner als 180 Grad. Durch

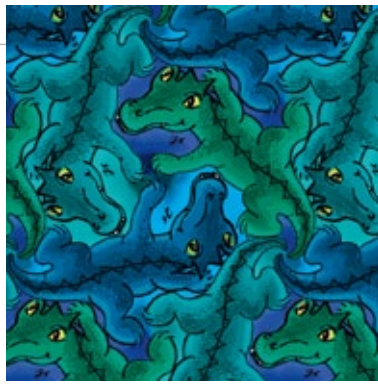
16.–30. PLATZ:

Oberste Reihe von links nach rechts: Martin Stalder (Oberwil, Schweiz), Mathekrokodil (Julia Schweitzer, Karlsruhe), patg74 (Frankreich); **zweite Reihe:** Steve (Steven Hall, Nuneaton, Großbritannien), Betsy Summerhayes (Christiansted, amerikanische Jungferninseln), Eva Lück (Deutschland); **dritte Reihe:** J. Nean (USA), K Nedelkos (Kanada), Heidi (Schweiz); **vierte Reihe:** NN (USA), Shawn (USA), Rowdy157 (Russland); **unterste Reihe:** Crystal Knispel (Richmond, Virginia, USA), Cathy Beardsley (Santa Rosa, Kalifornien, USA), Esra (Ingeborg Diehl, Kellmünz).

MARTIN STALDER, SCHWEIZ



JULIA SCHWITZER, DEUTSCHLAND



PATRYA, FRANKREICH



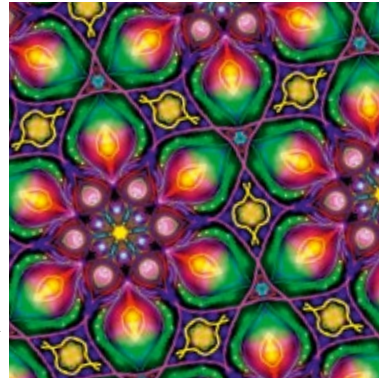
STEVEN HALL, GROSSBRITANNIEN



BETSY SUMMERS, AMERIKANISCHE JUNGFERNINSELN



SVA LÜCK, DEUTSCHLAND



J. NEAN, USA



K. NERELIOS, KANADA



HEDI, SCHWEIZ



ANN, USA



SHAWN, USA



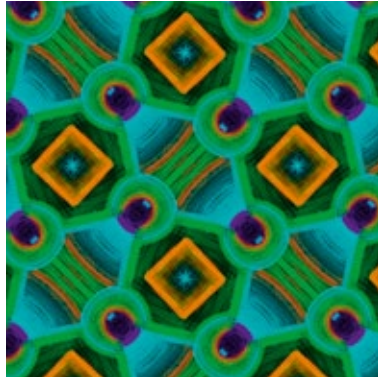
POWDYIST, RUSSLAND



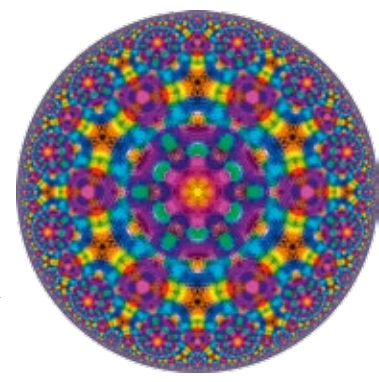
CRYSTALINSPEL, USA



CATHY BARBLEY, USA



INGERORG DIEHL, DEUTSCHLAND



Anpassung an die jeweils gültige Geometrie

Jedes der unten abgebildeten Ornamente hat als Fundamentalebene ein Dreieck (weiß im Bild rechts). Dieser sieht auch immer ungefähr gleich aus, einerlei, ob er (und mit ihm das ganze Ornament) auf der Kugeloberfläche (Bild unten, links), in der euklidischen Ebene (Mitte) oder in der hyperbolischen Ebene (rechts) liegt: eine halbe Armbrust, ein halbes Blütenblatt, ein halber Fisch und ein Stück türkisfarbener Schnörkel. Aber der Eindruck täuscht! Da die Winkelsumme im Dreieck nur in der Ebene 180 Grad beträgt, auf der Kugel jedoch darüber und in der hyperbolischen Ebene darunter liegt, müssen die dreieckigen Fundamentalebereiche sich zumindest in den Winkeln unterscheiden.

In der Tat: Auf der Kugel zielen nur fünf statt sonst sechs Armbrüste auf die Blume, die auch nur fünf statt sechs Blütenblätter hat. Entsprechend hat die Ecke des Fundament-



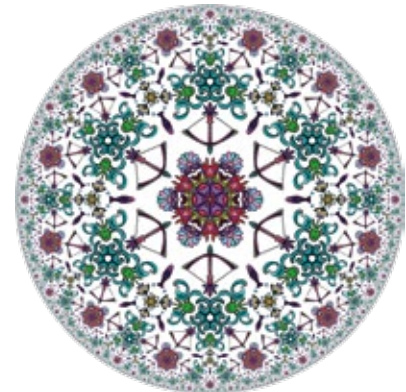
dreiecks, die im Zentrum der Blume liegt, einen Winkel von 36 statt 30 Grad. In der hyperbolischen Ebene dagegen hat der türkisfarbene Schnörkel drei statt zwei Arme. Also muss der entsprechende Dreieckswinkel kleiner sein.

Will man also einen Fundamentalebereich von einer Geometrie in die andere übertragen, muss man ihn so ver-

zerren, dass sich die Winkel in dessen Ecken verändern. An allen übrigen Stellen müssen sie erhalten bleiben, denn ein verzerrtes Muster ist nur dann einigermaßen wiedererkennbar, wenn die Verzerrung winkeltreu ist.

Mit Hilfe der komplexen Funktionentheorie findet man eine fast überall winkeltreue (»konforme«) Verzerrung, die diese widersprüchlichen Anforderungen erfüllt.

Die drei abgebildeten Ornamente stammen von Autis mom (Michelle Martin; siehe S. 61).



ALLE MICHELLE MARTIN, USA

wiederholte Spiegelung an den Dreiecksseiten füllt man die ganze Ebene so, dass sich um eine Dreiecksecke je nachdem 4, 6 oder 14 gleiche oder spiegelbildlich gleiche Dreiecke scharen. Das funktioniert nicht nur mit 4, 6 und 14, sondern mit beliebigen ganzzahligen Nennern (für ungerade Nenner muss man allerdings mit Drehungen statt mit Spiegelungen arbeiten) – vorausgesetzt, die Winkelsumme bleibt unter 180 Grad.

Um ein hyperbolisches Dreieck mit einem Muster zu füllen, das künstlerischen Ansprüchen genügt, ist es am geschicktesten, ein Dreieck in der gewöhnlichen Ebene so zu deformieren, dass das Ergebnis die geforderten Winkel hat, im Übrigen aber dem Original möglichst nahekommt (Kasten oben). Einen

Algorithmus dafür haben Jürgen Richter-Gebert und Martin von Gagern im Rahmen des Sonderforschungsbereichs »Discretization in Geometry and Dynamics« der DFG ausgearbeitet; dieser ist Grundlage für die hyperbolischen Ornamente in der App iOrnament.

Dabei war es ihnen ein besonderes Vergnügen, das Werk Eschers in seinem Sinn fortzuführen (siehe die nebenstehende Arbeit, online unter www.combinatorics.org/Volume_16/PDF/v16i2r12.pdf verfügbar): Aus seiner berühmten Einteilung der gewöhnlichen Ebene in Kriechtiere machten sie ein »Kreislimit«. Dabei mussten sie den Reptilien vier statt drei verschiedene Farben zu teilen, damit die Farbgebung zur neuen Symmetriegruppe passt. ~

DER AUTOR



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

QUELLE

von Gagern, M., Richter-Gebert, J.: Hyperbolization of Euclidean Ornaments. In: The Electronic Journal of Combinatorics 16, #R12, 2009

WEBLINK

Dieser Artikel und weitere Links zum Thema im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281876

CUTTING EDGE

NATURE
NATURE BIOTECHNOLOGY
NATURE CELL BIOLOGY
NATURE CHEMISTRY
NATURE CLIMATE CHANGE
NATURE COMMUNICATIONS
NATURE GENETICS
NATURE IMMUNOLOGY
NATURE MATERIALS
NATURE MEDICINE
NATURE METHODS
NATURE NANOTECHNOLOGY
NATURE NEUROSCIENCE
NATURE PHOTONICS
NATURE PHYSICS
NATURE STRUCTURAL AND MOLECULAR BIOLOGY
BIOLOGICAL CHEMICAL EARTH MEDICAL PHYSICAL

Download the *Nature Journals* app for iPad, iPhone and iPod touch and gain access to over 30 cutting-edge Nature-branded titles. Subscribe to any journal in the app for just \$35.99*, or access all open access articles and news content for free. Tap in and discover more.

nature.com/appforall

*Apple exchange rates apply. Full access is also available through an existing personal or mobile subscription. Limited time offer available on all journals except *Scientific Reports*. iPad, iPhone and iPod touch are trademarks of Apple Inc.



Sprachenvielfalt der Anden

Vergleiche heutiger Sprachen sowie spanische Aufzeichnungen liefern neue Daten zur Kulturentwicklung im Andenraum, von den Inka bis in die Zeit der ersten Hochkulturen.

Von Paul Heggarty

Sie kannten weder Eisen noch Räder, weder Pferde noch Zugtiere, weder Märkte noch Geld. Und dennoch eroberten die Inka ein Reich, das von Ecuador bis Argentinien reichte und so unterschiedliche Naturräume umfasste wie Nebelwälder, Küstenwüsten, Hochebenen und die von Gletschern bedeckte Gebirgskette der Anden. Es bildete den krönenden Abschluss einer Jahrtausende dauernden Geschichte, in der Kulturen aufkamen und wieder vergingen, manche nur regional bedeutsam, andere wie die der Chavín oder der Wari hingegen weithin ausstrahlend.

Diese Entwicklung versuchen Forscher diverser Disziplinen zu rekonstruieren: Archäologen studieren die materiellen Hinterlassenschaften der vergangenen Völker; Paläoklimaforscher analysieren Seesedimente und Gletschereis; Archäobotaniker und -zoologen gehen den Pflanzen und Tieren der Vergangenheit nach; Chemiker verfolgen Wanderungsbewe-

gungen anhand von Isotopenanalysen menschlicher Überreste; Molekularbiologen vergleichen antike Gensequenzen mit denen heutiger Bewohner. Auf diese Weise lassen sich nicht nur Kulturen voneinander abgrenzen und Entwicklungsphasen der Andengeschichte zuordnen (siehe Bild S. 70), auch die gegenseitigen Einflussnahmen, die Eroberungen und Migrationsbewegungen werden so fassbar.

Eine weitere Informationsquelle wird dagegen noch wenig beachtet: die Sprachen. Denn sie erschienen Altamerikanisten lange nur mäßig interessant. So wie das Römische Reich die lateinische Sprache verbreitet hatte, sollten alle Varianten des Quechua auf die in der Inka-Hauptstadt Cuzco gesprochene zurückgehen. Das heutzutage rund um den Titicacasee gebräuchliche Aymara galt als Sprache der dort lange vor den Inka herrschenden Tiwanaku-Kultur. Puquina und Uru, Ersteres heute ausgestorben, Letzteres auf ein paar Dörfer beschränkt, wurde wenig Bedeutung beigemessen. Erst in den letzten Jahren konnten Linguisten die Aufmerksamkeit von Archäologen und Genetikern für ihren Forschungsgegenstand wecken.

Anhand ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede können Linguisten Verwandtschaften von Sprachen wie auch gegenseitige Beeinflussungen erkennen (siehe Tabelle S. 71). Die historisch-vergleichende Linguistik rekonstruiert solche Entwicklungslinien durch Raum und Zeit. Neuerdings verwendet man dazu Modelle, die jenen nachempfunden sind, mit denen Paläontologen und Evolutionsbiologen den Ursprung von Arten rekonstruieren. Zwar sind Worte und ihre Bedeutungen, Sprachlaute und Grammatiken nur bedingt vergleichbar mit unserer Erbsubstanz und mitunter weit komplexer als deren Kodierung mit nur vier verschiedenen Molekülen. Gerade in der Erforschung der Andensprachen im Hinblick auf die präkolumbischen Kulturen dieses Raums hat der Ansatz aber gemeinsam mit traditionellen Methoden überraschende Resultate erzielt.

Demnach lassen sich die Verbreitungsgebiete der heutigen Sprachen des Andenraums nicht ohne Weiteres auf die Vergangenheit übertragen. Denn insbesondere die Inka siedelten Bevölkerungsgruppen im großen Stil um, beispiels-



DIE SERIE IM ÜBERBLICK

WELT DER SPRACHE

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

weise damit Arbeitskräfte für den Straßenbau oder Soldaten für den Militärdienst bereitstanden, aber auch, um Aufständische zu isolieren. Nahezu ein Drittel der Gesamtbevölkerung, so schätzt der Archäologe Terence D'Altroy von der Columbia University in New York, musste seine Heimat verlassen und sich mitunter Tausende von Kilometern weit davon entfernt ansiedeln.

Die genetische Forschung kann diese Migrationen kaum nachvollziehen. Die intensive Durchmischung des Genpools

erlaubt insbesondere in den Zentralanden nicht einmal, quechua- und aymarasprachige Gruppen voneinander zu unterscheiden; in den Randzonen des Inkareichs sind die Verhältnisse etwas klarer.

Anders die Linguisten, die beispielsweise eine Migration aus der Cuzco-Region nach Potosí annehmen. Denn das dort gesprochene Quechua ähnelt dem von Cuzco derart, dass es von dort stammen muss und erst vor wenigen hundert Jahren eine eigene Entwicklung eingeschlagen haben kann. Tatsäch-

Terrassenanlagen für die Landwirtschaft wie hier nahe der Ruinenstätte Pisac (Bildmitte, Pfeil) galten lange als Errungenschaft der Inka. Tatsächlich gab es sie schon in der Wari-Kultur. Vermutlich sorgten die Wari zudem für die erste Verbreitung des Quechua – und möglicherweise auch des Aymara.

ISTOCKPHOTO / MARIUSZ PRUSACZYK



lich waren dafür die Spanier verantwortlich, die Arbeitskräfte zur Silbermine von Potosí verfrachteten.

Im Unterschied dazu zeigt das im Hochland von Ecuador gebräuchliche Quechua so starke Eigenheiten, dass es sich schon lange vor der Eroberung des Gebiets durch die Inka vom Cuzco-Zweig getrennt haben muss. Manches verweist dabei sogar auf Regionen Perus als Quelle, die weit von Cuzco entfernt sind. Tatsächlich bildete Quito eine zweite Inka-Hauptstadt, mit eigener Verwaltung und sogar einem eigenen Hofstaat. Vermutlich erforderte oder förderte dies die Zuwanderung von Bevölkerungsgruppen aus vielen Teilen des Reichs mit ihren jeweiligen Quechua-Dialekten.

Inzwischen können Linguisten durch Sprachvergleiche zeigen, dass Quechua schon Jahrhunderte vor der Expansion der Inka in einem riesigen Gebiet gesprochen wurde, das sich 800 Kilometer weit über das Hochland erstreckte: in der »Quechua Continuous Zone«. Das lässt sich nur durch die Annahme eines »Proto-Quechua« erklären, das sich vor mindestens 1000 Jahren verbreitet hat.

Bis vor wenigen Jahren zeichneten Sprachforscher dazu einen Quechua-Familienstammbaum mit zwei Hauptästen sowie Verzweigungen, die den altperuanischen Kulturen Cajamarquilla, Chincha und Chanka entsprechen sollten. Diese ordnen Archäologen so genannten Zwischenzeiten zu, also Phasen der Andenchronologie, in denen verschiedene lokale und regionale Kulturen aufkamen (siehe Chronologie unten). Doch ohne Expansion einer dominierenden Kultur oder Macht lässt sich die Karriere des Proto-Quechua kaum verstehen. Inzwischen entdeckten Linguisten in abgelegenen Bergdörfern Zwischendialekte des Quechua, also Varianten,

AUF EINEN BLICK

WECHSELSPIEL DER SPRACHEN

1 Die dominierende Sprachfamilie des Andenraums heute ist das **Quechua**, gefolgt vom **Aymara**. Vereinzelt wird noch **Uru** gesprochen; bis in das 19. Jahrhundert hinein gab es auch noch Sprecher des **Puquina**.

2 Linguisten untersuchen **Verwandtschaften und Varianten** von Sprachlinien. Anhand dieser Daten rekonstruieren sie deren **Entwicklungsphasen**.

3 Der Abgleich mit archäologischen Daten stützt Annahmen, in welchen **präkolumbischen Hochkulturen** die Sprachen wann verbreitet waren. Dabei zeigt sich oft, dass die besonderen **Naturräume der Anden** diese Entwicklung prägten.

die sich nicht recht in einen der beiden Hauptäste einfügen wollen. Damit erscheint diese Sprachfamilie heute eher als komplexes Netzwerk. Das deutet aber auf eine einzige Expansionsphase über die gesamte »Continuous Zone« vor mehr als einem Jahrtausend hin.

Als Triebkraft kommt dafür das Wari-Reich der als Mittelhorizont bezeichneten Phase von etwa 550 bis 1000 n. Chr. in Frage. Der Fachbegriff »Horizont« spiegelt die archäologische Situation wider: Kommen charakteristische Befunde einer Kultur in einem größeren Gebiet zu Tage, deutet das auf Expansion und Einfluss hin. Ob dies auf politische oder militärische Macht zurückzuführen ist, bleibt aber jeweils abzuklären und ist – von den Inka (»später Horizont«) abgesehen – noch in der Diskussion.

Anhand ihrer materiellen Hinterlassenschaften lassen sich im Andenraum Kulturen unterscheiden.

Als Horizont bezeichnen Altamerikanisten Phasen, in denen eine davon über andere dominierte.

Periode	ungefähre Daten	Küste: Peru			Hochland: Peru				Bolivien	
		Norden	Mitte	Süden	Norden	Mitte	Mitte-Süd	Süden	tiefer Süden	Altiplano
Später Horizont	1476 – 1534 n. Chr.	Inka								
Späte Zwischenzeit	1000 – 1476 n. Chr.	Chimú		Chincha			Chanka			
Mittlerer Horizont	550 – 1000 n. Chr.	Wari								Tiwanaku
Frühe Zwischenzeit	1 – 550 n. Chr.	Moche	Cajamarquilla	Nazca						
Früher Horizont	900 v. Chr. – 1 n. Chr.	Chavin								
Initialzeit	1500? – 900 v. Chr.					Kotosh				
Präkeramische Zeit	2700? – 1500? v. Chr.		Norte Chico							

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: PAUL HEGGARTY UND DAVID BEREFOUR-JONES

Im Aymara heißen 7 und 8 »2 qalqu« und »3 qalqu«. »qalqu« bedeutete wohl 5 – der ursprünglichen Zahlenbasis im Aymara –, wurde aber später durch das Quechua-Wort »pichqa« ersetzt (gleiche Farbe bedeutet gleiche Herkunft; Transkriptionen gemäß dem Internationalen Phonetischen Alphabet).

FAMILIE	QUECHUA			AYMARA	URU	PUQUINA
ZAHLOWORT	ECUADOR	HUANCAYO	Cuzco	TIWANAKU	CHIPAYA	TIWANAKU?
1	ɖux	huk	hɔχ	maja	tsɖi	huksto
2	iɖki	iɖkaj	iskaj	paya	piɖk	so
3	kimsa	kimsa	kinsa	kimsa	tɖɖɖɖ	kappa
4	tɖusku	tawa	tawa	pusi	paχpik	sper
5	pitɖka	pitjɖa	pisqa	pɖisqa	taxɖnuku	takpa
6	suxta	suuɖta	sɖɔxta	sɖɔxta	sɖɔxta	tɖitɖu
7	kantɖis	ɖanɖiɖ	qantɖis	pa.qalqo	pa.qalqo	stu
8	pusax	pusax	pusaχ	kimsa.qalqo	kinsa.qalqo	kinas
9	iskun	isɖuŋ	isqɖŋ	ɖaatunja	ɖaatunja	tɖeka
10	tɖuŋɖa	ɖuŋja	tɖuŋja	tunja	tunja	skata

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH PAUL HEGGARTY UND WILLEM ADELAAR

Der Zentralort des Wari-Reichs lag in 2770 Meter Höhe nahe der heutigen Stadt Ayacucho im südlichen Zentralhochland Perus. Dort lebten auf gut 15 Quadratkilometern 20000 bis 100000 Einwohner; es ist heute die größte archäologische Stätte auf dem amerikanischen Kontinent. Das Wari-Reich kollabierte etwa um die Jahrtausendwende, dauerte damit also etwa 450 Jahre, was sehr gut zu den Quechua-Analysen passt.

Zweisprachiges Wari-Reich?

Auch geografisch deckt sich das Einflussgebiet der Wari weitgehend mit der »Quechua Continuous Zone«, vor allem durch das Höhenband von 2300 bis 3500 Meter, das sich für den Maisanbau eignet. Dank terrassenförmiger Äcker und weit entwickelter Bewässerungssysteme stieg die landwirtschaftliche Produktivität, was vermutlich die Bevölkerung wachsen ließ. Archäologen haben inzwischen bestätigt, dass auch das den Inkas zugeschriebene Wegenetz wohl großteils schon von den Wari angelegt wurde. Zu deren kulturellen Leistungen gehören nicht nur Frühformen der Khipu, also der zur Verwaltung von Ressourcen entwickelten Schnüre mit einem Knoten-Zahlenkode, sondern nach Ansicht mehrerer Experten auch die erste Verbreitung des Quechua.

Südöstlich ihres Reichs, in der Kernregion des Altiplanos, blühte zur gleichen Zeit eine rivalisierende Kultur: Tiwanaku mit dem gleichnamigen, nahe dem Titicacasee gelegenen Zentralort. Heute spricht man dort Aymara, doch es ist so homogen, dass es wohl erst in deutlich jüngerer Zeit dorthin gelangt sein kann. Stärker variierende, also früher abgespaltene Formen entdeckten Sprachforscher hingegen weit außerhalb der Einflussphäre Tiwanakus. Dazu gehört das Jaqaru, eine von wenigen hundert Menschen verwendete, dem Aymara verwandten Sprache in Zentralperu. Zu den älteren Nachweisen zählen auch Ortsnamen in Gebieten, in denen heute eine andere Sprache gebräuchlich ist. Eine dritte Informationsquelle zum Vorkommen des Aymara sind Berichte der spanischen Eroberer.

