

ERDE 3.0

Wasserkraft:
Unerschlossenes
Reservoir in den
Weltmeeren

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

FEBRUAR 2012

EVOLUTION

Das Auge – Organ mit
Vergangenheit

STOCHASTIK

Spiel mit
Zufallszahlen

RAFFINIERTER KILLER

Die tödlichen Tricks der
Fühlerschlange

DATENNETZE

Der Licht-Turbo

Mehr Tempo durch
gespeicherte optische Pulse

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





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Wider alle Abgeschlossenheitsrhetorik!

Im Dezember 2011 meldeten Physiker des CERN, Hinweise auf die Existenz des Higgs-Bosons gefunden zu haben. Das lange gesuchte Elementarteilchen könnte eine Masse von etwa 125 Gigaelektronvolt haben; allerdings müsse der Befund noch weiter erhärtet werden. Etwas Großes liegt in der Luft. Denn sollte es den Forschern gelingen, das von Peter Higgs und anderen Physikern vor rund einem halben Jahrhundert vorhergesagte Partikel wirklich dingfest zu machen, wäre damit das Standardmodell der Elementarteilchen komplettiert, der letzte noch fehlende Baustein gefunden. Theorie und Empirie befänden sich im Einklang – die vermeintlich exakteste aller Naturwissenschaften hätte ihrem Ruf alle Ehre gemacht.

Dennoch sollten wir uns nicht zu sehr in Vollständigkeitsrhetorik ergehen. Denn wie »abgeschlossen« ist die Physik wirklich? Selbst dann, wenn wir demnächst mit dem Higgs-Boson ein sehr wichtiges Puzzleteilchen in das Bild der Physik einfügen könnten – die Metapher des fertigen Theoriekomplexes ist irreführend. Ja, sie verrät mehr über das Wunschenken von Wissenschaftlern als über die Realität der Natur. So sieht es der in Princeton lehrende Physiker Tony Rothman. In seinem Essay ab S. 61 vergleicht er das Werkeln seiner Zunft am eigenen Theoriegebäude mit einem modernen Turmbau zu Babel. Die Physik ähnele dabei einer »heruntergekommenen Struktur aus isolierten Modellen, die durch schiefe Erklärungen notdürftig miteinander verbunden sind, kurz einer Monstrosität, die himmelwärts taumelt«. Ganz Wissenschaftler, belegt der kritische Geist diese starken Worte mit Beispielen für zentrale, unbeantwortete Fragen seines Fachs: Warum kennt von allen fundamentalen Gesetzen der Physik nur der zweite Hauptsatz der Thermodynamik eine Zeitrichtung? Welchen Sinn haben unendliche Kräfte, die in manchen Teildisziplinen auftauchen? Wie kann ein Quantensystem, das durch die deterministische Schrödingergleichung exakt beschrieben wird, im Moment der Messung urplötzlich probabilistisch werden? Und weshalb können wir nur für die wenigsten physikalischen Probleme exakte Lösungen anbieten?

Wissenschaftler tun gut daran, die Schwachstellen der eigenen Theorien offen zu benennen – egal, ob sie Biologen, Neuroforscher, Chemiker oder Physiker sind. Was Rothman betreibt, ist keine Nestbeschmutzung; er warnt vor Hybris. Wenn 2012 womöglich Erfolgsmeldungen über die »Komplettierung« des physikalischen Weltbilds durch die Medien schallen, sollten wir uns daran erinnern!

Herzlich Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Biologe **Kenneth C. Catania** von der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee) stellt die raffinierte Fangmethode der Fühlerschlange vor: Sie nutzt den Fluchreflex von Fischen aus (S. 30).

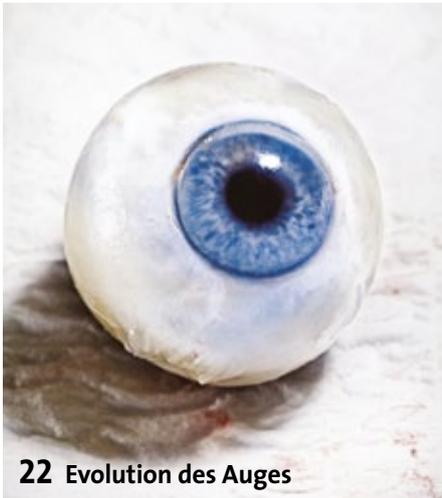


Der Neuropsychologe **Reinhard Werth** von der Ludwig-Maximilians-Universität München zeigt, dass Aufmerksamkeit kein einheitliches Phänomen ist. Vielmehr setzt es sich aus mehreren voneinander unabhängigen Teilleistungen zusammen (S. 36).



Luc Thévenaz von der École Polytechnique Fédérale de Lausanne und **Thomas Schneider** von der Leipziger Hochschule für Telekommunikation erforschen, wie sich Lichtsignale speichern lassen, um damit höhere Übertragungsraten in Datennetzen zu erzielen (S. 48).





22 Evolution des Auges



36 Rätsel Aufmerksamkeit



42 Krebs beim Beutelteufel



74 Wasserkraft für die Zukunft

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

- ▶ **22 Das Auge – Organ mit Vergangenheit**
Trevor D. Lamb
Schon vor 500 Millionen Jahren entstand das Wirbeltierauge
- ▶ **30 Die Tricks der Fühlerschlange**
Kenneth C. Catania
Eine kleine Wasserschlange nutzt raffinierte Fangtechniken