Lange glaubten Linguisten, die Wari-Kultur habe das Aymara verbreitet, nun weisen ihm historische Sprachfor-

schung und Archäologie eine tragende Rolle für die Ausdifferenzierung des Quechua zu. Kann eine einzige Kultur gleich zwei Sprachfamilien fördern? Tatsächlich lassen sich mit den Analyseverfahren ausgeprägte Interaktionen zwischen beiden nachweisen. Eine mögliche Erklärung bietet die Ökologie der Anden. Denn ab etwa 3700 Meter Höhe gedeiht kein Mais; dort pflanzte man Kartoffeln, züchtete Lamas und Alpakas. Den verschiedenen Subsistenzsystemen könnten, so die Idee, auch verschiedenen Populationen entsprochen haben, die miteinander in einem symbiotischen Verhältnis und stetem Austausch standen. Und während Maisbauern Quechua sprachen, benutzten die Hirten das Aymara.

In vielen Wari-Gegenden deuten Relikte der genannten Art aber darauf hin, dass diese Sprache dort schon vor dem Quechua im Umlauf war, also vor den Wari des Mittleren Horizonts. Auf der Suche nach einer alternativen Verbreitungshypothese können Archäologen einen Kandidaten präsentieren: die Chavín-Kultur des »Frühen Horizonts« (900 v. Chr. – 1 n. Chr.). Ihr Zentrum bildete die mit ihren monumentalen Tempelanlagen auch heute noch beeindruckende Stätte Chavín de Huántar auf 3180 Meter Höhe im zentralen Hochland Perus (siehe Karte S. 72). Tatsächlich lässt sich der Einfluss der Chavín-Kultur weit im Süden nachweisen, wo Jahrhunderte später die Wari-Kultur aufkam. Umgekehrt kontrollierte jene später Gebiete in ihrem Norden, die einst Chavín-Land waren. Dieser Kontakt zwischen Sprechergruppen spiegelt sich möglicherweise in den linguistischen und archäologischen

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



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

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



Die historische Sprachforschung hat in den letzten Jahren im Verein mit Archäologie und Naturwissenschaften ein immer klareres Bild der Sprachentwicklung im Andenraum gewonnen. Demnach gab es drei Hauptexpansionsphasen der großen Sprachfamilien, gefördert durch den Einfluss bestimmter präkolumbischer Kulturen. Die farblich dargestellten Verbreitungsgebiete sind Schätzungen. Eingetragen sind die jeweils wichtigsten der archäologischen Stätten der betreffenden Kulturen.

Früher Horizont: Chavín



Mittlerer Horizont: Wari and Tiwanaku



Daten, denen zufolge dann die Chavín-Kultur Ursprung und Verbreiter des Aymara war beziehungsweise die Wari-Kultur diese Rolle für das Quechua innehatte.

Gewissheit aber gibt es noch nicht. Denn je tiefer man in der Zeit zurückgeht, desto spärlicher werden die archäologischen Daten. Im Vergleich zum Quechua kennen wir zudem die längst verschwundenen Aymara-Varianten weit weniger detailliert, so dass Sprachvergleiche kaum sagen können, ob sein Ursprung überhaupt bis in den Frühen Horizont zurückreicht. Dass sich diese Sprachfamilie mit der Chavín-Kultur ausgebreitet hat, ließe sich anhand mancher Ortsnamen in ihrem Einflussgebiet belegen, doch ist deren Aussagekraft weit schwächer als Begriffe einer gesprochenen Sprache.

Wie sich die Aymara-Familie also entwickelt und verbreitet hat, lässt sich daher noch nicht sagen. Lediglich die früher angenommene Verbindung zu Tiwanaku gilt inzwischen als un-

wahrscheinlich. Jüngste Hypothesen erklären das Vorkommen am Titicacasee auf unerwartete Weise: mit den Inka.

Tatsächlich sprach man in der Cuzco-Region neben Quechua auch Aymara, wie Namen berühmter Stätten verdeutlichen, beispielsweise der heilige Fluss Vilcanota oder Cuzco selbst. Die frühe Expansion der Inka südwärts in das Gebiet des ihnen ebenfalls heiligen Sees wäre also eine Erklärung, wie Aymara vor fast sechs Jahrhunderten dorthin gelangte. Nur in ihrer nordwärts gerichteten Eroberungsphase übernahmen sie von den Wari neben deren Infrastruktur aus reinem Pragmatismus auch das dort verwendete Quechua. Das mag erklären, warum diese nördliche Variante zur Verwaltungssprache avancierte, nicht aber das Quechua von Cuzco.

Zu Beginn des Späten Horizonts, also der Zeit der Inka-Herrschaft, waren um den Titicacasee zwei weitere Sprachen verbreitet, die allmählich von den beiden großen Konkurrenten und danach auch vom Spanischen verdrängt wurden: Uru und Puquina. Spanischen Dokumenten zufolge wurde Letzteres bis in das frühe 19. Jahrhundert gesprochen. Einzelne Puquina-Wörter finden sich noch im Kallawayá, einer esoterischen Ritualsprache, die von Heilern einer Hochgebirgsregion östlich des Titicacasees verwendet wird. Ansonsten kennen wir leider nur einen kurzen Katechismustext aus der spanischen Kolonialzeit. Die vierte Sprachlinie, Uru, starb im Seegebiet während des 20. Jahrhunderts aus, wird aber noch in dem Dorf Chipaya gesprochen, ein paar hundert Kilometer südlich des Titicacasees.

Linguisten fanden heraus, wer in vorgeschichtlicher Zeit Puquina sprach – und überraschten damit die Altamerikanisten. So konnten sie behaupten, dass es während der Phase des Mittleren Horizonts die Hauptsprache im Tiwanakuraum war. Rodolfo Cerrón-Palomino von der Pontificia Uni-



Grabtürme für die Elite (hier bei Sillustani) waren Kennzeichen der Colla-Kultur. Deren Sprache war wohl Puquina.

Später Horizont: Inka



heute



Legende

- moderne Stadt
- ◆ archäologische Stätte oder kulturelle Region
- Aymara
- Quechua
- Uru
- Puquina
- moderne Landesgrenze



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH PAUL HEGGARTY

versidad Católica del Perú bestätigte, wer es nach dem Zusammenbruch von Tiwanaku verwendete: die Colla. Bislang hatten Archäologen angenommen, diese regional wichtige Gruppe, deren Hauptort bei Sillustani für seine Grabtürme (Chullpas, siehe Bild links) berühmt ist, sei ein »Aymara-Königreich« gewesen. Was noch spannender ist: Cerrón-Palomino entdeckte auch Spuren von Puquina in der Cuzco-Region, insbesondere bei Namen heiliger Stätten und früher Inka-Herrscher. Archäologen hatten sich schon lange darüber gewundert, dass manche der präzise bearbeiteten Monolithen der Inka-Kultur solchen aus Tiwanaku ähneln. Zwar verlegte ein Mythos der Inka deren Abstammung an den Titicacasee, doch maßen die Experten den Gründungslegenden wenig Bedeutung bei. Jüngste Sprachforschung zeigt nun, dass dieser Mythos vielleicht einen historischen Kern besaß.

Die Sprache der Wassermenschen

Tiwanaku war nicht so mächtig wie das zeitgleiche Wari. Archäologen scheuen daher auch davor zurück, von einem Reich zu sprechen und bevorzugen neutralere Begriffe wie Einflussphäre. Doch als Tiwanaku verging, mag eine Gruppe Exilanten im Tal von Cuzco eine neue Heimat gefunden haben. Als die Inka den Titicacasee eroberten, siedelten sie nun ihrerseits Aymara-Gruppen aus dem Cuzco-Raum dort an, was das heutige Vorkommen dort erklärt.

Die vierte Sprachlinie schließlich, das Uru, gehörte niemals zu einer dominanten Kultur. Seine als »Wassermenschen« bezeichneten Sprecher lebten wenig beachtet auf ihren schwimmenden Inseln im Titicacasee oder in den Überflutungszonen nördlich der Salzpflanzen von Coipasa und Uyuni. Selbst die Spanier gaben schließlich alle Versuche auf, die Uru zu besteuern. Dieser Isolation ist es wohl zu verdanken, dass die Sprache so lange überlebt hat.

Nimmt man die gesamte Andenregion in den Blick, ergibt sich also ein unerwartet heterogenes Sprachbild, das sich von dem der antiken Hochkulturen der Alten Welt deutlich unterscheidet. Dafür mag es mehrere Gründe geben, doch alle verweisen auf die vielfältigen Naturräume der Anden. So hält der kalte Humboldt-Strom zwar Regen von der pazifischen Küste fern, andererseits sorgt sein Nährstoffreichtum für eine vielfältige marine Tierwelt. Anders als in der Alten Welt basierten die ersten Hochkulturen daher vor nahezu fünf Jahrtausenden nicht auf dem Getreideanbau, sondern auf der Fischerei. Doch die lebensfeindlichen Trockengebiete isolierten diese Kulturen voneinander. Erst ab etwa 1000 v. Chr., viele Jahrtausende später als in der Alten Welt, ermöglichte die Intensivierung der Landwirtschaft ein nennenswertes Bevölkerungswachstum – und damit die Ausbreitung und Ausdifferenzierung der Sprachenfamilien. ~

DER AUTOR



Paul Heggarty arbeitet als Prähistoriker in der Abteilung für Linguistik des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig.

QUELLEN

- Cerrón-Palomino, R.:** Las lenguas de los incas: el puquina, el aimara y el quechua. Peter Lang, Frankfurt am Main, 2013
D'Altroy, T. N.: The Incas. Wiley-Blackwell, Oxford 2014
Heggarty, P., Beresford-Jones, D. G. (Hg.): Archaeology and Language in the Andes. Oxford University Press 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281878

WISSENSCHAFTLER UND NOBELPREISTRÄGER IN IHREM BRIEFKASTEN.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT-Abo mit exklusiven Extras

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK.



1. So geht das! Das ultimative Anleitungsbuch

Für 500 denkbare und undenkbbare Fälle dieser Welt hält dieses unvergleichliche Buch die Erklärung bereit. Einfach und anschaulich, mit wenig Text und vielen piktogrammatischen Schritt-für-Schritt-Illustrationen.

2. Spektrum-Jahrgangs-CD-ROM

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



2. Tablet Sleeve von ReisetheL

Maße: 16,8 cm x 24,1 cm x 1 cm.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/abo

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



SICHERN SIE SICH ALLE VORTEILE IM ABO ...

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

VORTEILSABO

ABOPLUS+ – EXKLUSIVE VORTEILE FÜR ABONNENTEN!

+ ERSPARNIS:

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

+ WUNSCH-GESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten

+ EXKLUSIVE ABOPLUS+-VORTEILE:

2 IN 1:

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

KOSTENLOSER ARCHIVZUGANG

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

VERGÜNSTIGUNGEN:

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

EXTRAS:

ausgewählte Hefte zum kostenlosen Download




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

ÖKOLOGIE


Architekten für Sümpfe

Viele Renaturierungsprogramme für Feuchtgebiete scheiterten in der Vergangenheit, weil sie das ursprüngliche Ökosystem komplett wiederherstellen wollten. Erfolgreicher waren Projekte, die sich auf ein oder zwei Einzelziele konzentrierten – und den Rest der Natur überließen!

Von John Carey



Die Delaware-Bucht an der Ostküste der USA bietet ein Beispiel für die gelungene Renaturierung einer Salzmarsch. Nachdem Ingenieure Deiche durchstochen und mit Kanälen den Zutritt von Süß- wie Salzwasser erleichtert hatten, um Lebensraum für Fische zu schaffen, entwickelten sich auf dem einstigen Ödland ganz von selbst üppige Salzwiesen mit einer reichen, gesunden Vegetation.



Joy Zedler achtete genauestens darauf, dass die drei experimentellen Feuchtgebiete, die sie im Arboretum der University of Wisconsin in Madison anlegen ließ, möglichst identisch waren: 90 × 4,5 Meter messende Sümpfe, im Abstand von einem Meter nebeneinander in die grüne Landschaft gegraben und auf ähnliche Art bepflanzt. Sie und ihre Mitarbeiter sorgten ferner dafür, dass gleiche Wassermengen aus einem Bassin in die Testflächen strömten. Kontinuierlich ermittelten sie den Nährstoffeintrag in

jede Parzelle und maßen den Ablauf in ein Bassin am anderen Ende. Zudem verfolgten sie, wie sich Bodenfestigkeit und Vegetation entwickelten.

Es ging um mehr als bei anderen typischen Uniprojekten. Die Behörden von Madison waren sehr am Ergebnis interessiert; denn der benachbarte Wingrasee litt unter stickstoff- und phosphorhaltigen Nährstoffeinträgen durch städtisches Abwasser. Die Frage war, ob Feuchtgebiete dazu dienen könnten, es teilweise zurückzuhalten und zu reinigen. Hinzu kam

GETTY IMAGES / DIANA KEHOE

die Beurteilung anderer möglicher Nutzeffekte wie den Schutz vor Überschwemmungen oder ein größeres Artenspektrum. Solche »Dienstleistungen« von Ökosystem zu bewerten, ist ein immer dringlicheres Anliegen, da Feuchtgebiete weltweit in alarmierender Zahl verschwinden. Als Professorin für Botanik und Renaturierungsökologie wollte Zedler dazu neue Erkenntnisse gewinnen.

Drei Jahre später war allerdings klar, dass das Experiment weniger Fragen beantwortete als neue aufwarf. »Nichts verhielt sich wie erwartet«, wundert sich Zedler. So entwickelten sich die Parzellen keineswegs gleich. Auf einer von ihnen wuchsen am Ende fast ausschließlich Rohrkolben, während die beiden anderen bis zu 29 verschiedene Pflanzenarten beherbergten. Die Testfläche mit den Rohrkolben produzierte zwar mehr Biomasse als erwartet, enttäuschte aber in jeder anderen Hinsicht. Weder wurde der Wasserstrom verlangsamt noch die Bodenerosion aufgehalten. Auch die im Wasser gelösten Nährstoffe nahm der Sumpf kaum auf. Die beiden anderen Flächen hingegen zeigten zwar die meisten der erwarteten vorteilhaften Eigenschaften, produzierten aber nur wenig Biomasse.

Woher kamen diese frappierenden Unterschiede? Wie Zedlers Team herausfand, war die Tonschicht unter dem Rohrkolbensumpf etwas dicker und damit weniger durchlässig als unter den benachbarten Parzellen. Das Niederschlagswasser konnte deshalb nicht versickern. Es sammelte sich in flachen Teichen und floss nach stärkeren Regenfällen rasch ungefiltert mitsamt den Nährstoffen ab. Außerdem gedieh im Schatten der hohen Rohrkolben kein Moos, das in den benachbarten Gräben den Boden festhielt. Dadurch war die Erosion stärker.

Diese überraschenden Ergebnisse lassen erahnen, warum frühere Renaturierungsversuche von Feuchtgebieten so oft fehlgeschlagen sind. Die generelle Lehre aus diesem und ähnlichen Experimenten ist, gar nicht erst zu versuchen, ein Ökosystem genau so wiederherstellen, wie es früher einmal war. »Wir wissen nicht, wie wir das hinbekommen sollen«, gesteht Douglas A. Wilcox, Professor für Feuchtgebietsforschung am College at Brockport der State University of New

York. Es gebe einfach zu viele Variable. Stattdessen sollten sich die Planer auf wenige zentrale Punkte konzentrieren – wie die Wiederherstellung des Bodens, die Verbesserung der Wasserqualität oder die Aufstockung des Fischbestands – und optimale Voraussetzungen dafür schaffen, diese Ziele zu erreichen. Alles andere kann der Natur überlassen bleiben.

Eine weitere Lehre ist, renaturierte Feuchtgebiete über viele Jahre zu beobachten. Nur so können die Forscher herausfinden, was warum und wie funktioniert, und unvorhergesehene Entwicklungen erkennen – mit der Chance, gegebenenfalls korrigierend einzugreifen. Im Gegensatz zu Autos »gibt es für Feuchtgebiete keine Reparatur-Handbücher«, meint Wilcox.

Die Einsicht, dass sich geschädigte Ökosysteme in der Regel nicht in ihren ursprünglichen Zustand zurückversetzen lassen, mag ernüchternd sein. Doch auch Vorhaben mit begrenzten Zielen, deren Ergebnis unvollkommen bleibt, können einen großen Schritt vorwärts bedeuten. Das bezeugt eine wachsende Liste von Projekten, die in der Delaware-Bucht, dem Mississippi-Delta, im Irak und in der Küstenregion von Guyana durchgeführt wurden. William J. Mitsch, Direktor des Everglades Wetland Research Park in Florida ist deshalb auch optimistisch. »Renaturierungen gelingen inzwischen sehr viel besser als früher«, versichert er.

Die Nieren der Natur

Das hört sich gut an, wenn man bedenkt, wie wertvoll Feuchtgebiete sind. Mitsch bezeichnet sie als die »Nieren der Natur« und als »ökologische Supermärkte, die von Kriechtieren wimmeln, die dort Nahrung finden oder als Nahrung dienen«. Das Auto von Michael Weinstein vom New Jersey Institute of Technology ziert ein Aufkleber mit der Aussage »Ohne Feuchtgebiete keine Meeresfrüchte«. Nach Untersuchungen des Forschers hat die Nahrungskette, die in den sumpfigen Marschen entspringt, nämlich Ausläufer bis weit in küstennahe Meeresregionen. »Feuchtgebiete sind echt lebenserhaltende Systeme«, erklärt er.

Und sie üben eine wichtige Schutzfunktion aus. Ereignisse wie der Supersturm Sandy haben vielen bewusst gemacht, dass »das Trockenlegen von Sümpfen und Einebnen von Dünen keine gute Idee war«, erklärt John M. Teal, Experte für Salzmarschen und emeritierter Wissenschaftler an der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts. So haben die Reste der Salzwiesen in der Jamaica-Bucht von Long Island das Wüten des Sturms abgemildert, während Manhattan ohne solche Marschen der vollen Wucht der tosenden See ausgeliefert war.

Feuchtgebiete nehmen auch Nährstoffe auf, die sonst vom Ackerland ausgeschwemmt werden und schädliche Algenblüten sowie sauerstofffreie Totzonen in Seen und Küstengewässern verursachen. Sie beugen Überflutungen vor und – was laut Mitsch noch mehr zählt – »sind wohl das beste System auf dem Planeten zur Bindung des Treibhausgases Kohlendioxid«. Sie speichern es in Form üppiger Vegetation sowie fruchtbaren, humusreichen Bodens.

AUF EINEN BLICK

RENATURIERUNG VON FEUCHTGEBIETEN

1 Weltweit gehen **Feuchtgebiete** – artenreiche Lebensräume von hohem ökologischen Wert – in rasantem Tempo verloren.

2 **Renaturierungsprojekte** sind größtenteils fehlgeschlagen – vor allem, weil man versuchte, alle Details des ursprünglichen Ökosystems nachzuahmen.

3 Nach jüngsten Erfahrungen scheint es aussichtsreicher, die äußeren Bedingungen in ein oder zwei wesentlichen Punkten – etwa bei der Wasserqualität – zu verbessern, und ansonsten auf die **Selbstheilungskraft** der Natur zu vertrauen.

4 Inzwischen gibt es eine zunehmende Zahl an **Renaturierungsmaßnahmen** nach diesem Prinzip – so in den USA in der Delaware-Bucht und in Küstenregionen Louisianas sowie im Irak.



Wilde Kanadakraniche verlassen einen flachen Teich, der beim Anlegen eines experimentellen Feuchtgebiets an der University of Wisconsin in Madison aus Regenwasser entstanden war. Später sammelten sich darin auch städtische Abwässer. Das führte zu einer unerwarteten Invasion von Rohrkolben (dunkelgrün).

Trotzdem sind Feuchtgebiete in der Vergangenheit in großem Maßstab menschlichen Eingriffen zum Opfer gefallen. So wurden in Iowa und Delaware Sümpfe trockengelegt, um Getreide beziehungsweise Schlickgräser anzubauen. In Thailand hat man sie zum Anlegen von Fisch- und Garnelenteichen geflutet. Weltweit wurde massenweise Schwemmland durch Dämme der dringend benötigten Flusssedimente beraubt oder aufgefüllt, um Flughäfen und Städte zu bauen. Mitsch schätzt, dass Feuchtgebiete früher einmal vier bis sechs Prozent der Landfläche der Erde bedeckten. Gut die Hälfte ist bereits verschwunden.

Immerhin hat inzwischen teilweise ein Umdenken eingesetzt. Einen Meilenstein bedeutete die 1971 beschlossene internationale Ramsar-Konvention, der bis heute 168 Staaten beigetreten sind. Die Unterzeichner verpflichten sich, wertvolle Feuchtgebiete als Schutzzonen auszuweisen und Maßnahmen zu ihrem Erhalt und zur Bewahrung der dort herrschenden Artenvielfalt zu ergreifen. Die Europäische Union hat 2003 als Teil ihrer Wasserrahmenrichtlinie einen »Leitfaden Feuchtgebiete« herausgebracht, der den Umgang mit diesen Naturräumen regelt. In den USA verlangt die Gewässerschutzverordnung von Bauträgern oder anderen, die Feuchtgebiete zerstören, sie wiederherzustellen oder entsprechende Ausgleichsflächen zu schaffen. Jessica Bennett Wilkinson, leitende politische Beraterin für Schadensminderung der US-Naturschutzbehörde, kalkuliert die jährlichen Ausgaben dafür auf 3,9 Milliarden Dollar.

Noch viel mehr Geld fließt allerdings weltweit in Vorhaben wie die Pflanzung von Mangroven. Leider sind diese Mittel, nach den Ergebnissen zu urteilen, meist nicht sinnvoll investiert: Die Versuche, Mangrovensümpfe wiederherzustellen, schlagen in 90 Prozent der Fälle fehl – so die Schätzung von Robin Lewis, Präsident des Beratungsunternehmens Lewis Environmental Services. »Wir vergeuden jedes Jahr Millionen von Dollar für unsinnige Renaturierungsprojekte«,

meint er. Das bezeugt unter anderem eine 2012 publizierte Analyse von 621 wiederhergestellten Feuchtgebieten, die unter Leitung des Ökologen David Moreno-Mateos vom Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive in Montpellier (Frankreich) stattfand. Demnach bleiben die renaturierten Regionen selbst nach 50 bis 100 Jahren weit hinter dem zurück, was ein vergleichbares natürliches Feuchtgebiet leistet.

Ein Grund dafür ist die Kluft zwischen der Denkweise von Biologen und Ingenieuren. »Der Biologe macht etwas, der Ingenieur etwas anderes, und beide haben teils Recht und teils Unrecht«, beklagt Mitsch. Insbesondere vernachlässigt das Ingenieurkorps der US-Armee, das die meisten staatlich finanzierten Wiederaufbauprogramme leitet, beim technischen Umsetzen eines Projekts oft die biologischen Aspekte.

Letztlich beruht das Scheitern auf dem Fehlen ebenjener detaillierten Kenntnisse, die Zedler, Wilcox und andere akribisch zusammengetragen. »Mich irritiert, dass Leute Gelder zur Renaturierung von Feuchtgebieten erhalten, ohne dass sie vorher genügend Wissen darüber erworben haben, wie man das richtig macht«, schimpft Wilcox.

Die Bedeutung guter Wasserqualität

Aber wie klappt es besser? Am Anfang sollte man sich auf ein bis zwei Ziele konzentrieren und ein elementares Verfahren auswählen, sie zu erreichen. Eines der wichtigsten Grundprinzipien versteht sich eigentlich von selbst, wird aber oft nicht ernst genug genommen: die richtigen Wasserbedingungen zu schaffen. »Was wir tun, ist kein Hexenwerk«, betont Lewis, sondern »Hydrologie, Hydrologie und nochmals Hydrologie«.

In der Tat wirkt manchmal allein die Wiederbewässerung Wunder. Auf Grund von Kriegen, der Errichtung von Staudämmen und Saddam Husseins Bemühen, Widersacher ihrer Lebensgrundlage zu berauben, trockneten 90 Prozent der rund zwei Millionen Hektar Sumpfland im Süden Iraks bis

zur Jahrtausendwende aus. Nach dem Sturz des Diktators im Jahr 2003 wurde im Rahmen des Pionierprojekts »Eden Again« damit begonnen, erneut Wasser aus Tigris und Euphrat in das Gebiet zu leiten. Das reichte, das Sumpfland wiederherzustellen. Tausende der früheren Siedler kehrten zurück, um Wasserbüffel zu züchten, Fische zu fangen und aus dem Schilf Matten zu flechten. Inzwischen hängt das Schicksal des Marschgebiets allerdings wieder am seidenen Faden: Ein Dammbau am Tigris in der Türkei könnte zu neuerlichem Wassermangel führen.

Warum die Renaturierung von Mangrovensümpfen so oft scheitert

Die richtigen Wasserbedingungen sind auch entscheidend für die Renaturierung der Mangrovensümpfe, von denen inzwischen weltweit mehr als 100 000 Hektar pro Jahr verloren gehen, meint Lewis. Hier heißt das Hauptziel, für einen kräftigen Wuchs der Bäume zu sorgen, so dass sie Sturmfluten und Überschwemmungen trotzen. Jeder weitere Nutzen ist ein Extrabonus.

Bei dem alten Standardverfahren züchteten die Projektmitarbeiter in Baumschulen Tausende von Setzlingen und pflanzten sie anschließend in das küstennahe Schlickwatt. »Diese Vorhaben gelten gewöhnlich als erfolgreich, aber nach drei bis fünf Jahren sind alle Bäume wieder verschwunden«, beklagt Lewis.

Schuld ist in der Regel zu viel Wasser. »Eine Mangrove befindet sich eigentlich die meiste Zeit über dem Wasserspiegel«, erklärt der Forscher. »Das haben die Leute jahrzehntelang nicht verstanden.« Als der Renaturierungsexperte Jamie Machin, Gruppenleiter beim Entwicklungsberatungsunternehmen Landell Mills, im Juli 2012 nach Guyana kam, maß er die Wasserstände bei vielen der zuletzt gescheiterten Projekte. Wie sich herausstellte, lagen die neu bepflanzten Uferböden im Schnitt 50 Zentimeter zu tief; Baumstämme und Wurzeln standen deshalb zu lange im Salzwasser und starben allmählich ab.

Mit Hilfe einer Regierungsmannschaft legte Machin Bühnen an und pflanzte Schlickgräser, die das Sediment zurückhalten und so das Watt anheben. Das soll die Zeit verkürzen, in der die Bäume überschwemmt sind. Und das teure Nachpflanzen von Setzlingen dürfte sich auch erübrigen; denn Mangrovenbäume in der Nähe produzieren Ableger oder aus Früchten gekeimte Jungpflanzen, die ins Wasser fallen, dort umhertreiben und an günstigen Stellen Wurzeln schlagen. Auf diese Weise kolonisieren sie neue Bereiche ganz von selbst. »Sobald genügend Sediment vorhanden ist«, versichert Machin, »fassen die Keimlinge dort Fuß, und die Mangroven kommen zurück.« Es sei also gar nicht nötig, künstlich ein voll funktionsfähiges Ökosystem aufzubauen.

Auf ähnliche Weise renaturiert Lewis 400 Hektar Mangrovensumpf in dem Rookery Bay National Estuarine Research Reserve im Südwesten Floridas. Eine in den 1930er Jahren gebaute Küstenstraße schneidet dieses Gebiet großenteils von der natürlichen Gezeitenströmung ab. Außerdem füllen nun

starke Regenfälle den Sumpf wie eine Badewanne und ertränken die Bäume. Um die Hydrologie wieder ins Lot zu bringen, plant Lewis, große Düker (Rohrleitungen) unter der Straße zu verlegen und die inzwischen verstopften Priele auszubaggern, so dass das Wasser bei starken Regenfällen rasch abfließen kann und die Gezeitenströmung wieder Zugang erhält.

Auch hier ist das Hauptziel, die Bäume vor dem Absterben zu bewahren. So hat sich durch die erste Phase des Projekts mit einer Fläche von 2,4 Hektar die Gesundheit der Mangroven bereits wesentlich verbessert. Und es zeigen sich weitere positive Effekte. Beispielsweise haben die Bestände an Winkerkrabben und Barschen deutlich zugenommen. Wenn das Projekt abgeschlossen ist, »werden sich ausgesprochen wertvolle Fischbestände erneut in Gebieten angesiedelt haben, in denen sie heute nicht mehr vorkommen«, verspricht Lewis.

Wie diese Beispiele zeigen, kann die Natur sich unter gewissen Umständen durchaus selbst heilen, sobald die Hydrologie stimmt. In anderen Fällen braucht sie allerdings mehr Hilfe. So sind am Ontariosee tausende Hektar an Seggenried-Feuchtgebieten verschwunden, die einst die Ufer säumten. Der Hauptgrund ist die Errichtung von Dämmen, die den Wasserspiegel für den Schiffsverkehr und die Wasserkraftwerke das ganze Jahr über hoch halten sollen. Ohne Niedrigwasserperioden breiteten sich jedoch Rohrkolben aus und vernichteten das ehemals artenreiche Ökosystem. Die Regulierungsbehörden wollen deshalb nun während der natürlichen Trockenzeiten einen gewissen Abfall des Wasserspiegels zulassen.

Um das Seggenried zurückzubringen, müssen in einem zweiten Schritt die Rohrkolben dezimiert werden. Wilcox und seine Studenten hauen die Pflanzen deshalb im Frühling um – direkt nachdem die frischen Triebe die Energiereserven vom vergangenen Herbst aufgebraucht haben und



Die Salzmarsh in der Delaware-Bucht bot 1998 ein kümmerliches Bild (links). Zu ihrer Renaturierung genügte es, einige Deiche zu durchstechen, um den Zustrom und Abfluss von Süß- oder Meerwasser im Wechsel der Gezeiten zu ermöglichen. In der Folge

bevor durch erneute Fotosynthese die Speicher wieder aufgefüllt sind. Mit Herbiziden vernichten sie schließlich alle Sprösslinge.

Eine Erfolgsgeschichte

Wie sich die Konzentration auf ein Hauptziel bezahlt macht, hat sich auch in der Delaware-Bucht gezeigt. Dort erstreckten sich einst weite Salzwiesen, die reich an Krabben, Fischen und anderen Wasserbewohnern waren. Niederländische Siedler bauten dann Deiche und entwässerten hunderte Hektar des Feuchtgebiets, um Schlickgras zur Tierfütterung anzubauen. Auch heute produzieren Schlickgrasfarmen immer noch unkrautfreien Mulch und Material für Sargmatratzen.

Ein Blickfang am Ufer der Bucht in New Jersey ist das Kernkraftwerk Salem, das dem Energiegiganten PSEG gehört. Die Anlage saugt täglich mehrere Milliarden Liter Wasser zur Kühlung aus dem Meer ab und tötet dabei Millionen kleiner Fische und anderer Lebewesen, die durch die Einlassventile schlüpfen. Um das Gemetzel zu beenden, forderten in den frühen 1990er Jahren staatliche Regulierungsbehörden den Bau von Kühltürmen. Da das Unternehmen die Kosten von ein bis zwei Milliarden Dollar dafür scheute, bot es stattdessen an, mehr als 4000 Hektar Salzwiesen zu renaturieren – genug, um den Fischverlust auszugleichen.

PSEGs damaliger Umweltprojektleiter John Balletto engagierte ein Team hochkarätiger Renaturierungsexperten. Diese ermittelten als beste Option zum Steigern der Fischbestände, die Deiche an einzelnen Stellen zu durchstechen. Auf diese Weise wollten sie Kanäle schaffen, durch die gerade so viel Wasser strömen könnte, dass ein ähnliches Labyrinth aus primären und sekundären Prielen entstünde, wie es zuvor existiert hatte. Entscheidend war, die Eingriffe auf das Nötigste zu beschränken. »Wenn man ein Kanalsystem detailliert vorgibt, engt man sein Verhalten möglicherweise zu

sehr ein«, erläutert Teal, der zum damaligen Beraterteam gehörte. »Erlaubt man ihm dagegen, sich innerhalb gewisser Grenzen selbst zu entwickeln, erreicht es eher einen natürlichen stabilen Zustand.«

Das Team hob deshalb die Hauptkanäle und einige Seitenarme aus und überließ es dann dem Wasser, sich seine eigenen Fließrinnen zu graben. Die Ansicht der Wissenschaftler, dass die Salzwiesen auf natürliche Weise zurückkehren würden, erwies sich als richtig. Heute gedeihen dort mehr Fische, als durch die Wasserentnahmen des Kraftwerks verloren gehen. Und das restaurierte Gebiet unterscheidet sich nicht merklich von benachbarten natürlichen Salzwiesen, sagt Teal – obwohl das Projekt nur darauf abzielte, bessere Lebensräume für die Fische zu schaffen.

PSEG beobachtet die Entwicklung der Salzwiesen weiterhin und greift bei Problemen regulierend ein. »Wir machen auch nach 20 Jahren noch Kontrolluntersuchungen«, sagt Teal. »Bei den meisten Renaturierungsprogrammen überprüfen die Leute nach einem Jahr und vielleicht noch einmal nach drei Jahren, wie sich ihr Projekt entwickelt hat; und das war's dann.« Ein Vorhaben richtig anzugehen und über lange Zeit zu begleiten, ist teuer. Die Gesamtkosten in der Delaware-Bucht belaufen sich bislang auf mehr als 100 Millionen Dollar, aber das ist nur ein Bruchteil der für den Bau von Kühltürmen veranschlagten Summe.

Der Himalaja der Ökosystemdienstleistungen

Hunderte Hektar Salzmarsch zu renaturieren ist eine Sache. Aber können Wissenschaftler auch rückgängig machen, was Phil Turnipseed, Direktor des National Wetlands Research Center der USA in Lafayette (Louisiana), als »schlimmste Umweltsünde und größte ökonomische wie kulturelle Tragödie auf dem nordamerikanischen Kontinent« bezeichnet hat: die Zerstörung der Küstenlandschaft Louisianas? Nach Einschätzung von Experten sind dort in den letzten 80 Jahren mehr als 4500 Quadratkilometer Sumpfland verloren gegangen.

Die Antwort dürfte vielleicht schon bald vorliegen. Der Staat Louisiana hat ein umfassendes, 190-seitiges Konzept für eine nachhaltige Küstenentwicklung (Louisiana's Comprehensive Master Plan for a Sustainable Coast) erstellt, um die geschädigten Feuchtgebiete wiederherzustellen und neue aufzubauen – hauptsächlich durch Umleiten des sedimentreichen Wassers aus dem Mississippi in die küstennahen Uferbereiche. Und da die Region damit rechnen kann, Milliarden Dollar von BP als Ausgleich für die Ölverseuchung durch die Explosion der Ölplattform Deepwater Horizon zu erhalten, »gibt es außer dem Konzept nun auch das nötige Geld, an dem es vorher immer gemangelt hat«, lacht Steve Cochran, Direktor des Teams vom Environmental Defense Fund, das für die Renaturierung des Mississippi-Deltas zuständig ist.

In seinen Ausmaßen übersteigt das Vorhaben alle bisherigen solchen Projekte um Größenordnungen. Es geht um nicht weniger, als eine komplette Küste vor der verheerenden Wirkung von Sturmfluten zu schützen und zugleich eine



MIT FROLD GEN DER PSEG (PUBLIC SERVICE ELECTRIC & GAS COMPANY)

bildeten sich zusätzlich zu den künstlichen Kanälen natürliche Priele, die den Wasserhaushalt regulierten. Dadurch konnten sich wieder viele Pflanzen ansiedeln und gedeihen, wie eine Aufnahme aus dem Jahr 2013 zeigt (rechts).

Alarmierende Zahlen

- **Die Hälfte der Feuchtgebiete** in Nordamerika, Europa und China ist seit 1900 verschwunden.
- **Knapp 3,6 Millionen Hektar Mangrovenwälder** (rund ein Viertel) sind seit 1980 weltweit zu Grunde gegangen.
- **Mehr als 100 000 Hektar Mangrovenwälder** werden weltweit jedes Jahr vernichtet.
- Renaturierte Feuchtgebiete enthalten **nur 74 Prozent der Vegetation** in den natürlichen Ökosystemen.

riesige, hochproduktive Region wiederzubeleben – John Day, emeritierter Professor für Küstenökologie an der Louisiana State University in Baton Rouge, bezeichnet sie als den »Himalaja der Ökosystemdienstleistungen«. Misslingt der Versuch, könnte das Wasser des Golfs von Mexiko nicht nur New Orleans in ein modernes Atlantis verwandeln, sondern auch hunderttausende Küstenbewohner obdachlos machen, wenn der Meeresspiegel durch den Klimawandel weitersteigt. »Wir können es uns einfach nicht leisten, zu versagen«, beteuert Day.

Umstrittenes Umleiten sedimentreichen Flusswassers

Das Paradebeispiel für die erfolgreiche Renaturierung eines Küstenstreifens in Louisiana ist das Wax Lake Delta. Das ausgedehnte Schwemmlandareal südwestlich von Morgan City entstand, als das Armeekorps 1942 begann, sedimentreiches Wasser vom Atchafalaya River umzuleiten. »Es ist ein herrliches, abwechslungsreiches Gebiet mit Weiden in den Uferzonen«, schwärmt Denise Reed, leitende Wissenschaftlerin an dem kürzlich gegründeten Water Institute of the Gulf in Baton Rouge. »Der Boden ist wirklich fest – man kann darauf herumspringen.«

Reed und andere Wissenschaftler, die den Masterplan für die gesamte Küste Louisianas entwickelt haben, glauben daran, dass sich mit ähnlichen Umleitungen in 50 Jahren knapp 800 Quadratkilometer an neuen Feuchtgebieten schaffen lassen. Doch nicht alle sind ihrer Meinung. R. Eugene Turner von der Louisiana State University etwa hält die Annahmen für viel zu optimistisch. Ihm zufolge wäre nach bisherigen Erfahrungen die restaurierte Fläche selbst unter günstigen Bedingungen nur etwa ein Fünftel so groß wie veranschlagt. Kleinere Probeumleitungen vor einem Jahrzehnt oder früher hätten sogar überhaupt keinen positiven Effekt gezeigt. »Diese Leute verschwenden womöglich eine Menge Ressourcen für Projekte, die nachweislich nichts bringen«, warnt Turner.

Mit dieser Einschätzung ist er zwar in der Minderheit. Eines zeigen bisherige Erfahrungen aber in der Tat: Es kommt entscheidend auf die richtige Art und Menge des Sediments an. Das Wax Lake Delta ruht auf einer 20 bis 40 Zentimeter dicken Schicht aus sandigen, mineralhaltigen Ablagerungen,

die typischerweise aus tiefen Einschnitten in einen Flussdeich stammen. Aus flacheren Kerben würden nur feiner gekörnte organische Sedimente umgeleitet, die der nächste Hurrikan leicht fortspülen könnte. Erschwerend kommt hinzu, dass der Mississippi mit Nährstoffen von den Farmen im Mittleren Westen belastet ist. Dadurch können sich Pflanzen im neu geschaffenen Schwemmland ansiedeln, ohne tiefe Wurzeln auszubilden, die den Boden festhalten. Auch das macht ihn anfälliger gegenüber Stürmen. Aus diesem Grund plädieren Turner und Gleichgesinnte für eine Alternative zu den Umleitungen: Sie wollen die Kanäle, die Ölkonzerne einst als künstliche Wasserwege durch die Marsch angelegt haben, um Bohrgerät und anderes Material zu befördern sowie Pipelines zu verlegen, wieder mit dem ausgebaggerten Material füllen. Das soll den Zutritt von Meerwasser hemmen, damit es die Pflanzen weniger beeinträchtigt.

Ob massive Sediment-Umverteilungen das probate Mittel oder von vornherein zum Scheitern verurteilt sind, ist laut Cochran »eine heiß debattierte Frage mit guten Argumenten auf beiden Seiten«. In jedem Fall aber wird die Zeit knapp. Die meisten Forscher sind sich einig, dass umgehend Maßnahmen zu ergreifen sind; denn schon bald könnte es kaum noch Feuchtgebiete geben, die sich retten ließen. Und je später man anfängt, desto geringer ist die Chance, aus Fehlern zu lernen oder sie zu korrigieren.

Nur eine etwas dickere Tonschicht im Untergrund machte in Zedlers winzigen Feuchtgebiet-Parzellen in Wisconsin den Unterschied zwischen Erfolg und Fehlschlag. Von solchen Details werden auch die Ergebnisse in Louisiana und bei anderen Renaturierungsprojekten in der Welt abhängen. Doch obwohl die Herausforderungen immer noch gewaltig sind, haben Wissenschaftler nach Ansicht von Zedler heute zumindest sehr viel fundiertere Vorstellungen davon, was zu tun ist. »Wir müssen es einfach weiter versuchen, auch wenn wir die Uhr nicht zurückdrehen können«, erklärt sie. Und ihre entschlossene Miene unterstreicht, wie ernst es ihr ist. ~

DER AUTOR



John Carey war lange Jahre Korrespondent der »Business Week« und ist heute freiberuflicher Journalist mit Schwerpunkt auf Energie- und Umweltthemen.

QUELLEN

Mitsch, W.J. et al.: Creating Wetlands: Primary Succession, Water Quality Changes, and Self-Design over 15 Years. In: *BioScience* 62, S. 237–250, 2012

Mitsch, W.J.: Wetland Creation and Restoration. In: Levin, S. (Hg.): *Encyclopedia of Biodiversity*. Academic Press, Amsterdam 2013

Moreno-Mateos, D. et al.: Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems. In: *PLOS Biology* 10, e1001247, 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281880



www.mail-order-kaiser.de

Auf den Spuren des Lebens
 DVD (9-3022-4) **19.99**
 Was Darwin nicht wusste: Ist eine Handvoll Gene für die ganze Vielfalt des Lebens auf dem Planeten Erde verantwortlich? Von einfachen Organismen bis zu hoch komplexen Arten wie dem Menschen? Es zeigt sich, dass tatsächlich einige uralte, scheinbar unsterbliche Gene im Zusammenspiel mit Impulsgebern das Geheimnis bergen, wie die Evolution immer neue Lebensformen hervorbringt. Dokumentation. Ca. 98 Minuten.

Levitron Ultimate Schwebender Magnet-Kreisel
 (9-3881-3) **statt 79.- nur 49.95**
 Eigentlich ist es ja unmöglich, einen Körper allein mit Hilfe von Permanent-Magneten zum Schweben zu bringen. Eine der wenigen Ausnahmen betreffen rotierende Körper. Fordern Sie die Schwerkraft zum Duell und lassen Sie den Levitron bis zu 5 Minuten frei schweben! Der Kreisel wird auf einer Platte, die auf der Basis liegt, in Drehung versetzt. Hebt man nun die Platte langsam hoch, wird sich der Kreisel in einigen Zentimetern Höhe über der Basis von der Platte lösen und schwebt dann mehrere Minuten lang völlig frei über der Basis. Mit starker Neodymium- Magnet-Platte (ca. 16 x 16 cm), Metallkreisel mit Gewichten, verschiedenen Kunststoffplatten und einer Schritt-für-Schritt-Anleitung. Gewicht: ca. 1 kg.

Arthur I. Miller: 137 C. G. Jung, Wolfgang Pauli und die Suche nach der kosmischen Zahl
 (9-3831-0) **statt 22.99 nur 7.95**
 Gibt es eine Zahl, von der alles im Universum abhängt und die alles erklärt – eine Urzahl? Die Suche nach einer solchen Zahl hat schon viele beschäftigt, Physiker wie Mystiker. Und sie verband zwei große Denker des 20. Jahrhunderts, den Psychologen und Schöpfer der Archetypenlehre C. G. Jung und Wolfgang Pauli, den bedeutenden Physiker und Nobelpreisträger. Fasziniert von den Arbeitsgebieten des jeweils anderen gingen sie gemeinsam der Frage nach, ob die Zahl 137 die gesuchte kosmische Zahl sein könne. In einer spannenden Doppelbiografie erzählt Arthur I. Miller die Geschichte einer ungewöhnlichen Freundschaft, die sich um die Faszination der Zahlen und das geheimnisvolle Grenzgebiet zwischen der Physik und der Psychologie des Unbewussten drehte. (R) 411 S., Abb., Format 13 x 21 cm, geb.

Die klassische Eier-Uhr- PiepEi Klassik
 (9-3667-9) **19.99**
 Damit wird Eierkochen leicht gemacht: Das PiepEi ist eine präzise Eieruhr, die zusammen mit den Frühstückseiern gekocht wird. Haben die Eier den gewünschten Härtegrad erreicht, spielt PiepEi eine Melodie. Die Eieruhr wird zusammen mit den Hühnereiern aufbewahrt (auch im Kühlschrank), damit es die gleiche Ausgangstemperatur hat. Die Batterie des PiepEis hat eine Lebensdauer von mindestens 2 Jahren – ein Austausch ist aus lebensmittelrechtlichen Gründen nicht möglich. Melodien: Grieg, Morgenstimmung: für ‚Weicheier‘ – Boccherini, Menuett: für mittelweiche Eier – Mozart, Eine kleine Nachtmusik: für harte Eier.

Marc Abrahams: Warum Denken wehtun kann ... und andere unfassbare Erkenntnisse der Wissenschaft
 (9-3876-2) **9.99**
 Welches ist der mathematisch beste Weg, um ein Schinkensandwich durchzuschneiden? Kann man mit dem rechten oder dem linken Ohr besser Lügen erkennen? Und wie wirken sich Mobiltelefone auf Kaninchensex aus? Marc Abrahams hat die bizarrsten, brilliantesten und lustigsten Studien aus der internationalen Forschung zusammengetragen. Sein humorvoller Rundgang durch die Welt der Wissenschaft und ihre seltsamsten Entdeckungen begeistert mit typisch britischem Witz. (Tb) 446 Seiten.

Walter Schmidt Dicker Hals und Kalte Füße
 Eine heitere Einführung in die Psychosomatik
 (9-3911-0) **statt 19.99 nur 6.95**
 Zahlreiche Redensarten beschäftigen sich mit den körperlichen Auswirkungen seelischer Erkrankungen. Walter Schmidt hat diese Volksmund-Weisheiten unter die Lupe genommen und kommt zu überraschenden Erkenntnissen, was Sinn und Wahrheitsgehalt angeht. Ein amüsantes und informatives Buch. (R) 224 S., 13 x 21 cm, geb.

Joseph Haydn Sämtliche Sinfonien
 (9-3909-0) **37 CDs 49.90**
 Dieses hochwertige Set ist die einzige Neuaufnahme der kompletten Haydn-Sinfonien sowie die weltweit einzige erhältliche Edition in volldigitaler Qualität. Von 1998 bis zum Haydn-Jahr 2009 hat das Stuttgarter Kammerorchester unter der Leitung von Dennis Russell Davies sämtliche 107 Sinfonien aufgeführt und neu eingespielt. Das Stuttgarter Kammerorchester ist das älteste und renommierteste Ensemble seiner Art und nimmt seit über 60 Jahren einen herausragenden Platz in der internationalen Orchesterlandschaft ein. 2008 wurde das Orchester ausgezeichnet mit dem Europäischen Kammermusikpreis.

Karl Blossfeldt: Die kompletten Werke
 (9-3650-2) **statt 29.99 nur 14.99**
 Die Pflanzenbilder des deutschen Fotopioniers Karl Blossfeldt (1865–1932) sind von einer solchen Schönheit und Originalität, dass sie das Medium der Fotografie transzendieren. Über 30 Jahre lang nahm Blossfeldt Tausende von Fotos auf, in einer rigorosen Formensprache, die die Bildproduktion des 19. Jahrhunderts ins 20. Jahrhundert überführte und der eigentlich zweidimensionalen Kunstform eine geradezu skulpturale Qualität verlieh. Diese Bilder faszinieren bis heute. In diesem Band sind sämtliche Bilder versammelt. (SA) 544 S., durchg. s/w-Fotos, 14 x 20 cm, geb.

Gustav Freytag Bilder aus der deutschen Vergangenheit
 (9-3870-5) **3 Bände statt 245.- nur 29.95**
 Gustav Freytag ist den meisten Lesern durch seinen Roman Soll und Haben bekannt. Er war Kulturhistoriker und Schriftsteller und verbrachte einen Teil seines Lebens in Leipzig und Breslau. Viele seiner Schriften sind heute fast vergessen. Sein geschichtliches Hauptwerk allerdings trotzte der Zeit. Die Bilder aus der deutschen Vergangenheit, in dem Freytag die deutsche Geschichte anhand von ausgewählten Quellentexten schildert, gilt als eines der schönsten und beliebtesten deutschen Geschichtswerke des 19. Jahrhunderts. Dieses Werk erfuhr seit seinem Erscheinen im Jahr 1859-1867 etwa dreißig Auflagen. (SA) 2.048 S., 12,5 x 18,5 cm, geb. mit Fadenheftung.

Solar-Spinne Tarantula (9-3883-9) **9.99**
 Wenn die Sonne auf den Rücken dieser Spinne scheint, beginnt diese sich zu bewegen. **Stromversorgung über Solarenergie - keine Batterie erforderlich!**

BÜCHER • FILME • MUSIK
MAIL:ORDER:KAISER
 Mail:Order:Kaiser www.mail-order-kaiser.de
 80791 München
 Telefon: 0180/5 34 17 34* (rund um die Uhr)
 Fax: 0180/5 33 33 23*
 E-Mail: kaiser@mokm.de

Name, Vorname _____
 Straße _____
 PLZ/Ort _____
 Datum / Unterschrift _____ ZK144

Stück (9) Bestellnummer/Titel

Lieferung bequem per Rechnung (Bemittelt vorausgesetzt)
 Versandkostenanteil: 4.95 € (in Deutschland)
 Alle Preise in Euro inkl. MwSt. und zzgl. Versandkosten

Volles Rückgaberecht für 14 Tage

0,14€/Min. aus dem Festnetz, Mobilfunk max. 0,42€/Min.

Drucken in drei Dimensionen

Ein Objekt durch schrittweises Hinzufügen von Material herstellen: Das ist das allgemeine Prinzip des 3-D-Drucks. Solche Techniken entwickeln sich derzeit rasch, haben gewisse Branchen bereits komplett erobert und werden zunehmend auch für Privatpersonen interessant.

Von Mathilde Berchon

Heute haben sich überraschend 15 Gäste zum Abendessen angesagt, aber Ihr gutes Geschirr reicht nur für zwölf Personen. Kein Grund zur Panik! Sie setzen sich vor Ihren Computer und suchen die Musterdateien für Ihre Bestecke, Teller und Gläser heraus. Dann schalten Sie Ihren 3-D-Drucker ein, vergewissern sich, dass er am Computer angeschlossen ist und die Vorratsbehälter gefüllt sind. Ein letzter Mausklick, und einige Minuten später erscheint das benötigte Geschirr, fabrikneu glänzend, im Ausgabebehälter des Druckers.

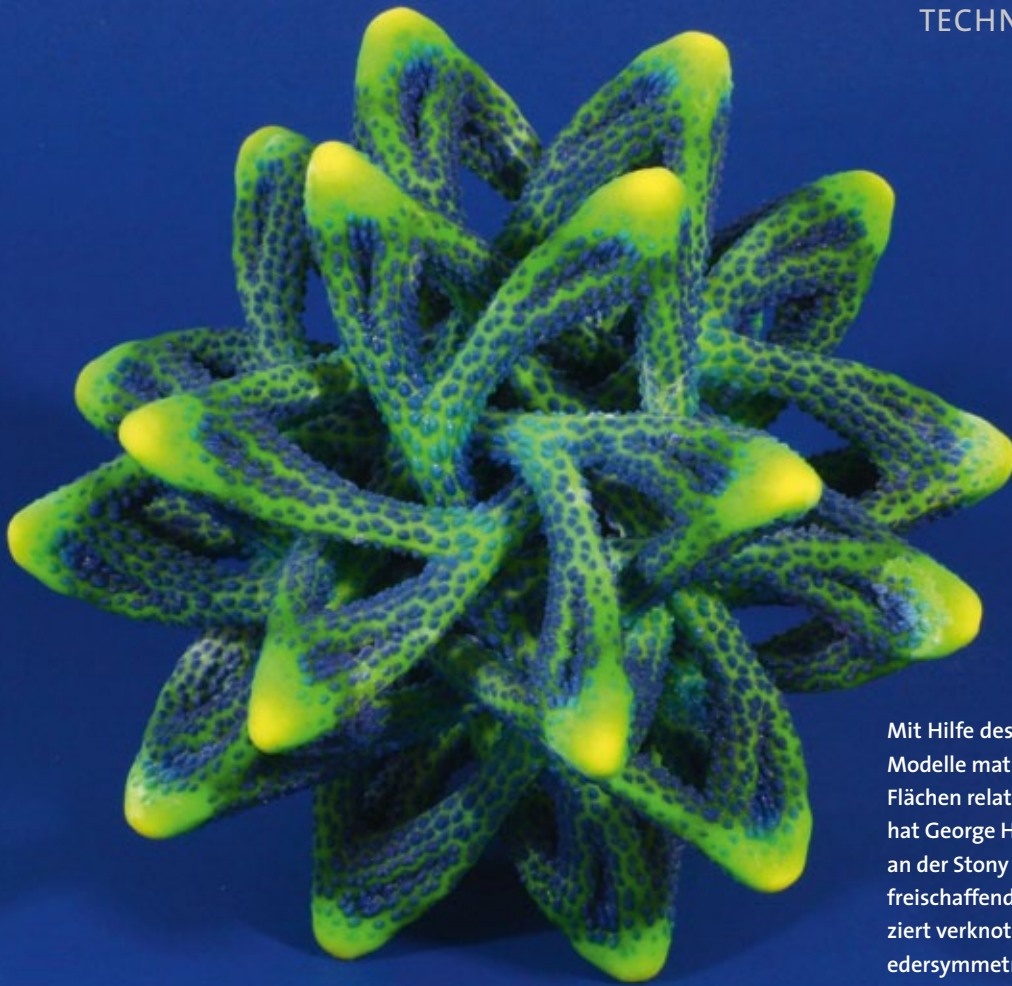
AUF EINEN BLICK

ADDITIVE HERSTELLUNGSVERFAHREN

- 1** Der **3-D-Druck** ist eine Fabrikationstechnik, bei der Schicht um Schicht Material aufgetragen wird.
- 2** Vor etwa 30 Jahren entstanden, findet er heute in vielen Bereichen Verwendung und hat den **privaten Sektor** erreicht.
- 3** Die neue Technik wirft neue Fragen zum **Urheberrecht an einem materiellen Gegenstand** auf.
- 4** In Zukunft könnte dank ihr die Massenproduktion einer **Massenpersonalisierung** weichen.

Utopische Idee für eine ferne Zukunft? Nicht wirklich. Seit einigen Jahren nimmt das Herstellen von Gegenständen durch dreidimensionales (3-D-)Drucken einen derartigen Aufschwung, dass viele schon von einer neuen industriellen Revolution sprechen. In den 1980er Jahren entstanden, fand die Technik zunächst nur Anwendung in gewissen Nischen, namentlich bei der Produktion von Prototypen für die Industrie; daher auch der frühere Name »rapid prototyping« (schnelle Prototypherstellung). Mittlerweile wird sie jedoch für immer mehr Akteure attraktiv, bis in den privaten Bereich. Zu den neuen Nutzern zählen Architekten, Schmuckhersteller, Künstler und Designer, Mediziner, Lehrer und insbesondere Wissenschaftler (Kasten S. 89).

Das amerikanische Consulting-Büro Wohlers Associates schätzt den weltweiten Umsatz der Branche auf etwa zwei Milliarden Euro. Zwischen 2008 und 2011 hat sich die Zahl der verkauften 3-D-Drucker für den persönlichen Gebrauch mehr als verdreifacht. Privatpersonen haben 2013 mehr als 55 000 Geräte erworben, eine Steigerung von 49 Prozent gegenüber 2012. Große Unternehmen entdecken das Marktsegment für sich. So hat Microsoft im August 2013 angekündigt, dass sein Betriebssystem Windows 8 Dateien für den 3-D-Druck unterstützen wird; die Transportfirma UPS bietet in ausgewählten Annahmestellen einen 3-D-Druckservice



Mit Hilfe des 3-D-Drucks lassen sich Modelle mathematisch definierter Flächen relativ leicht realisieren. Hier hat George Hart, Mathematikprofessor an der Stony Brook University und freischaffender Künstler, eine kompliziert verknotete Struktur mit Icosaedersymmetrie in Farben gedruckt, die an Plankton denken lassen.

GEORGE HART (WWW.GEORGEHART.COM)

an, ebenso der französische Bürowarengroßhändler Top Office; der Onlinehändler Amazon hat 3-D-Drucker und Zubehör schon in sein Sortiment aufgenommen.

Scheibchenweise Fabrikation ohne Materialverlust

Wie funktioniert der 3-D-Druck? Wo liegen seine Möglichkeiten und Grenzen? Wozu wird er heute angewandt? Und wie wird er die Welt verändern?

Viele klassische Herstellungsverfahren sind subtraktiv: Man formt ein Bauteil, indem man von einem Stück Rohmaterial etwas wegnimmt, zum Beispiel durch Sägen, Bohren, Fräsen oder Schleifen. Im Gegensatz dazu ist der 3-D-Druck ein additives Verfahren. Der Gegenstand entsteht durch Hinzufügen, Schicht für Schicht. Ein Druckerkopf bringt das Material – Kunststoff, Metall oder sogar Sand – in flüssiger oder feinkörniger Form auf bestimmte Stellen einer Oberfläche und bildet dadurch eine »Scheibe« des herzustellenden Gegenstands. Dann wird die Fläche ein Stück abgesenkt oder der Druckerkopf angehoben, und die nächste Schicht entsteht. Diese Technik hat zwei offensichtliche Vorteile: Es gibt keine Materialverluste durch Verschnitt und Sägespäne, und sie erlaubt Formen, die den normalen Verfahren der Massenproduktion unzugänglich sind.

Es gibt im Wesentlichen drei Techniken für den 3-D-Druck mit verschiedenen Stärken und Schwächen und jeweils zahlreichen Varianten (Kasten S. 86/87). Sie unterscheiden sich vor allem in der Art des Materials, das sie verarbeiten, der Arbeitsgeschwindigkeit und der Präzision.

Für den Hausgebrauch eignet sich am ehesten die einfachste Methode, die Schmelzschichtung (»fused deposition modeling«, FDM). Viele Geräte mit dieser Technik werden sogar als Bausätze angeboten. Eine Heißdüse deponiert flüssigen Kunststoff – Acrylnitril-Butadien oder Polylactid, ein Polymer der Milchsäure – auf dem heranwachsenden Werkstück, wo er beim Kontakt erstarrt. Indem die Düse horizontal über das Werkstück wandert, erzeugt sie eine ganze Schicht. Durch vertikale Verschiebung der Düse oder des anwachsenden Objekts geht die Maschine zur nächsten Schicht über und so weiter, bis die Herstellung beendet ist. Der wesentliche Nachteil der Schmelzschichtung ist die geringe Präzision; aber die Geräte sind klein, kostengünstig, einfach zu handhaben und wartungsfreundlich.

Dieses Verfahren, das ursprünglich das amerikanische Unternehmen Stratasys zum Patent angemeldet hat, ist vor allem durch die Bewegung »Open Source Hardware« populär geworden. Im Jahr 2005 erdachte der Ingenieur und Mathematiker Adrian Bowyer von der University of Bath (Groß-

britannien) einen Drucker mit Schmelzschtichtung, der sich selbst – zumindest teilweise – reproduzieren konnte, weil er zu einem großen Teil aus gedruckten Einzelteilen bestand. In der Folge entwickelte Bowyer »RepRap Darwin«, den ersten 3-D-Drucker, der dem Prinzip »open source« unterliegt. Die gesamte technische Dokumentation einschließlich der Software zum Drucken der Einzelteile ist im Internet frei zugänglich und unter der allgemeinen öffentlichen Lizenz GNU verfügbar. Ähnlich wie bei Open-Source-Software darf also jedermann diese Anleitung anwenden, vervielfältigen, modifizieren und sogar gewerblich nutzen.

Bausatz für Heimwerker und Kreative

Als bald scharte sich eine riesige internationale Gemeinschaft von begeisterten Anhängern um das Projekt RepRap; die Abkürzung steht für »replicating rapid prototyper« (sich vermehrender 3-D-Drucker). Mittlerweile gibt es Hunderte von höher entwickelten Versionen. Eine der populärsten ist der RepRap Prusa Mendel, der nach seinem tschechischen Erfinder Josef Průša benannt ist.

Das Projekt RepRap trieb zahlreiche, auch kommerzielle Blüten. So entwickelte eine Gruppe von Freunden 2009 in New York ihren RepRap zu einer Variante namens MakerBot Cupcake weiter und beschloss, diese als Bausatz zu verkaufen. Das Gerät hatte einen Riesenerfolg bei Ingenieuren, avancierten Heimwerkern und Kreativen. So entstand das Unter-

nehmen MakerBot, das später mit Stratasys fusionierte, und damit auch die Idee vom 3-D-Drucker in jedem Haushalt.

Was ein Druckerkopf auf eine Oberfläche aufträgt, muss nicht unbedingt Kunststoff sein. Es funktioniert auch mit lebenden Zellen. Die Geräte der kalifornischen Gesellschaft Organo drucken auf diese Weise menschliches Gewebe für Zwecke der Pharmaforschung. An die Stelle des Druckkopfs tritt eine sich horizontal bewegende Spritze; das Gel, in das die Zellen eingebettet werden, wird gleich mitgedruckt.

Mit analogen Methoden hat das Wake Forest Institute for Regenerative Medicine in Winston-Salem (North Carolina) Prototypen einer Niere, eines Ohrs und eines Handknochens geschaffen. Diese Organe sind jedoch bislang nicht funktionsfähig: Die Präzision reicht noch nicht aus, um hinreichend dünne Blutgefäße zu drucken.

Füllt man an Stelle lebender Zellen etwa Pizzateig, geschmolzenen Käse oder Schokolade in die computergesteuerte Spritze, so gelingen bereits jetzt – Schicht für Schicht – die extravagantesten kulinarischen Kreationen; und dafür genügt eine Genauigkeit im Millimeterbereich vollkommen.

Bei der zweiten Gruppe von 3-D-Drucktechniken trägt die Maschine das Material in flüssiger Form auf und härtet es gezielt an den vorgesehenen Stellen aus. Das geschieht bei der ältesten und zugleich präzisesten Technik, der Stereolithografie, indem ein ultravioletter Laserstrahl eine flüssige lichtempfindliche Substanz polymerisiert. Der amerikanische

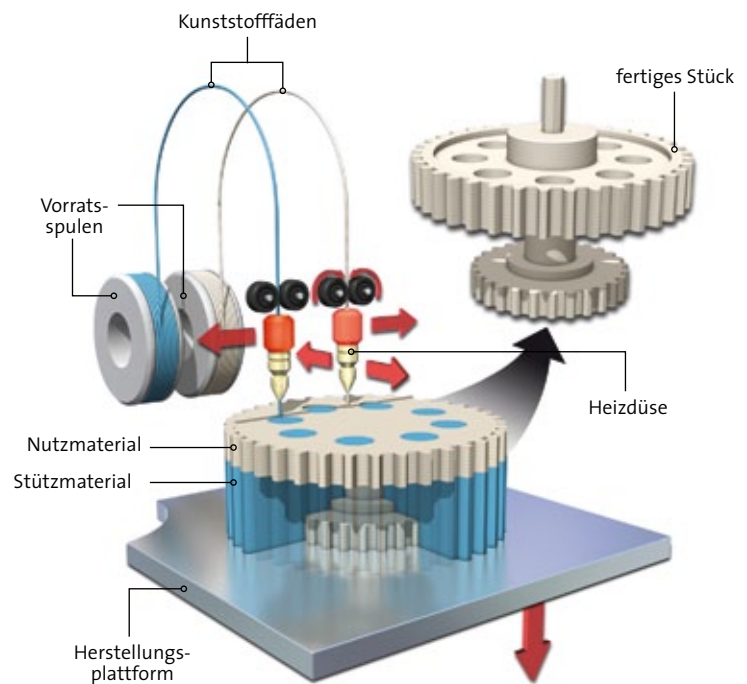
Drei Wege zum begehrten Objekt

Die aktuellen Techniken lassen sich in drei Hauptfamilien einteilen, von denen jede auf einem anderen Prinzip beruht. In allen Fällen wird das Objekt Schicht für Schicht erzeugt.

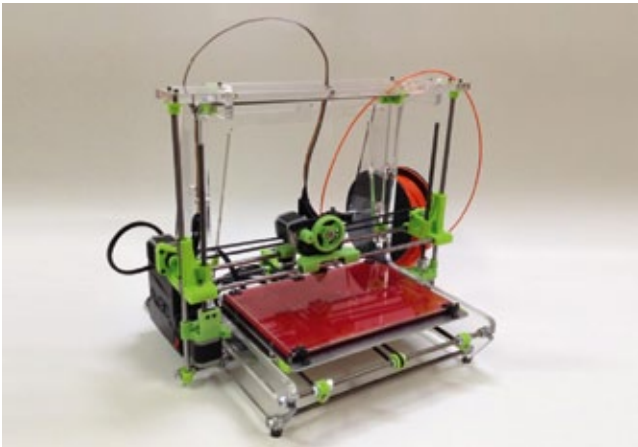
Bei der Schmelzschtichtungsmethode (1) führt ein computergesteuertes Räderwerk einen Kunststofffaden einem Heizkopf zu. Der schmilzt das Material, presst es durch eine Düse, die enger ist als die ursprüngliche Fadendicke, und deponiert es auf dem Träger, wo es erstarrt. Durch horizontale Bewegung, gleichsam Schraffieren, erzeugt die Heizdüse eine komplette Schicht des herzustellenden Objekts. Danach wird der Träger um eine Schichtdicke abgesenkt oder der Heizkopf samt Düse entsprechend angehoben, und die nächste Schicht entsteht. Neben dem eigentlichen Werkstück deponiert bei Bedarf eine weitere Düse Stützmaterial, das später weggeworfen wird, damit Material, das sonst »in der Luft hängen« würde, eine Unterlage hat.

Bei der Photopolymerisation (2) fällt ein computergesteuerter Lichtstrahl auf eine Schicht aus flüssigem Kunstharz. An den belichteten Stellen polymerisiert das Material und härtet dadurch aus. Nachdem eine Schicht fertig gestellt ist, wird der Träger abgesenkt; flüssiges Kunstharz strömt auf

1 SCHMELZSCHICHTUNG



das anwachsende Bauteil und wird in manchen Fällen durch eine spezielle Vorrichtung gleichmäßig verteilt.



AIRWOLF 3D



OBJET / STRATOSYS LTD

Die heute auf dem Markt angebotenen 3-D-Drucker reichen von Heimgeräten mit dem Schmelzschichtungsverfahren (links) zu Preisen von einigen hundert Euro bis zu den viel teureren, aber auch leistungsstärkeren industriellen Druckern (rechts).

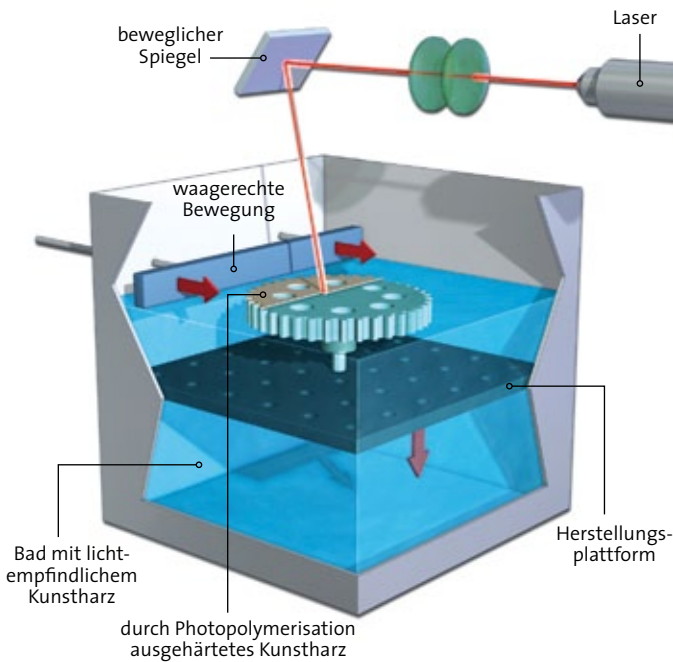
Ingenieur Chuck Hulls, der das Verfahren 1984 zum Patent anmeldete, ist heute Chef von 3D Systems, dem weltweit größten Unternehmen der Branche.

Von diesem Verfahren gibt es zahlreiche Varianten. Beim Digital Light Processing (DLP) lenkt ein Mikrochip mit Hilfe sehr vieler mikroskopischer, einzeln kippbarer Spiegel auf seiner Oberfläche das Laserlicht auf die Flüssigkeitsschicht;

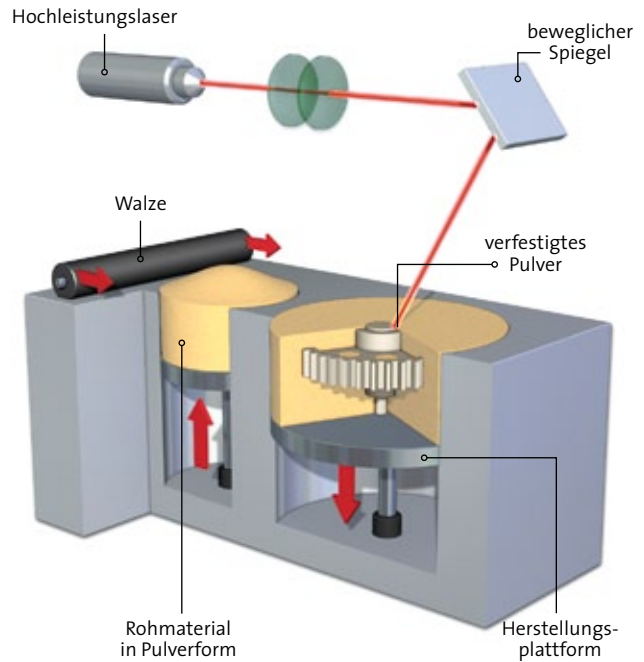
dieselbe Technik wird für lichtstarke Projektoren genutzt (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 108). Mit diesem Verfahren arbeitet vornehmlich das deutsche Unternehmen EnvisionTEC, dessen Drucke für ihre hohe Genauigkeit (Schichtdicken von 15 Mikrometern) berühmt sind.

Eine dritte Technik namens PolyJet funktioniert nach dem Prinzip des Tintenstrahldruckers. Sie wurde von dem israeli-

2 PHOTOPOLYMERISATION



3 LASERSINTERN



Bei den Lasersinter-Verfahren (3) verschmilzt ein starker, gezielter Laserstrahl Pulverpartikel an den getroffenen Stellen. Jede neue

Pulverschicht wird durch eine Walze gleichmäßig auf dem anwachsenden Stück verteilt.

BRUNO BOURGEOIS (WWW.WEBZINNOGRAPHIE.FR)



Neben dem Erstellen von Prototypen für die Industrie findet der 3-D-Druck Anwendung in der Architektur (a, ein Brückenmodell), in Forschung und Lehre (b, ein Modell des Moleküls Porin), Medizin (c, ein Unterkiefer,

schen Unternehmen Objet entwickelt, das 2012 mit dem amerikanischen Stratasys, dem anderen Giganten des 3-D-Drucks, fusioniert hat. Ein PolyJet-Drucker kann in einem einzigen Arbeitsgang mehrere Kunststoffsorten zugleich drucken. Das fertige Objekt enthält dann nebeneinander Bereiche unterschiedlicher Härte, Biegsamkeit, Durchsichtigkeit oder Wärmebeständigkeit.

Die Qualität eines 3-D-Drucks bemisst sich im Wesentlichen nach der horizontalen und der vertikalen Auflösung. Erstere wird in der Regel in »dots per inch« (dpi, Punkte pro Zoll) angegeben und bezeichnet wie beim gewöhnlichen Druck auf Papier die Anzahl an Materiepartikeln, welche die Maschine auf der Länge 1 Zoll (2,54 Zentimeter) aneinanderreihen kann. Die vertikale Auflösung ist die Schichtdicke, gemessen in Mikro- oder Millimetern.

Techniken der Stereolithografie wie DLP und PolyJet erreichen Auflösungen in der Größenordnung von zehn Mikrometern oder sogar noch darunter. Prototypen dieser Qualität erfüllen die hohen Anforderungen der Ingenieure und Industriedesigner. Sie finden daher in Designstudios ebenso Verwendung wie in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen großer Konsumgüterhersteller wie Nike und Adidas.

Manche Branchen hat die Photopolymerisation komplett erobert, insbesondere die Herstellung von Zahnprothesen, Luxus schmuck und Hörhilfen (siehe den folgenden Artikel). Eigens für diese Zwecke entwickelte Drucker können schnell und mit großer Präzision Modelle nach Maß in Kunstharz oder als verlorene Gussform aus Wachs fertigen. Filmstudios produzieren spezielle Requisiten mit PolyJet. So wurde das Kostüm von »Iron Man« nach den Maßen des Schauspielers Robert Downey jr. in Harz gedruckt und dann angemalt, damit ein realistischer metallischer Eindruck entsteht (Bild oben, d).

Stereolithografiedrucker haben weit mehr Einsatzmöglichkeiten als die Schmelzschichtungsgeräte, sind aber auch teurer, sowohl in der Anschaffung als auch in den Rohmate-

rialien. Inzwischen mischen zahlreiche junge Unternehmen den Markt auf; dadurch ist ein kleiner Stereolithografie drucker fürs Büro für weniger als 3000 Euro zu haben. Die Preise für professionelle Geräte liegen jedoch in den Zehnbis Hunderttausendern.

Drucken mit Metall

In der dritten Gruppe der 3-D-Drucktechniken werden Partikel pulverisierter Materie durch Hitzeeinwirkung miteinander verbunden. Beim SLS (selektives Lasersintern) erhitzt ein starker Laserstrahl das Pulver lokal, so dass die Teilchen miteinander verschmelzen. Architekten bevorzugen diese Methode für den Modellbau, Künstler und Designer für komplexe Skulpturen, Textilhersteller für die Maßanfertigung von Hüten und sogar ganzen Kleidungsstücken. Man verwendet das Verfahren auch immer mehr zum Herstellen fertiger Werkstücke wie Gehäuse, Telefonschalen oder Zahnräder.

Lasersinter-Drucker sind recht groß, kosten mehrere hunderttausend Euro und sind daher hauptsächlich in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen großer Unternehmen sowie in speziellen Produktionsstätten zu finden. Es gibt allerdings auch Dienstleister, bei denen man Drucke in Auftrag geben kann.

Der Hauptvorteil der Lasersinter-Technik ist die große Auswahl an Materialien. Im Prinzip eignet sich alles, was in Form eines homogenen Pulvers vorliegen kann.

Am gebräuchlichsten, sowohl für Prototypen als auch für fertige Produkte, ist der Kunststoff Polyamid. Aber im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Methoden kann man mit dem Lasersinter-Verfahren auch Metalle drucken: Titan, Kobalt, Chrom, gewöhnlichen oder rostfreien Stahl, Gold, Silber, Bronze oder Platin. Das erfordert allerdings Strahlung mit deutlich höherer Leistung. Die Technik DMLS (direct metal laser sintering) erreicht Schichtdicken von 20 Mikrometern, indem ein Strahlenbündel von 200 Watt Leistung die Pulverschicht überstreicht.



der einem 83-jährigen Patienten implantiert wurde), der Filmindustrie (d, ein Teil der maßgefertigten Rüstung von »Iron Man«) sowie in der Schmuckherstellung, beim Zahnersatz sowie auf vielen anderen Gebieten.

Das Verfahren E-Beam (electron beam melting) der schwedischen Firma Arcam verschmilzt das Pulver bei Temperaturen zwischen 700 und 1000 Grad mit einem Elektronenstrahl in einer Vakuumkammer. Die NASA entwickelt eine Variante namens EBF oder EBDM (electron beam direct manufacturing) für den 3-D-Druck von Metallen unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit.

Bei diesen Techniken kann das nicht verschmolzene Pulver zumindest teilweise wiederverwendet werden – ein we-

sentlicher Vorteil vor allem bei teuren Metallen. So lässt das Unternehmen Boeing bestimmte Teile seiner Flugzeugturbinen drucken und erzielt damit eine beträchtliche Kostenersparnis. Das Metall Titan ist wegen seiner (erwünschten) Härte so schwer zu bearbeiten, dass man bisher das Turbinenteil aus ungefähr zehn Komponenten zusammensetzte, die jedes für sich mit Spezialwerkzeugen herzustellen waren. Der 3-D-Drucker fertigt das Teil in einem Stück. Darüber hinaus konnte Boeing die neuen Freiheiten des Verfahrens

3-D-Druck im Dienst der Wissenschaft

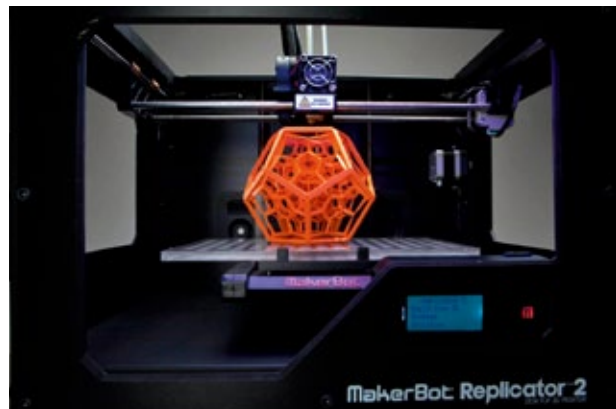
Ein **Forschungslabor** benötigt eine Fülle von Einzelteilen, die nur in kleinen Mengen hergestellt werden und dementsprechend teuer sind. Im 3-D-Druck gefertigt, wären solche Teile nicht nur günstiger zu haben, sondern könnten auch besser an die spezielle Anwendung angepasst werden.

Zu den Pionieren dieser Idee gehört Jonathan Eisen. Das von ihm geleitete Labor für Biologie an der University of California in Davis schaffte sich für etwa 1500 Dollar einen 3-D-Drucker an und macht sich jetzt seine Plastikkämme für die Elektrophorese selbst – zu Materialkosten von 0,21 Cent für ein Stück, das im Handel 51 Dollar kostet.

Joshua Pearce, Werkstoffwissenschaftler an der Michigan Technological University, setzt sich dafür ein, dass die zugehörigen Druckdateien ebenso frei zugänglich sein sollen, wie das bei wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Software zunehmend üblich ist (»open source«). Seiner Meinung nach liegt eine Bewegung für Open-Source-Hardware im ureigensten Interesse der Wissenschaftler. Als bereits erfolgreiche Beispiele zitiert er das Projekt RepRap für 3-D-Drucker, das für die Allgemeinheit offene Internetprojekt Arduino, das elektronische Mikrocontroller entwickelt, sowie vor allem den »Thingiverse«-Katalog. Dort finden sich frei nutzbare 3-D-Dateien, unter anderem zur Her-

stellung von Einzelteilen für optische Experimente wie Linsenfassungen. Die Kosten können dabei um den Faktor 30 sinken.

Schließlich kann der 3-D-Druck auch die geistige Arbeit erleichtern. So hilft es der Erkenntnis erheblich auf, wenn man die dreidimensionale Projektion eines vierdimensionalen platonischen Körpers (hier des 120-Zells) nicht nur auf dem (zweidimensionalen) Bildschirm betrachten, sondern in der Hand halten kann (Bild unten).



nutzen, um dem Bauteil eine optimierte und verbrauchsgünstigere Form zu geben.

Wie der Architekt sein Modell, so druckt die Baufirma das echte Gebäude – jedenfalls in Ansätzen. Der italienische Ingenieur Enrico Dini hat das Verfahren D-Shape erfunden, mit dem man Sand- oder Betonpartikel in sehr großen Anlagen zu ganzen Gebäudeteilen verbindet.

Eine weitere Technik namens 3DP (3D printing) ist am MIT entwickelt und 1995 an verschiedene Unternehmen lizenziert worden. Die Pulverteilchen eines Verbundwerkstoffs werden nicht verschmolzen, sondern durch gezielt aufgebraute mikroskopisch kleine Klebstofftröpfchen miteinander verbunden. Das Verfahren hat mit mehreren Zentimetern pro Stunde in vertikaler Richtung eine der höchsten Druckgeschwindigkeiten auf dem Markt und zusätzlich die Möglichkeit, farbig zu drucken; die Spitzenmodelle bieten mehr als 390 000 Farben. Allerdings haben die erzeugten Objekte eine etwas sandige Oberfläche und sind zerbrechlich – schön anzuschauen als Demonstrationsmodelle, für wissenschaftliche Präsentationen oder als Nippes für die Fensterbank, aber eher ungeeignet für den alltäglichen Gebrauch.

Vor allem wegen der rapide fallenden Preise findet der 3-D-Druck auch bei Privatpersonen zunehmende Verbreitung. Heute bekommt man einen 3-D-Drucker schon für ungefähr 300 Euro. Der ist zwar verglichen mit den professionellen Geräten ziemlich schwachbrüstig, aber für die rasche Produktion kleiner Kunststoffteile reicht es allemal.

Die nächste Preissenkungswelle ist bereits in Sicht. Über Crowdfunding-Sites wie Kickstarter, IndieGogo und KissKiss-BankBank stimmen die Nutzer online über neue Druckerprojekte ab und stellen deren Anschubfinanzierung bereit. In diesem Rahmen will der kanadische Ingenieur Rylan Grayston einen 3-D-Drucker namens »Peachy« für 100 Dollar (80 Euro) in den Handel bringen. Bei dieser originellen Variante der Stereolithografie errechnet der Computer aus der 3-D-Datei des Objekts ein akustisches Signal und steuert damit den Laserstrahl.

Wie bei den Computern ist auch bei den 3-D-Druckern die Gerätetechnik (die »Hardware«) nur die eine Seite der Me-

daille. Das größte Hindernis, das einer massenhaften Nutzung der neuen Techniken im Weg steht, ist das Softwareproblem: Wie gewinnt man zu einem – real existierenden oder ausgedachten – Gegenstand eine Beschreibung in Form einer Datei (eines »3-D-Modells«), die der Drucker in das Objekt umsetzen kann?

Als Quasi-Standard für solche Dateien hat sich das Dateiformat STL (Standard Tessellation Language) durchgesetzt. Es bleibt also die Frage, wie man eine STL-Datei erstellt.

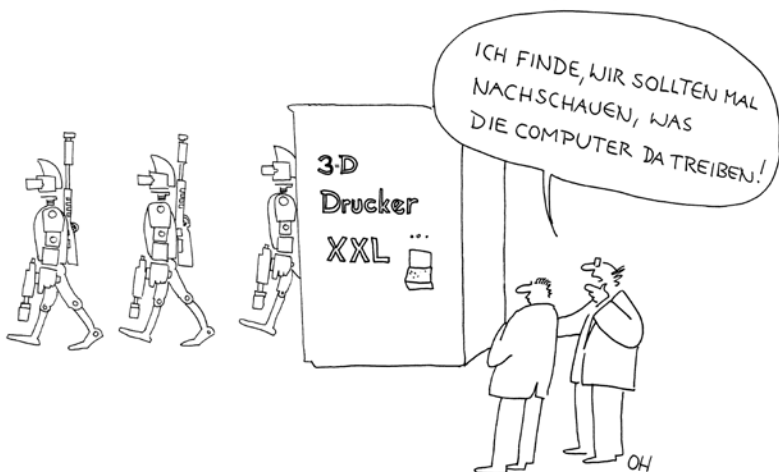
Man kann erstens das Objekt mit Hilfe einer geeigneten Software »von Grund auf« neu konzipieren. Dieses Verfahren bietet die größten Freiheiten, ist allerdings nicht einfach zu beherrschen. Wer sich den Lernaufwand und die Kosten für professionelle Software wie CATIA, SolidWorks oder Blender ersparen will, findet online kostenlose Einfachprogramme wie SketchUp, Tinkercad oder 123D.

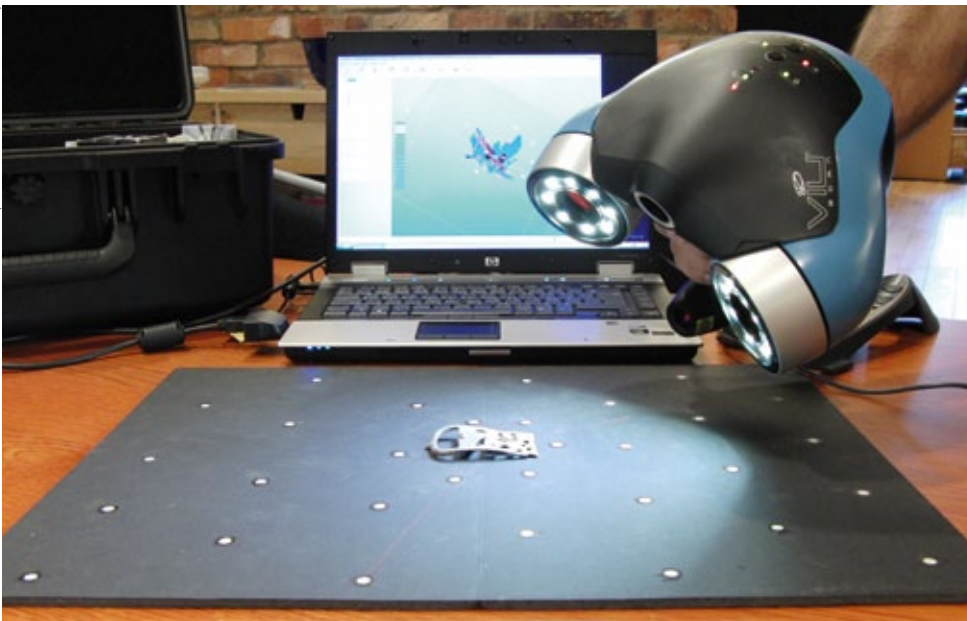
Ein Kopierer für Dinge

Zweitens kann man gewissermaßen den Computer anweisen, sich ein vollständiges Bild von einem bereits existierenden Gegenstand zu machen, indem er sich diesen von allen Seiten anschaut. Dafür gibt es neben teuren, spezialisierten Geräten, den »3-D-Scannern« (Bild rechts), auch günstigere Alternativen. Denn eigentlich braucht der Computer für eine vollständige räumliche Vorstellung nur eine Reihe von Kamerabildern mitsamt der Information, wo die Kamera im Moment der Aufnahme lokalisiert und wie sie ausgerichtet war. Zahlreiche Scanner für den Hausgebrauch verwenden zu diesem Zweck den Bewegungserfasser Kinect, mit dem die Xbox-Spielkonsole von Microsoft ausgerüstet ist. In anderen Projekten arbeitet man an Programmen, welche die Kamera und den Bewegungssensor eines Smartphones oder Tabletcomputers für denselben Zweck einspannen.

Drittens kann man eine bereits existierende 3-D-Datei kopieren und dem eigenen Drucker zuführen. Und die Online-Kataloge für 3-D-Dateien schießen aus dem Boden wie Pilze. Der populärste unter ihnen ist Thingiverse. Er wurde von MakerBot-Stratasys ins Leben gerufen und umfasst Hunderttausende von online abrufbaren 3-D-Dateien für ebenso viele Objekte.

Die Leichtigkeit, mit der ein Gegenstand reproduzierbar ist, wirft eine Fülle juristischer Fragen auf. Wie lässt sich das Urheberrecht desjenigen schützen, der ein Objekt geschaffen oder erfunden hat, wenn jeder es einfach kopieren kann, indem er es abscannt oder sich die zugehörige 3-D-Datei beschafft? Und was ist mit Gegenständen, die man nicht herstellen darf? Der anarchistische junge Amerikaner Cody Wilson erregte großes Aufsehen, als er im Internet die Druckdateien einer kompletten, im Wesentlichen aus Kunststoff bestehenden Feuerwaffe zur Verfügung stellte. Diese Dateien wurden mehr als 400 000-mal heruntergeladen, bevor die amerikanische Regierung ein Verbot aussprach. In welchem Maß darf es freien Verkehr von Objekten und ihren 3-D-Dateien geben? Auf alle diese Fragen gibt es noch keine Antworten, und die juristische Klärung wird ohne Zweifel unter





Ein tragbarer Laserscanner erstellt eine 3-D-Datei von einer mehr als 1000 Jahre alten Wikinger-Gürtelschnalle. Damit lassen sich beliebig viele Kopien dieses antiken Stücks drucken.

erbitterten Kämpfen zwischen den beteiligten Parteien vonstattengehen.

Gleichwohl gibt es auch auf der Hardwareseite noch viel zu tun. Neben allgemeinen Verbesserungen bei der Qualität und dem Preis-Leistungs-Verhältnis arbeitet man vor allem daran, die Palette der Materialien zu erweitern. Kunstharz und der beliebte Kunststoff ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) lassen an Härte und Haltbarkeit eben doch zu wünschen übrig.

Massenpersonalisierung

Die größte Entwicklungsaktivität findet zurzeit beim 3-D-Druck mit Metallen statt. Darüber hinaus experimentieren einige Labors mit dem Druck elektronischer Mikrochips in drei Dimensionen. An der Stanford University hat eine Gruppe von Studenten eine RepRap-Maschine konstruiert, die zusätzlich zum klassischen Kunststoff eine elektrisch leitende Flüssigkeit auftragen kann. Am MIT arbeitet die Forschungsgruppe Mediated Matter unter der Leitung von Neri Oxman unter anderem mit »intelligenten« Materialien, die sich an ihre Umgebung anpassen können. Ein mit ihnen gedrucktes Objekt könnte zum Beispiel unter Einwirkung einer äußeren Kraft härter oder weicher werden – aber jeweils nur an ausgewählten Stellen.

Oxmans Gruppe arbeitet auch daran, die derzeit störendste Schwäche des 3-D-Drucks zu überwinden: die Beschränkung auf kleine Volumina. Die meisten Gegenstände, mit denen wir umgehen, lassen sich nicht in einem Stück drucken, weil sie schlicht zu groß sind. Immerhin kann das deutsche Konstruktionsunternehmen Voxeljet Objekte der Größe 4 mal 2 mal 1 Meter herstellen – ungefähr das Achtefache des derzeitigen Stands der Technik.

Allen Beschränkungen zum Trotz gehört dem 3-D-Druck die Zukunft; so verkünden es jedenfalls die Medien und etliche Protagonisten. Falls sich die Technik weiter wie bisher

verbreitet, wird sie in der Produktions-, der Handels- und der Finanzwelt große Verwerfungen auslösen. Schon heute tun Designer und Ingenieure in der Industrie gut daran, über die bisherigen Grenzen der Fertigungsverfahren hinaus zu denken. Einige sehen in der neuen Technik einen willkommenen Ersatz für die klassische Massenproduktion, die zunehmend aus den westlichen Industrieländern abwandert. Wenn aber erst in jedem Privathaushalt ein 3-D-Drucker steht, dann droht die gesamte herkömmliche Produktionskette aus Hersteller, Transporteur, Groß- und Einzelhändler zusammenzuberechnen oder zumindest extrem vereinfacht zu werden. Privatpersonen würden Schöpfer und Hersteller der sie umgebenden Objekte (siehe auch den folgenden Artikel).

Der 3-D-Druck würde damit die Tür zu einer Welt aufstoßen, in der die Dinge nicht massenhaft, sondern lokal und nach Bedarf durch den Endverbraucher hergestellt werden: Massenpersonalisierung statt Massenproduktion. ~

DIE AUTORIN



Mathilde Berchon arbeitet als Beraterin mit den Spezialgebieten digitale Fabrikation und freikopierbare Hardware. Sie lebt in San Francisco und betreibt die Website MakingSociety.com, die sich an Unternehmer in diesem Bereich richtet.

QUELLEN

- Anderson, C.:** Makers. Das Internet der Dinge: die nächste industrielle Revolution. Hanser, München 2013
- Berchon, M.:** L'impression 3D. Eyrolles, Paris 2013
- Pettis, B. et al.:** Getting Started with MakerBot. O'Reilly, Sebastopol (California) 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/1281881

Eine neue industrielle Revolution?

Theoretisch könnten 3-D-Drucker komplette Produktionsprozesse umkrepeln. In der Praxis reicht ihre Leistungsfähigkeit dafür noch nicht aus. Interessant sind sie vielmehr für völlig neue Marktsegmente.

Von Martin Scheufens

Wer dem Hype um die 3-D-Drucker ganz real auf den Zahn fühlen will, findet im eigenen Mund Gelegenheit dazu. Zahnprothesen, Brücken oder Kronen werden zunehmend mit dieser neuen Technik hergestellt. Auch den in die Ohrmuschel einzusetzenden Teil eines Hörgeräts produziert sie besser und günstiger als jede Konkurrenz. Neben solchen Nischenbereichen haben die »additiven« oder »generativen« Verfahren die Produktentwicklung vieler Branchen massiv verändert (siehe den vorstehenden Artikel).

Christian Weller, der am Lehrstuhl für Technologie- und Innovationsmanagement der RWTH Aachen die ökonomischen Folgen der neuen Technik erforscht, hat deren Vorteile für die Hersteller in vier Grundsätzen zusammengefasst:

- 3-D-Drucker sind universelle Produktionsmaschinen. Sie können im Prinzip jedes Bauteil erstellen und brauchen dafür lediglich das Computermodell.
- Sie ermöglichen eine flexiblere Produktion, da sie nicht mehr an das Produkt angepasst werden müssen; daher können die Betreiber leichter auf Kundenwünsche reagieren.
- Die Verfahren setzen dem Designer keine Grenzen. Komplexe Geometrien kosten nicht mehr als einfache, so dass er die Produkte auf ihre spätere Funktion hin optimieren kann.
- Aufwändige und teure Montageschritte erübrigen sich. Funktionale Bauteile, die früher viel Handarbeit erforderten, lassen sich in einem Stück herstellen.

AUF EINEN BLICK

HERAUSFORDERUNG FÜR UNTERNEHMEN

- 1 3-D-Drucker sind **universelle Maschinen**, die auch neue Konstruktionsmöglichkeiten bieten.
- 2 Sie eröffnen **neue Wege in der Wirtschaft**, vom Entwurf über die Produktion bis zur Reparatur eines Bauteils.
- 3 Mit der klassischen Massenproduktion können sie nicht konkurrieren, aber sie ermöglichen einen neuen Markt: die **Maßanfertigung im industriellen Stil**.

Aus der Produktentwicklung sind die generativen Techniken schon heute nicht mehr wegzudenken. Sie verdrängen klassische Verfahren wie das Spritzgießen, bei dem immer eine neue Gussform notwendig war, wenn man das Modell veränderte. Dagegen arbeiten die neuen Verfahren ohne solche Zwischenschritte und spezielles Werkzeug, weswegen sie teilweise drastisch Zeit und Geld einsparen: Der Schuhhersteller Timberland konnte die Produktionszeit einer Modellschuhsohle von einer Woche auf 90 Minuten und die Kosten von 1200 auf 35 Dollar senken.

Da heutzutage ohnehin jedes Bauteil am Computer konzipiert wird, ist es bis zum greifbaren Prototyp nur noch ein Klick. Damit verkürzen die 3-D-Drucker die Zeit von der ersten Produktidee bis zur Markteinführung erheblich. Gleichzeitig sinken die Investitionskosten, wodurch Misserfolge leichter zu verkraften sind – die Hersteller können experimentierfreudiger werden.

»Besonders für kleine Firmen und Start-ups sind die 3-D-Drucker eine tolle Möglichkeit, um sich erste Marktanteile zu erschließen. Mit geringen Investitionskosten können sie am Markt partizipieren«, sagt Weller. Sie müssen sich noch nicht einmal einen Drucker anschaffen, da zur Prototypenherstellung externe Dienstleister bereitstehen. Auch bereits etablierte Marktteilnehmer profitieren dadurch, dass sie ihre Produkte leichter an die Standards anderer Länder anpassen und damit Exportbarrieren überwinden können.

Nicht nur für Prototypen, sondern auch für Fertigteile eröffnen die generativen Verfahren neue Möglichkeiten. Die Luftfahrtindustrie nutzt die neuen Designfreiheiten bereits, um Teile herzustellen, die bei gleicher Funktion und Haltbarkeit nur halb so viel wiegen wie konventionell hergestellte. Wenn die Rohre für die Kühlflüssigkeit nicht mehr geschmiedet und verlötet werden müssen, sondern einfach durch Weglassen von Material beim Drucken entstehen, kann man sie auch dicht unter der vielleicht kompliziert gekrümmten Oberfläche verlaufen lassen, wo sie die Wärme viel effizienter an die Außenluft abgeben. Mit geeigneten Materialien lassen sich Scharniergelenke als Bestandteile eines Produkts in ei-



PATRICK JOUIN LIND, INKX BY MATERIALISE, MIT FRODL GEN, VON MATERIALISE.BE

Klappstuhl der neuen Art: Der »One-Shot Stool«, entworfen von Patrick Jouin und mitsamt den Scharnieren in einem Stück gedruckt von Materialise in Löwen (Belgien), verwandelt sich durch Handdruck von der dünnen Transport- in die Nutzform.

nem Arbeitsgang gleich mitdrucken (Bilder oben). Materialeigenschaften wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit oder Elastizität können von Punkt zu Punkt variieren, was für den Druck von Textilien völlig neue Möglichkeiten eröffnet (Bild S. 94).

Eine interessante Anwendung ist das »Rapid Tooling«. Man stellt mit dem 3-D-Drucker nicht die Fertigteile selbst her, sondern Hilfsmittel zu ihrer Produktion, vor allem Gussformen. Diese werden bislang teuer und aufwändig mittels subtraktiver Verfahren hergestellt, wobei teilweise über 90 Prozent Verschnitt anfallen. Dagegen rentiert sich das Drucken einer Gussform auch dann, wenn mit ihr nur wenige Teile produziert werden. So bietet eine Start-up-Firma aus den Niederlanden Eis am Stiel in vom Kunden vorgegebenen Formen an. Die beiden Studentinnen drucken allerdings nicht das Eis selbst – das würde einen Drucker mit eingebauter Kühlung erfordern –, sondern nur ein Kunststoffmodell. In einen von diesem abgeformten Behälter wird später die süße Flüssigkeit eingefüllt und dann gefroren.

Schwächen in Kosten, Zeit und Qualität

Im Prinzip könnten generative Verfahren alle Arbeitsschritte eines Unternehmens übernehmen und neu gestalten: von der Entwicklung eines Produkts über seine Herstellung bis zur Reparatur. Allerdings sind die Qualitätsansprüche an die Produktion bedeutend höher als die an die Prototypenherstellung, was speziellere und auch teurere Maschinen erfordert. Und selbst die fortgeschrittensten unter diesen Geräten können mit den hohen Standards der klassischen Massenproduktionsverfahren nicht oder nur sehr mühsam mithalten. Das betrifft sowohl die Reproduzierbarkeit und die Oberflächenqualität als auch die Materialeigenschaften.

Seitdem die generativen Verfahren den Sprung aus dem Labor in die Produktionshallen wagten, gelten für sie die Maßstäbe dieses knallharten und hoch entwickelten Markts, vor allem in puncto Kosten, Zeitbedarf und Qualität. In allen drei Bereichen müssen sich die 3-D-Drucker noch verbessern.

Der Druckprozess selbst läuft zwar ohne menschliches Zutun ab; dennoch muss jemand das Ausgangsmaterial ein-

füllen, das fertige Produkt herausnehmen und säubern, Stützstrukturen entfernen und die Oberfläche nachbearbeiten (Bild S. 95). Bei manchen Prozessen muss man das Teil im Backofen nachbehandeln oder infiltrieren, das heißt zum Beispiel ein poröses Aluminiumprodukt flüssiges Aluminium aufsaugen lassen, so dass die Poren sich füllen. Diesen manuellen Aufwand können sich die Firmen zukünftig nicht mehr leisten. Erst wenn sie diese Schritte automatisieren und die 3-D-Drucker in größere Produktionsketten einbinden, werden sich die generativen Verfahren auch wirtschaftlich rechnen.

Darüber hinaus müssen die Hersteller erst noch etablieren, was bei den konventionellen Verfahren schon Standard ist, etwa eine vollautomatische Prozessüberwachung. Bislang sieht man erst nach Abschluss des Druckprozesses, ob das Bauteil gelungen ist, und hat bei einem Produktionsfehler nicht nur Material, sondern auch kostbare Zeit verloren. Zukünftig müssen die Maschinen problematische Betriebszustände erkennen, sie beheben und notfalls selbstständig die Produktion abbrechen.

Die neue Technologie hält eine große Zahl an Versprechungen bereit. Wird sie die konventionellen Verfahren vollständig ersetzen? »Ich bin fest davon überzeugt, dass die generativen Verfahren in alle möglichen Maschinen Einzug halten werden, so dass in einer Fertigungslinie plötzlich ein additiver Teil steckt«, sagt Andreas Gebhardt, Professor an der FH Aachen und Herausgeber des »RTeJournal«, einer einschlägigen Onlinezeitschrift. »Aber dass wir umgekehrt alles in einer additiven Maschine machen, glaube ich eher nicht.« Denn die 3-D-Drucker setzten nicht die alte Regel außer Kraft, wonach es kein Fertigungsverfahren gibt, das alles kann. »Auch die generativen können nicht alles.«

Durch das Schichtbauprinzip sind den Materialeigenschaften wortwörtlich Grenzen gesetzt. »Die Grenzschichten werden wir wohl kaum wegbekommen, jedenfalls nicht im Prozess«, glaubt Gebhardt. »Es kann sein, dass wir mit schichtweise gebauten Materialien nicht die gleichen Materialeigenschaften erzielen wie mit konventionellen Verfah-

ren. Höchsthafte Stähle oder Hochtemperaturlegierungen werden kaum machbar sein.«

Bei den konventionellen Verfahren sinkt der Preis mit der Stückzahl. Diese Grundregel der Massenproduktion gilt nicht für die generativen Verfahren. Ein 3-D-Druck kostet gleich viel, egal ob die Maschine ein Stück herstellt oder tausende. Bei großen Stückzahlen ist sie der klassischen Massenproduktion daher stets unterlegen. Weller sieht sie nur dann im Vorteil, wenn das Produkt mindestens eine von drei Bedingungen erfüllt: Es ist komplex, es ist individuell, oder es wird zumindest nur in kleinen Stückzahlen produziert.

Maßanfertigung für jedermann

Genau hierin liegt auch die Stärke der generativen Verfahren: Der Hersteller kann sein Produkt – bei überschaubaren Kosten – für kleine Gruppen oder sogar einen einzelnen Kunden maßschneidern und für den Mehrwert auch einen höheren Preis verlangen. Bislang bedienen die Unternehmen diese Variationen in der Nachfrage nach dem Baukastenprinzip (»mass customization«): Man produziert in großen Stückzahlen für ein und dieselbe Karosserie Motoren verschiedener Stärke, mehr oder weniger luxuriöse Ausstat-

tungsteile und optionales Zubehör, was dem Kunden eine gewisse individuelle Freiheit gibt. Der Computerhersteller Dell verfährt für seine PCs nach demselben Prinzip.

Diese Strategie ist jedoch kostenintensiv und riskant, da der Hersteller eine große Zahl von »Bauklötzen« vorrätig halten muss und vielleicht auf einer wenig gefragten Variante sitzen bleibt. Die Probleme hat die generative Fertigung nicht, bei gleichzeitig größerer Designfreiheit.

Extremfall in dieser Hinsicht ist die Medizintechnik. Jedes Zahnimplantat und jede Hörgeräteschale ist ein Unikat, das sehr präzise der Körperform des Patienten angepasst werden muss. Hier spielen die generativen Verfahren ihre Stärken aus. Schon bald wird der Computer in wenigen Schritten aus dem Scan des Mundraums oder des Ohrs ein 3-D-Modell des Implantats erstellen, das dann ohne Umwege produziert wird.

Wenn es allerdings nicht gerade um Zahnersatz geht, ist ein guter Grund für Individualisierung, der dann auch den höheren Preis rechtfertigt, offenbar schwieriger zu finden. Bislang stößt man nur auf eine Hand voll von Ideen: maßgefertigte Schuhe, Minifiguren der eigenen Person, die wie dreidimensionale Fotos wirken, komplexe Schmuckstücke. Noch scheint die Industrie nicht die passende Antwort auf die neue Technik gefunden zu haben.

Ein aussichtsreiches Einsatzgebiet ist die Ersatzteilversorgung. Andreas Gebhardt erklärt: »Die Lager dieser Welt liegen voll mit Ersatzteilen, die zu einem sehr großen Teil nicht gebraucht werden.« Die Herstellung mittels 3-D-Drucker »würde enorme Komplexität aus der gesamten Ersatzteillogistik nehmen«, erläutert Weller. »Die Werkstatt bräuchte nur den Drucker, das Rohmaterial und den Datenzugriff zum 3-D-Modell, um jegliches Modell zu einem physischen Produkt werden zu lassen.« Das spart Lagerhallen, Transportaufwand und vor allem Zeit. Bei einer Produktionslinie, deren Ausfall enorme Kosten verursacht, kommt es darauf an, »ob das kritische Ersatzteil, das den Betrieb wieder zum Laufen bringt, innerhalb von einer halben Stunde, von zwei Stunden oder erst nach einem Tag verfügbar ist«, so Weller. Auch für abgelegene Produktionsstätten wie Minen, Ölfelder oder Ölplattformen würde sich eine Selbstversorgung mit Ersatzteilen rasch bezahlt machen. Allerdings sieht Weller das »perspektivisch noch etliche Jahre entfernt«.

3-D-Drucker kosten Arbeitsplätze

Die Consulting-Firma Wohlers schreibt in ihrem jüngsten Bericht, dass der Markt mit 3-D-Druckern in jedem der letzten 25 Jahre um durchschnittlich 25,4 Prozent gewachsen sei und in den nächsten Jahren mit zweistelligen Raten weiterwachsen werde. Doch die tatsächliche Bedeutung ist noch überschaubar. Der Umsatz mit 3-D-Drucktechnologie einschließlich Dienstleistungen lag 2012 bei 2,2 Milliarden Dollar weltweit. Bis 2017 soll er auf 6 Milliarden, bis 2021 auf 10,8 Milliarden Dollar ansteigen.

In dem Report »Global Trends 2030: Alternative Worlds« wagt der amerikanische National Intelligence Council einen Blick in die Zukunft. Bis 2030 wird vieles, was die neuen Ver-



ANOUK WIPPRECHT, NICCOLO CASAS UND MATERIALISE, MIT FRIEDRICH VON MATERIALISE

Der »smoke dress«, entworfen von der Designerin Anouk Wipprecht mit Unterstützung des Architekten Niccolo Casas und gedruckt von Materialise, besteht aus Polyamid und einem gummiähnlichen Material. Gesteuert durch eingearbeitete Mikroprozessoren, stößt er kleine Rauchwölkchen aus, sobald jemand seiner Trägerin zu nahe kommt.



Auch eine gedruckte Zahnbrücke (links ein aufgeschnittenes Rohprodukt; Kaufläche unten) bedarf der Nachbehandlung: Man muss die für den Prozess erforderlichen Stege entfernen und die Oberfläche polieren; rechts das Endergebnis.

fahren zu leisten versprechen, noch nicht eingelöst sein. Trotzdem werden sie bis dahin die Arbeitswelt verändern.

Anhand der Medizintechnik lässt sich diese Entwicklung schon jetzt ablesen: Die generativen Verfahren haben die bisherige manuelle Produktion verdrängt und damit aus den Niedriglohnländern zurückgeholt – allerdings ohne im Gegenzug Beschäftigung für Geringqualifizierte in den Industriestaaten zu schaffen. Im Gegenteil: Da es tendenziell weniger zu transportieren gibt, könnten auch in der Logistik Arbeitsplätze verloren gehen.

Andererseits helfen 3-D-Drucker den armen Ländern, schneller zu den reichen aufzuschließen. In Form der Maschinen können sie deren Produktions-Knowhow aufkaufen und damit auf teure Importe verzichten. Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren verlangen die 3-D-Drucker auch weniger industrielle Infrastruktur.

Der emanzipierte Konsument

Inspiziert von der neuen Technologie propagiert eine euphorische und progressive Szene aus Künstlern, Designern und Technikern eine spannende Vision: der Mensch als Prosument, das heißt als Konsument, Designer und Produzent in Personalunion. Mittels benutzerfreundlicher Software könnte jedermann 3-D-Modelle kreieren, sie mit dem eigenen Drucker produzieren und nach dem »Open Source«-Prinzip mit seinesgleichen teilen. Der Konsument emanzipiert sich – ein Albtraum für die klassische Wirtschaft!

Diese Vision hält die große IT-Beratungs- und Prognosefirma Gartner Inc. zumindest für voreilig. Der aktuelle Hype sei auf einem »Gipfel der überzogenen Erwartungen«. Innerhalb der nächsten zwei bis fünf Jahre werde sich bei den professionellen Anwendungen der neuen Technik die Spreu vom Weizen trennen. Dagegen seien die »Fabber«, die 3-D-Drucker für den Hausgebrauch, noch auf lange Zeit eine Spielerei mit faszinierenden, aber wirtschaftlich nicht bedeutenden Anwendungen. Immerhin: Ein Ersatzteil mit bescheidenen Ansprüchen an Materialqualität und -präzision werde man schon bald nicht mehr als echten Gegenstand kaufen



BEDE: MIT FRIEDRICH VON ANDREAS GEBHARDT, FH AACHEN, RAPID PROTOTYPING LABOR

müssen, stattdessen genüge es, die zugehörige Datei aus dem Internet herunterzuladen und zu Hause auszudrucken.

Auch ohne professionelles Gerät gewinnt jedoch der Konsument neue Möglichkeiten. Insbesondere wird er ein Produkt nach den eigenen Vorstellungen designen können. Für Weller wird »die Frage, wo und wie Innovation geschieht, gewissermaßen auf den Kopf gestellt«. Bedeutender als Fabber werden daher externe Anbieter sein, die ähnlich wie Copyshops nach Vorlagen der Kunden Gegenstände auf professionellem Niveau produzieren. Solche Firmen existieren bereits. Nach Einschätzung von Weller wird der Kunde sie jedoch nur im Einzelfall aufsuchen. Er werde wohl kaum bereit sein, Zeit, Geld und Arbeit in die Individualisierung vieler Gegenstände zu investieren.

Wenn Unternehmen ihre Rolle überdenken und geeignete Strategien für den Wandel finden, könnte dieser ihnen sogar Chancen bieten, meint Weller, da er die bestehenden Geschäftsmodelle eher erweitert als ersetzt. Laut Gebhardt dürfen die generativen Verfahren nicht »als Alternative zur traditionellen Fertigung angesehen werden«. Sie ersetzen den klassischen Markt nicht, sondern machen ihn vielfältiger. Auch Weller sieht für die neuen Verfahren spannende Anwendungsfelder, aber wohlgerneht »als Komplementärtechnologie, um klassische Produktionsverfahren zu unterstützen und effizienter zu machen«. ~

DER AUTOR



Martin Scheufens hat Physik in Aachen und Sheffield studiert und ist freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

QUELLEN

- Berman, B.:** 3-D Printing: The New Industrial Revolution. In: Business Horizons 55, S. 155–162, 2012
- Gebhardt, A.:** Understanding Additive Manufacturing. Hanser, München 2012
- Gebhardt, A.:** Rapid Manufacturing – eine interdisziplinäre Strategie. In: RTeJournal 3, 2006. Online unter <https://www.rtejournal.de/ausgabe3/360>

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1281882



Paul Zanker

Die römische Stadt*Eine kurze Geschichte*

C.H. Beck, München 2014

157 S., € 19,95

GESCHICHTE

Herrschaft im Planquadrat

Römische Städte wurden sehr durchdacht angelegt. Ihre öffentlichen Bauten ähnelten weit gehend jenen in Rom, was – zusammen mit der Straßenführung – die Zugehörigkeit zu einem großen Ganzen demonstrieren sollte.

»Ihr habt das ganze Reich angefüllt mit Städten [...], die in Glanz und Anmut erstrahlen«, preist Aelius Aristides um die Mitte des 2. Jahrhunderts n. Chr. die zivilisatorische Leistung der Römer. Was der aus Kleinasien stammende Redner zum Ausdruck brachte, ist auch unter Althistorikern vorherrschende Lehrmeinung: Die Stadt war jene Siedlungsform, auf der das Imperium Romanum seine Herrschaft gründete. Politischer und ideologischer Bezugspunkt der reichsweit mehr als 2000 Städte war die Kapitale am Tiber.

»Ihr habt das ganze Reich angefüllt mit Städten [...]«, preist Aelius Aristides um die Mitte des 2. Jahrhunderts n. Chr. die zivilisatorische Leistung der Römer. Was der aus Kleinasien stammende Redner zum Ausdruck brachte, ist auch unter Althistorikern vorherrschende Lehrmeinung: Die Stadt war jene Siedlungsform, auf der das Imperium Romanum seine Herrschaft gründete. Politischer und ideologischer Bezugspunkt der reichsweit mehr als 2000 Städte war die Kapitale am Tiber.

Städte dienten dazu, unterworfenen Völker zu romanisieren

Paul Zanker, emeritierter Professor für Klassische Archäologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München, gibt einen glänzenden Überblick über die spannungsreiche Geschichte der römischen Stadt – von der Republik bis in die Kaiserzeit. Kenntnisreich und anschaulich schildert er, welche politischen, sozialen und wirtschaftlichen Einflüsse das damalige Stadtbild prägten, das noch heute vielerorts sichtbar ist.

Ein wichtiges Kennzeichen der römischen urbanen Siedlungen war, dass sie an Überlandstraßen lagen, die von Rom ausgingen. Zudem besaßen sie eine klare, nach einheitlichem Muster angelegte Struktur. Diese zeichnet sich durch eine streng symmetrische Straßenfüh-

»Ihr habt das ganze Reich angefüllt mit Städten [...]«, preist Aelius Aristides um die Mitte des 2. Jahrhunderts n. Chr. die zivilisatorische Leistung der Römer. Was der aus Kleinasien stammende Redner zum Ausdruck brachte, ist auch unter Althistorikern vorherrschende Lehrmeinung: Die Stadt war jene Siedlungsform, auf der das Imperium Romanum seine Herrschaft gründete. Politischer und ideologischer Bezugspunkt der reichsweit mehr als 2000 Städte war die Kapitale am Tiber.

»Ihr habt das ganze Reich angefüllt mit Städten [...]«, preist Aelius Aristides um die Mitte des 2. Jahrhunderts n. Chr. die zivilisatorische Leistung der Römer. Was der aus Kleinasien stammende Redner zum Ausdruck brachte, ist auch unter Althistorikern vorherrschende Lehrmeinung: Die Stadt war jene Siedlungsform, auf der das Imperium Romanum seine Herrschaft gründete. Politischer und ideologischer Bezugspunkt der reichsweit mehr als 2000 Städte war die Kapitale am Tiber.

kamen noch Unterhaltungs-, Freizeit- und Vergnügungsbauten hinzu, etwa Theater, Arenen und Thermen.

Zankers Analyse geht jedoch über die bloße Beschreibung der architektonischen Ausgestaltung römischer Städte hinaus. Der ehemalige Direktor des Deutschen Archäologischen Instituts in Rom lenkt den Blick auch auf ideologisch geprägte Vorstellungen, die in der Struktur der neu gegründeten Städte zum Ausdruck kamen: Die die Stadt durchquerende Fernstraße etwa demonstrierte die Zugehörigkeit zu einem größeren Ganzen. Dasselbe galt für die zentrale Position der Kapitols-tempel, die eine Verbindung zum höchsten römischen Staatsgott Jupiter Optimus Maximus herstellen sollten.

Gleichzeitig diente die Stadt mit ihren kommunalen Nutz- und Vergnügungsbauten auch dazu, den unterworfenen Völkern die Annehmlichkeiten der römischen Zivilisation schmackhaft zu machen. Der Historiker Tacitus (um 55–115 n. Chr.) stellte urbane Siedlungen quasi als Werbeprogramm für die römische Kultur dar. Er beschreibt, wie Rom die einheimische Bevölkerung in den eroberten Territorien für sich gewann, indem es diese ermunterte, typisch römische Bauten zu errichten – Tempel, komfortable Wohnhäuser und öffentliche Plätze –, um sie an die römische Lebensart zu gewöhnen und zu »zivilisieren«. Die Stadt wurde so zu einem Instrument der Romanisierung, bei der die unterworfenen Völker aus freien Stücken die eigene Kultur zu Gunsten jener der Besatzer aufgaben.

Als ausgewiesener Kenner versteht es Zanker sehr gut, Hintergründe und Auswirkungen der römischen Urbanisierungspolitik zu veranschaulichen und diese in einen größeren kulturhistorischen Kontext zu stellen. Sein brillant geschriebenes Buch empfiehlt sich als Lektüre für alle, die den Ursprüngen der städtischen Entwicklung in Europa auf den Grund gehen wollen.

Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist; er lebt in der Nähe von Mainz.



Rüdiger Vaas

Vom Gottesteilchen zur Weltformel

Urknall, Higgs, Antimaterie

und die rätselhafte Schattenwelt

Kosmos, Stuttgart 2013

512 S., € 24,99

PHYSIK

Woher die Masse kommt

Ein anspruchsvolles Werk über die physikalische Bedeutung des Higgs-Mechanismus.

Im zurückliegenden Jahr spannte das Nobelpreiskomitee die Physiker auf eine harte Probe. Fast eine Stunde länger als gewohnt dauerte es, bis die Offiziellen endlich am 8. Oktober um 12.45 Uhr verkündeten, dass der Nobelpreis 2013 an den belgischen Physiker François Englert und seinen britischen Kollegen Peter W. Higgs gehe – für ihre Vorhersage des so genannten Brout-Englert-Higgs-Bosons, umgangssprachlich als Higgs-Teilchen bezeichnet (siehe auch SdW 12/2013, S. 19). Der Grund für die Verzögerung ist nicht ganz klar; es wird gemunkelt, die Jurymitglieder hätten übermäßig lange gebraucht, sich auf die Preisträger zu einigen.

Englert und Higgs verdanken die Ehreung den zahlreichen Wissenschaftlern, die am Large Hadron Collider (LHC) bei Genf arbeiten, dem leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger der Welt. Diese Forscher hatten den experimentellen

Nachweis für die Existenz des Higgs-Bosons erbracht. Das für das Verständnis der Natur enorm wichtige Teilchen scheint sich stimmig ins Standardmodell der Elementarteilchenphysik einzufügen.

In seinem Buch »Vom Gottesteilchen zur Weltformel« beschreibt der Wissenschaftsjournalist Rüdiger Vaas die Entdeckungsgeschichte des Bosons, dessen Existenz Peter Higgs im Jahr 1964 erstmals postuliert hatte. Zudem liefert Vaas eine umfassende Darstellung des aktuellen Stands der Elementarteilchenphysik. Da wird es schon mal etwas kompliziert, vor allem in den ersten Kapiteln, in denen der Autor detailliert die Welt des Allerkleinsten beschreibt. Zwischen all den Fermionen, Bosonen, Quarks und Leptonen die Übersicht zu behalten, fällt nicht immer leicht. Es sei dem Autor hoch angerechnet, dass er im Kapitel »Was

bringt die Teilchenphysik« zeigt, warum es überhaupt wichtig ist, sich mit der komplizierten Materie zu befassen.

Spannender wird es weiter hinten im Buch, wenn Vaas beschreibt, wie es den vielen hundert Wissenschaftler am LHC gelang, das Higgs-Teilchen nachzuweisen. Schon woher der umstrittene Name »Gottesteilchen« stammt, der bald durch die Presse geisterte, ist hochinteressant. Was den experimentellen Beleg so bedeutsam macht: Mit dem Higgs-Teilchen und dem ihm zugehörigen Higgs-Feld kann man erklären, wie die Elementarteilchen im Universum ihre Masse bekommen. Das allgegenwärtige Higgs-Feld wirkt dabei quasi wie ein zähes Medium, durch das sich die Teilchen bewegen. Je stärker sie mit diesem Medium wechselwirken, umso höher fällt ihre Masse aus.

Auch auf die Dunkle Materie kommt Vaas zu sprechen. Dabei entfernt er sich zwar inhaltlich vom Higgs-Teilchen, vollzieht aber einen logischen Schritt hin zur zweiten Hälfte des Buchs, in der es um Symmetrien und die Suche nach der Weltformel geht. Hier taucht das Higgs-Feld nun wieder häufiger wieder auf, und zwar im Zusammenhang mit der Frage, welche Rolle es bei der Suche einer allumfassenden mathematischen Erklärung der Natur spielt.

»Vom Gottesteilchen zur Weltformel« ist kein Buch für Einsteiger. Es erfordert profundes Wissen und die Bereitschaft, sich 500 Seiten lang mit komplizierten physikalischen Sachverhalten zu beschäftigen. Für naturwissenschaftlich sehr interessierte Leser hält das Werk zudem einige anspruchsvolle Formeln und Grafiken bereit. Leider fehlen ein Stichwortverzeichnis und ein Glossar. Sicher wird Vaas mit seinem Buch einer umfassenden Darstellung der Higgs-Thematik gerecht, stellenweise hätte er aber zu Gunsten der Leserfreundlichkeit auf ein wenig fachlichen Tiefgang verzichten können.

Thorsten Naeser

Der Rezensent ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

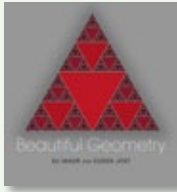


MAXIMILIEN BRICE, CERN



CLAUDIA MARCELLONI, CERN

Peter W. Higgs (links) und François Englert erhielten den Nobelpreis für die theoretische Entdeckung eines Mechanismus, der Elementarteilchen ihre Masse verleiht.



Eli Maor, Eugen Jost

Beautiful Geometry

Princeton University Press, Princeton/Oxford 2014. 187 S., € 27,95

Der amerikanische Mathematikhistoriker Eli Maor lieferte die wissenschaftliche Basis, die der Schweizer Künstler Eugen Jost durchaus eindrucksvoll ins Bild gesetzt hat. Dabei ließ Letzterer dieselbe puristische Strenge walten wie der antike Geometer Euklid, der mit seinem Werk »Elemente« den Stil mathematischer Darstellungen für Jahrtausende prägte. Zum größten Teil illustrieren die Bilder klassische Theoreme aus den »Elementen« sowie der Schulgeometrie, etwa den Satz vom Umfangswinkel oder den des Pythagoras. Dazu kommen jüngere, wenig bekannte Schätze wie der Satz von Giovanni Ceva (1647–1734) über Verhältnisse von Seitenabschnitten im Dreieck, etliche Resultate, mit denen Jakob Steiner (1796–1863) die schon tot geglaubte euklidische Geometrie wiederbelebte, und Exkurse in die Welt der Fraktale. Gegen die Pracht der geometrischen Grafiken fallen die Darstellungen der Ziffernfolgen von π , e oder $\sqrt{2}$ merklich ab. Diese sind in ihrer Regellosigkeit eben doch ästhetisch eher unergiebig. CHRISTOPH PÖPPE



Clive Gifford

Kometen, Sterne, Schwarze Löcher Die 30 spektakulärsten Fakten zum Weltall

Aus dem Englischen von Maria Zettner. Velber Kinderbuch, Freiburg i. Br. 2014. 95 S., € 9,99

Die Idee: Ein Kinderbuch über das Weltall zum schnellen Schmökern. Jupiter, Teleskop, Schwarzes Loch – all das und mehr, in Häppchen serviert, zum Querlesen, pro Thema 30 Sekunden, mit einem Drei-Sekunden-Fazit. Leider lässt die Umsetzung zu wünschen übrig. Warum beauftragte man einen Grafiker damit, die Himmelskörper zu zeichnen? Raumsonden haben wunderschöne Fotos geschossen, doch im Buch sehen die gleichen Objekte wie verunglückte Pizzas oder haarige Viren aus. Dass Kinder Planeten so malen würden, heißt noch nicht, dass sie sie auch so sehen wollen. Überdies enthält das Buch fachliche Fehler, und ob die sich teils wiederholenden Glossare zwischen den Kapiteln sinnvoll zusammengestellt sind, erscheint ebenfalls fraglich. Diese Schwächen kommen wohl aus dem englischen Original; leider ist zusätzlich noch die Übersetzung ungenau. Drei-Sekunden-Fazit: Ein missglücktes Werk. STEFAN GILLESSEN



Andreas Anton, Michael Schetsche, Michael Walter (Hg.)

Konspiration Soziologie des Verschwörungsdenkens

Springer, Berlin und Heidelberg 2014. 351 S., € 34,99

Verschwörungstheorien sind allgegenwärtig. Die Autoren fragen weniger nach deren Wahrheitsgehalt, sondern untersuchen vielmehr, wie und warum sie entstehen. Menschen, so das Fazit, suchten nach Sinn und Orientierung und strebten danach, komplexe Zusammenhänge zu vereinfachen. Gerade heute geisterten extrem gegenläufige Ansichten zum Weltgeschehen durch die Medien – das erhöhe die Popularität vermeintlich einfacher Erklärungen. Die Autoren plädieren dafür, Verschwörungstheorien nicht zu verdammen, sondern sie genau unter die Lupe zu nehmen, da sie viel darüber aussagen, wie wir unsere Sichtweisen konstruieren. Der Leser lernt etwa die Kontroverse um die Herkunft des Aidsregers kennen und erfährt, inwiefern diese von Ängsten und Vorurteilen geprägt ist. Das Werk eignet sich für soziologisch Vorgebildete, die gern hinter die Kulissen des Alltags schauen. ELISABETH STACHURA



Guillaume Duprat

Was sieht eigentlich der Regenwurm? Die Welt mit den Augen der Tiere sehen

Aus dem Französischen von Susanne Schmidt-Wussow. Knesebeck, München, 2014. 40 S., € 18,-

Das Werk verschafft dem Leser einen Eindruck davon, wie Tiere sehen. Der Autor geht auf 25 Tiere ein, vom Hund bis zum Regenwurm, und widmet ihnen großformatige Illustrationen. Um etwa zu entdecken, wie der Hund seine Umgebung wahrnimmt, muss man eine Klappe über dessen Augen aufdecken. Darunter ist die Perspektive des Tiers auf die Umgebung dargestellt nebst knappen Erörterungen zum Thema Sehen. Den direkten Vergleich mit der menschlichen Wahrnehmung ermöglicht die ausklappbare erste Seite. Dort erklärt der Autor zudem, wie Bildinformationen über das Auge ins Gehirn gelangen. Die kurzen Texte sind einfach und unterhaltsam, setzen jedoch biologische Grundkenntnisse voraus. Anhand kleiner Infografiken gelingt es Duprat, komplexe Themen wie die Evolution des Auges oder das Facettenauge der Insekten verständlich zu erklären. Das Buch empfiehlt sich für Kinder ab acht Jahren, ist aber durchaus auch für Erwachsene interessant. ANNA KLINGER



Dominic Roser, Christian Seidel

Ethik des Klimawandels

Eine Einführung

WBG, Darmstadt 2013

167 S., € 29,90

ETHIK

Der Klimawandel als moralisches Problem

Wie viel sollte jeder Einzelne zum Klimaschutz beitragen, damit die entsprechenden Lasten gerechter auf alle verteilt werden?

Die meisten Veröffentlichungen zum Klimawandel behandeln ihn aus naturwissenschaftlicher Perspektive. Die Autoren dieses Buchs haben einen anderen Ansatz gewählt: Sie befassen sich in erster Linie mit Fragen der Gerechtigkeit – und setzen den aktuellen naturwissenschaftlichen Erkenntnisstand bei den Lesern als bekannt voraus. Einschlägige Fakten führen sie eher beiläufig auf und belegen sie auch nicht genauer. Damit richten sie sich an all jene, die Interesse an den philosophischen Implikationen des Klimawandels zeigen.

Die Autoren verfügen hier über ausgewiesene Expertise. Dominic Roser hat Volkswirtschaftslehre, Philosophie und Politikwissenschaften studiert und

Wie das Werk klarmacht, stellt der Klimawandel die Menschheit vor globale und generationenübergreifende Probleme. Die Ethik sei hier eine Brücke zwischen Naturwissenschaften und Politik: »Aufbauend auf der naturwissenschaftlichen Beschreibung der Tatsachen bewertet die Ethik verschiedene Optionen aus moralischer Sicht und gibt damit Empfehlungen für die moralisch richtige Klimapolitik.« Drei große Fragen behandeln die Autoren: Sind wir angesichts des Klimawandels überhaupt zu etwas verpflichtet? Falls ja, wie groß ist unsere Verantwortung, zu handeln? Und wie sind diese Pflichten zu verteilen?

Zu jeder dieser Fragen stellen Roser und Seidel verschiedene mögliche Posi-

»Argumente-Boxen« machen fit zum Mitdiskutieren

über die Ethik des Klimawandels promoviert. Seine Forschungsschwerpunkte sind Klima- und Generationengerechtigkeit sowie Risikoethik. Christian Seidel hat Philosophie, Wissenschaftstheorie, Politikwissenschaften und Psychologie studiert und sich als Postdoc an der Universität Zürich mit Klimawandel, Gerechtigkeit und der Ethik globaler öffentlicher Güter beschäftigt. Neben politischer Philosophie befasst er sich mit Grundfragen der normativen Ethik, insbesondere den Menschenrechten.

tionen dar und zeigen auf, wie sich die jeweiligen Gegenargumente entkräften lassen. Dies tun sie durchweg rational, gut verständlich und unter Zurückstellung der eigenen Meinung. Abstrakte ethische Probleme veranschaulichen sie anhand von Alltagsbeispielen und greifen gelegentlich auch zu humorvollen Erklärungen. Am Ende jedes Abschnitts fassen sie die behandelten Standpunkte in »Argumente-Boxen« zusammen. Diese können sich in einschlägigen Diskussionen als sehr nützlich erweisen.

JAHRGANGS-CD-ROM 2013



Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland);

So erreichen Sie uns:

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

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

Mitunter erfordert der Text viel Konzentration beim Lesen und Mitdenken, etwa wenn die Autoren auf die Asymmetrie von Rechten eingehen. Auch mathematische Berechnungen ziehen sie für ihre Erörterungen heran. Bei komplexen Zusammenhängen greifen sie zu erläuternden Grafiken. Im letzten

Teil ihres Buchs lösen sich Roser und Seidel von der Theorie und geben Anregungen, wie sich ein moralisch richtiges Verhalten praktisch umsetzen lässt. Dabei beschäftigen sie sich unter anderem mit dem Emissionshandel.

Insgesamt ist »Ethik des Klimawandels« ein gelungenes Werk. Den vorge-

stellten Argumenten kann man als interessierter Laie überwiegend gut folgen und bekommt eine hilfreiche Einführung ins Thema.

Fenja Schmidt

Die Rezensentin ist freie Journalistin in Hamburg.



Svante Pääbo
Die Neandertaler und wir
Meine Suche nach den Urzeit-Genen
 Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.
 S. Fischer, Frankfurt am Main 2014,
 381 S., € 22,99

PALÄOGENETIK

Der Urmensch in uns

Svante Pääbo, einer der berühmtesten Neandertalerforscher, legt seine Autobiografie vor.

Bedeutungslosigkeit ist eines der häufigsten Berufsleiden von Wissenschaftlern, aber der vielfach preisgekrönte Mediziner und Paläogenetiker Svante Pääbo, Direktor am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie Leipzig, ist schon seit seiner Doktorandenzeit dagegen immun. Zwar wurde sein »Beitrag über den Nachweis von DNA in altägyptischen Mumien«, 1984 in dem DDR-Periodikum »Das Alter-

tum« veröffentlicht, kaum zur Kenntnis genommen. Aber als er dieselben Befunde ein Jahr später in »Nature« publizierte, geriet er in den Fokus der Fachwelt. Es war der Beginn einer steilen Karriere, die durch Meilensteine wie die Entschlüsselung mitochondrialer Neandertaler-DNA und die Sequenzierung des Neandertalergenoms gekennzeichnet ist.

Rückblickend auf drei Jahrzehnte beschreibt der schwedische Evolutionsforscher in seiner Biografie nicht nur die bahnbrechenden Innovationen und häufigen Rückschläge in der Paläogenetik, eines von ihm entscheidend mitgeprägten Fachgebiets. Er schildert auch die komplexen Rahmenbedingungen heutiger Spitzenforschung, Konkurrenzkämpfe und den Druck der Medien. Ferner berichtet er über seine persönlichen Interessen und bekennt sich freimütig zu seiner Bisexualität.

Bereits als Jugendlicher war Pääbo von der Archäologie begeistert. Nachdem er schon als 13-jähriger mit seiner Mutter zu den ägyptischen Pyramiden

gereist war, studierte er zunächst Ägyptologie, bald aber auch Medizin. Die biochemische Grundlagenforschung, mit der er dort in Berührung kam, faszinierte ihn dann doch weit mehr, zumal er in der Ägyptologie keine Zukunft sah.

Seine ersten Experimente hatten den Charme von »Jugend forscht«. Um die Isolation von DNA aus altem Gewebe zu erproben, kaufte er eine Kalbsleber und mumifizierte diese im Laborofen. Die Ergebnisse ermutigten ihn zu entsprechenden Untersuchungen an menschlichen Mumien, unter anderem aus den Staatlichen Museen zu Berlin. Er bewarb sich erfolgreich um eine Postdoc-Stelle bei dem Biochemiker Allan Wilson von der University of California, Berkeley, für Pääbo »ein Halbgott«. Forschung an Neandertalerfossilien musste aber noch warten – zu groß war das Risiko der Verunreinigung durch neuere DNA, zu gering die Chance, aus wenigen Milligramm Probenmaterial hinreichend aussagekräftiges Erbgut zu isolieren. Erst der technische Fortschritt erlaubte neue Perspektiven: Die Polymerase-Kettenreaktion (PCR) bot eine bis dato unerreichte Effizienz beim Vervielfältigen von DNA. Doch die Gefahr von Fehldiagnosen blieb – und Pääbos Furcht davor, ein regelrechter »Verfolgungswahn«, zieht sich als Spannungsbogen durch sein Werk.

1990 erhielt der Autor einen Ruf auf den Lehrstuhl für Allgemeine Biologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Augenzwinkernd bekennt er, der Biologie nie auf Universitätsniveau studiert hat, wie er wegen seiner forscher Äußerung gegenüber einem Kollegen aus der Zoologie, »Insekten seien doch keine Tiere«, denn unter solchen habe er sich »Lebewesen

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**

Mehr Rezensionen finden Sie unter:
www.spektrum.de/rezensionen



FOTOHIA / CAMILO MARANEJÓN GARCÍA

Neandertaler (hier eine Rekonstruktion) haben sich wahrscheinlich in geringem Maß mit modernen Menschen vermischt, wie Erbgutanalysen belegen.

mit Pfoten, Fell und am besten noch Schlappohren« vorgestellt, von Lehrverpflichtungen in zoologischer Systematik befreit wurde und größere Freiräume für seine Forschung bekam. Er und seine Arbeitsgruppe zielten zunächst darauf ab, »Authentizitätskriterien« zu formulieren, also Regeln, um sicher zu gehen, dass man beim Isolieren alter DNA auch tatsächlich solche gewinnt. Die Einrichtung eines Reinraums hatte dabei höchste Priorität, da sich die Ergebnisse anderer Labors, etwa DNA-Sequenzen von Dinosauriern, teils als gravierende Fehlbestimmungen herausgestellt hatten.

Es folgte die erfolgreiche Isolierung fossilen tierischen Erbmaterials, beispielsweise vom Riesenfaultier, aber Pääbos Herz hing nicht daran. Er fürchtete, zu einem »Zoologen wider Willen« zu werden, und nahm sein ursprüngliches Ziel in Angriff, die Untersuchung der Geschichte des Menschen. Eines der ersten menschlichen Analyseobjekte war die Gletschermumie »Ötzi«, und 1996 gab es erstmals grünes Licht für eine Probenentnahme aus dem Oberarmknochen des Neandertaler-Typus-exemplars.

1997 wechselte Pääbo nach Leipzig ans neu gegründete Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie.

Von da an ging er das ambitionierte Projekt an, Kern-DNA aus Neandertalerfossilien zu gewinnen. Und hatte, obwohl kaum für möglich gehalten, Erfolg damit.

Eingehend erzählt Pääbo, wie er seine Arbeitsgruppe aufbaute und einfühlend zu führen lernte. Er beschreibt die spezifische Diskussionskultur im Team, emotionale Höhenflüge und sentimentale Tiefen; er schildert Hürden und unerwartete Fügungen bei der Finanzierung von Projekten sowie das nervenaufreibende Aushandeln von Kooperationen zwecks Beschaffung von Fossilmaterial, das nach der Maxime »der wahre Egoist kooperiert« zu funktionieren scheint. Zudem berichtet er, wie er Joint Ventures aufkündigte, etwa mit dem Genetiker Edward M. Rubin vom Lawrence Berkeley National Laboratory, und hinterher befürchtete, zu viel preisgegeben zu haben und das wissenschaftliche Wettrennen zu verlieren.

Detailliert befasst sich der Autor mit den Neandertalern und – unerwartet ausführlich – auch mit den rätselhaften sibirischen Denisova-Menschen, die vor rund 40 000 Jahren lebten und bislang nur durch sehr wenige Fossilien belegt sind. Er vergleicht diese genetisch mit dem modernen Menschen und dem Schimpansen und zeigt damit ein Stück

weit, was den Menschen zum Menschen macht. Das Fazit: Die Paläogenetik öffnet neue Fenster in die Vergangenheit, die konventioneller Paläoanthropologie verschlossen bleiben. Dies zeugt zu haben, ist Pääbos bleibendes Verdienst als Protagonist dieser Disziplin.

Aber einige Kritik sei doch erlaubt. Zunächst erweckten Fachpublikationen aus Pääbos Gruppe den Eindruck, es habe keine Vermischung zwischen Neandertalern und modernen Menschen gegeben. Wenn die genomischen Befunde nun doch eine, wenngleich sehr geringe Vermischung nahelegen, wäre da seitens des Autors nicht ein Hinweis auf das »Out-of-Africa-Modell mit Hybridisierung« geboten gewesen, das 1984 vom Hamburger Paläoanthropologen Günter Bräuer vorgestellt wurde und eine solche Vermischung annahm? Zudem sind Pääbos Aussagen über die Defizite der späten Nachkriegsanthropologie in Deutschland wissenschaftshistorisch oberflächlich und unzulässig verallgemeinernd, was auch für seine vernichtende Einschätzung taxonomischer Forschung gilt. Aber wie hatte der exzellente Biochemiker Erwin Chargaff treffend geschrieben: »... die neue Wissenschaft, die aus der Verschmelzung von Chemie, Physik und Genetik hervorging, das heißt die Molekularbiologie, ist herrisch geblieben und dogmatisch.«

Neandertaler sind seit ihrer Entdeckung biologische und mythologische Gestalten. Die Paläogenetik handelt nur über Erstere, und zwar nicht in ihrer leibhaftigen Erscheinungsform, sondern in Form ihrer Überreste und ihres Probenmaterials – salopp formuliert, in ihrer pürierten Gestalt. Das mag einige interessierte Laien enttäuschen. Aber für diejenigen, die Spitzenforschung hautnah miterleben wollen, ist Pääbos höchst aufschlussreicher und überwiegend unterhaltsam und spannend geschriebener Band ein Muss.

Winfried Henke

Der Rezensent war bis 2010 Akademischer Direktor am Institut für Anthropologie der Universität Mainz und ist Mitglied der Leopoldina sowie der Leibniz-Sozietät.

UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



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



Philosophie: Zufall und Determinismus • Genetik: Die Rolle des Zufalls bei der Genexpression • Wie sieht man das Unvorhersehbare vorher? • € 8,90, erscheint am 23.5.2014



Kontrollverlust: Süchtig nach Essen • Kohlenhydrate: Was macht wirklich dick? • Biotechnologie: Steak aus der Retorte? • Genussmittel: Schatten über der Schokolade • € 8,90



Essstörungen vorbeugen, erkennen, heilen • Schule schwänzen – (k)ein Kavaliersdelikt? • Mobbing 2.0 – wie Schüler im Internet gemobbt werden • Generation Handy • € 8,90; 2. Auflage

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/neuerscheinungen

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

Hier QR-Code per Smartphone scannen!



1914

Chronometer statt Fahrplan

»Bei Außenstrecken von Straßenbahnen ist eine Orientierung des Fahrgastes über den Zeitpunkt der Ankunft des nächsten Wagens fast unmöglich. Die übliche Methode des Aushängens von Fahrplänen ist wenig zulänglich, da das Zurechtfinden in derartigen Tabellen zeitraubend ist und die genaue Kenntnis der Tageszeit zur Voraussetzung hat. Hier bietet der Wartezeitanzeiger ein praktisches Hilfsmittel. Er besteht aus einem Uhrwerk, das in ein gußeisernes Gehäuse mit Holzaufsatz wasserdicht eingebaut ist. An jeder Haltestelle hat der

Schaffner den Zeiger vermittels eines besonderen Schlüssels auf die Zahl zu stellen, die dem Abstände des nächsten Wagens entspricht. Der Zeiger gleitet mit dem Ablauf des Uhrwerkes zurück und erreicht die Zahl Null. Das Feld hierfür ist 2 Minuten lang, um geringfügige Verspätungen auszugleichen.« Die Welt der Technik 11/1914, S. 218



Schöner Warten mit dem Kurzzeitmesser.

Fest, flüssig, biegsam

»Bis vor nicht allzulanger Zeit galt es als das Kennzeichen eines Kristalls, daß er allseitig von ebenen Flächen begrenzt sei, die unter unveränderlichen Winkeln geneigt sind. Kein Wunder, daß die Entdeckung von dem Dasein flüssiger Kristalle großes Aufsehen erregte. Forscher beobachteten, daß gewisse chemische Verbindungen sich bereits im flüssigen Zustand als amorphe Tröpfchen optisch wie Kristalle verhalten. Die Amerikaner, denen die reichsten Hilfsmittel zur Verfügung stehen, gehen noch weiter. Adams zeigte, daß Kalkspat, sehr hohen Drucken ausgesetzt, sich in beliebige Formen pressen läßt. Damit ist der Beweis für die Annahme erbracht, daß die scharfe Grenze zwischen Starr, Fest und Flüssig hinfällig geworden ist.« Kosmos 6/1914, S. 272

Vom Aerogramm zur Karte

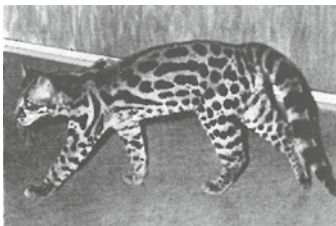
»Die Landvermessung von Luftfahrzeugen aus, die durch den mißlungenen Plan der Neuguinea-Luftschiffexpedition Interesse erregt hat, verdient Beachtung. Die Erfinder haben eine Aerokamera konstruiert, die acht in sich zusammengesetzte Bilder liefert. Die Aufnahmen sollen so übereinandergrei-

fen, daß jeder Punkt zweimal aufgenommen ist, damit ein stereogrammetrisches Verfahren Höhenschichtlinien ermittelt. Es liegt in der Eigenart des photographischen Blicks, daß viele Dinge zu Fuß festgestellt und nachgebessert werden müssen.« Centralzeitung für Optik und Mechanik 18/1914, S. 210

Außergewöhnlicher Kletterkünstler

»Als solchen kann man mit Recht den Baumozelot (*Leopardus wiedi*) bezeichnen. Spiralg um einen Baumstamm zu klettern, nur an den Hinterfüßen herabhängend mit einem Bindfaden zu spielen und vor allem kopfabwärts zu klettern, sind typische Verhaltensmerkmale. Zum Unterschied von allen anderen Katzenar-

tigen, welche den Hinterfuß höchstens bis zu 90° auswärts drehen können, kann der Baumozelot dies bis zu 180°. Die anatomische Anpassung dürfte weniger im Knochenbau als in der Ausbildung der Gelenkkapseln, der Bänder und Muskeln liegen. Die Vielzahl der Formen bei den süd- und mittelamerikanischen Kleinkatzen lassen eine Verbindung von anatomischen und Verhaltensmerkmalen als taxonomisch wertvoll erscheinen. Der Baumozelot unterscheidet sich damit eindeutig nicht nur vom Ozelot (*Leopardus pardalis*), sondern auch von der Ozelotkatze (*Leopardus tigrinus*).« Die Umschau 12/1964, S. 364



Der Baumozelot unterscheidet sich durch sein Verhalten von verwandten Arten.

Gezielte Manipulation am menschlichen Erbgut

»Neuerdings ist es dem amerikanischen Forscher Ehepaar Szybalski erstmalig gelungen, menschliche Zellen gezielt mutieren zu lassen. Die Forscher benutzten menschliche Knochenmarkszellen. Infolge einer Mutation vermochten diese Zellen ein bestimmtes wichtiges Ferment nicht zu produzieren. Das Ehepaar Szybalski isolierte nun aus gesunden Zellen die Desoxyribonukleinsäure und behandelte damit die erblich veränderten Zellen. Durch die Behandlung erlangte ein Teil dieser defekten Zellen die Fähigkeit, das Enzym zu produzieren, und

gab sie an die Tochterzellen weiter. Es war also gelungen, menschlichen Zellen auf künstlichem Wege eine gewollte Erbeigenschaft zu verleihen. Das Umwälzende dieses Versuchsergebnisses veranlaßte die »New York Herald Tribune« zu dem Ausspruch: »Könnte der Mensch Intelligenz und Gesundheit seiner Nachkommenschaft durch chemische Manipulationen steuern – er brauchte seine biologische Zukunft nicht mehr auf das blinde Vorwärtskriechen der Evolution zu bauen.« Kosmos 6/1964, S. *215

1964

WIE SCHNELL IST DIE **DUNKLE ENERGIE?**

VON JEFF HECHT

Die Innovationsvernetzungs-konferenz an der Universität lief schlecht, genau wie Boris' sonstiges Leben. Seine Postdoc-Anstellung ging zu Ende, und ohne Aussicht auf einen Job drohte ihm der Heimflug nach Novosibirsk. Seine acht Artikel in theoretischer Astrophysik würden ihm in Russland ebenso wenig einbringen wie in Amerika, aber wenigstens konnte er auf dem Sofa seines Vaters schlafen. Während Boris seinen trüben Zukunftsaussichten nachging, bemerkte er einen stattlichen, gut gekleideten Herrn, der sein Poster studierte.

»Kann ich Ihnen helfen?«, sprach er ihn höflich an, wie Professor Liu es für einen solchen, kaum erhofften Fall geraten hatte.

Der Mann nickte. »Dieses Dunkle-Energie-Zeug in Ihrem Poster lässt das Universum schneller expandieren, richtig? Wie schnell geht das?«

Auch für die Begegnung mit Laien hatte ihm sein Doktorvater einen Rat mit auf den Weg gegeben: Beantworte keine einfache Fragen mit komplexer Mathematik.

»Stimmt, die Dunkle Energie durchdringt den Raum, aber welche Geschwindigkeit meinen Sie?«

»Kann sie sich schneller als das Licht bewegen?«

Verblüfft fragte Boris: »Warum wollen Sie das wissen?«

Der Mann sah ihm tief in die Augen und senkte seine Stimme zu einem

Flüstern. »Weil ich für ein Beratungsprojekt etwas mit Überlichtgeschwindigkeit brauche.«

»Nun«, erklärte Boris zögernd und suchte nach den richtigen Worten, »ich wüsste keinen Grund, warum sie sich nicht schneller als Licht bewegen könnte.« Sein Großvater erzählte immer gern von einem Kollegen in der Breschnew-Ära, der einem General versichert hatte, er wisse nicht, warum eine Zehn-Megawatt-Laserwaffe unmöglich sein sollte. Das hatte dem Mann einen guten Job und eine Datscha verschafft, und da seine Bemerkung im strengen Wortsinn der Wahrheit entsprach und weil Breschnew nicht Stalin war, wurde auch niemand erschossen, als sich nach zwölf Jahren herausstellte, dass es nicht funktionierte.

»Kommen Sie morgen früh in mein Büro«, bat der Mann freundlich und überreichte Boris eine Visitenkarte: Andrew Harrison Harding, Professor der Wirtschaftswissenschaften.

»Es geht um Nanosekunden«, begann Harding. »Was wissen Sie über automatisierten Hochfrequenzhandel?«

Boris zuckte die Achseln. Nichts. Aber das schien sein Gegenüber nicht zu stören.

»Es ist die Art und Weise, wie die Börse heutzutage funktioniert«, fuhr der Mann fort. »Computer kaufen und

verkaufen Aktien, und jeder Broker hofft, dass sein Computer die der anderen überlistet. Aber dazu müssen sie schneller an die nötigen Informationen kommen, und das ist eine Frage der Strecken und Medien, die sie übertragen. Deshalb verläuft unser Glasfaserkabel durch den Arktischen Ozean von Tokio auf kürzestem Wege nach London. Aber nun legen unsere Konkurrenten auf derselben Route ein Kristallfaserkabel, das das Licht noch schneller leiten wird als unsere Glasfaser.«

Er hielt kurz inne und blickte Boris nachdenklich an. »Darum müssen wir jetzt Daten mit Überlichtgeschwindigkeit senden. Geht das mit Dunkler Energie?«

»An manchen Orten vielleicht«, antwortete Boris, allerdings ohne zu erwähnen, dass diese Orte jenseits des beobachtbaren Universums lagen. »Ich müsste die Details ausarbeiten. Das dauert aber seine Zeit.«

»Ich verfüge über die nötigen Mittel. Sie werden gutes Geld bekommen.«

Boris konnte zwar Gleichungen erfinden, aber keine Kabelsysteme, doch jetzt war nicht der Zeitpunkt, das klarzustellen. »Ich werde Betriebsmittel brauchen«, sagte er stattdessen.

»Ich habe Büroräume und unbegrenzten Zugang zum Quantencomputer der Universität.« Der Professor überlegte. »Sie können am Montag mit 2000 Dollar pro Woche anfangen.«

Boris lächelte. Professor Liu würde sich wundern.

Boris liebte theoretische Arbeit. Er füllte karierte Notizbücher mit Symbolen und Gleichungen. Er schrieb mathematische Formeln für die Wechselwirkungen zwischen Dunkler Energie und gewöhnlicher Materie; dann übersetzte er sie in Programmbefehle für Simulationen auf dem Quantencomputer und seinem Desktop-Supercomputer.

Er testete die Modelle wochenlang, brütete über den Resultaten, schrieb die Algorithmen um und ließ die Modelle erneut laufen. Die Ergebnisse gaben die Verteilung der Dunklen Energie relativ zur Materie zu bestimmten Zeitpunkten wieder, also berechnete er die Veränderungsrate und übersetzte das in eine Geschwindigkeit. Seine ersten Resultate lagen nahe bei null; er modifizierte das Bezugssystem und fand heraus, dass die Geschwindigkeiten ein wenig höher ausfielen, wenn er etwas mehr Raum einbezog. Ungeduldig erhöhte er den Maßstab um zehn Größenordnungen und ließ das Modell über das Wochenende laufen; er hoffte, dass bei dem Rechenaufwand nichts schmelzen würde.


Am Montagmorgen heulten die Lüfter des Desktops wie ein Windkanal, als der Computer die Ergebnisse auf einem Großdisplay darstellen sollte. Das Verteilungsmuster sah bekannt aus, doch die

Farben, welche die Geschwindigkeiten kodierten, waren ganz andere. Zu seiner Überraschung fand Boris einen gelben Fleck im Zentrum: Lichtgeschwindigkeit! Und darum herum erstreckten sich riesige grüne und blaue Gebiete, die noch höhere Werte anzeigten.

Professor Harding kam Minuten, nachdem Boris ihn angerufen hatte, und starrte auf den Wandschirm. »Wir werden bald reich sein!«, rief er. »Führen Sie das Kabel so«, sagte er und beschrieb mit seinem Arm einen Bogen.

»Kein Kabel«, erwiderte Boris. »Die Dunkle Energie durchdringt alles, somit durchquert sie auch die Erde.«

»Noch besser«, sagte der Professor. »Schreiben Sie das auf, und wir lassen es patentieren. Investoren werden uns die Tür einrennen. Ich verdopple Ihr Gehalt.«

Nachdem Harding gegangen war, spielte Boris noch eine Weile mit dem Display herum. Da er wissen wollte, wie viel Raum das Modell umfasste, ließ er den Supercomputer den Maßstab anzeigen. Kleine Worte erschienen am unteren Bildrand: »Ausdehnung des gezeigten Gebiets 10^{12} Lichtjahre.« Einige Minuten lang war er sehr stolz darauf, dass sein Modell die Grenze des bewohnbaren Universums sprengte. Dann erkannte er: Überlichtgeschwindigkeiten gab es nur jenseits davon. Äußerst bedauerlich. Vielleicht konnte er die schlechte Nachricht so lange zurückhalten wie einst der Freund seines Großvaters. 

DER AUTOR

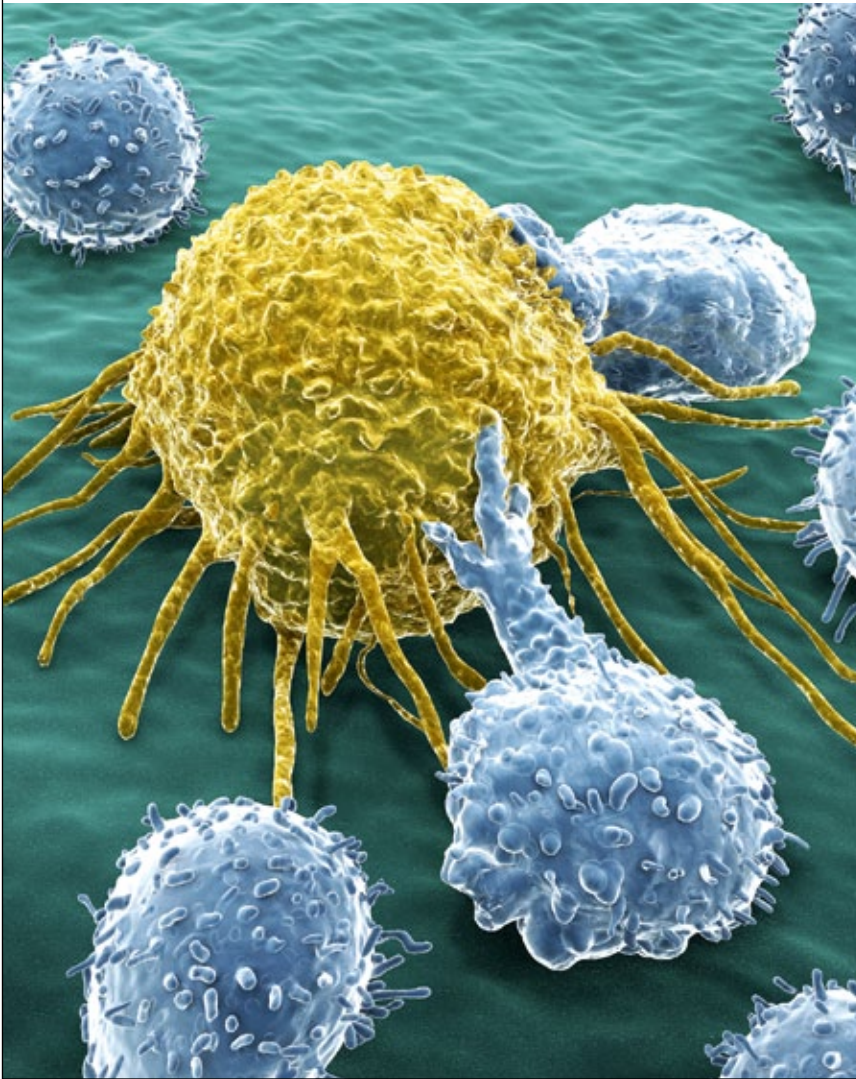
Jeff Hecht lebt in Boston (US-Bundesstaat Massachusetts). Er ist Korrespondent des britischen Wissenschaftsmagazins »New Scientist« und Redaktionsmitglied der Zeitschrift »Laser Focus World«.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 500, S. 618, 29. August 2013

Immuntherapien gegen Krebs

In den zurückliegenden Jahrzehnten haben Forscher viel darüber gelernt, wie Tumoren und Zellen des Immunsystems aufeinander einwirken. Diese Erkenntnisse lassen sich nutzen, um die Körperabwehr in den Kampf gegen Krebs einzuspannen. In einer dreiteiligen Serie stellen wir verschiedene Verfahren aus dem Bereich der Krebsimmuntherapien vor.



ISTOCKPHOTO / JUAN GARTNER

Wer waren die Etrusker?

Anhand von Inschriften und Siedlungsbefunden rekonstruieren Archäologen Aufbau und Alltagsleben einer erstaunlichen antiken Gesellschaft. Die Kultur der Etrusker unterschied sich in vielerlei Hinsicht von der ihrer Nachbarn. Es gab aber auch einen regen Ideenaustausch – in beide Richtungen.

Erste Menschen als oberste Raubtiere

Schon überraschend früh hat unsere Gattung *Homo* große Raubtiere in Afrika ausgerottet. Diese waren der menschlichen Konkurrenz um Beute und Fleisch von Anfang an nicht gewachsen.



JEN CHRISTIANSEN

Was ist wirklich?

Für Physiker besteht die Welt traditionell aus Teilchen, die sich unter dem Einfluss von Kraftfeldern bewegen. Doch mit der Quantenfeldtheorie versagen solche dinghaften Beschreibungen. Um die physikalische Realität zu charakterisieren, sind strukturierte Bündel von Eigenschaften wie Farbe und Form besser geeignet!



TIMOTHY ARCHIBALD

Hilfe für autistische Kinder

Störungen aus dem Autismusspektrum bleiben weiterhin ein medizinisches Rätsel ohne Aussicht auf wirkliche Heilung. Aber einige Therapien haben sich inzwischen sehr bewährt – und weitere befinden sich in Erprobung.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO***



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

*Für Printabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* kostenlos!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/digitalabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





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

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

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

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

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

www.academia-net.de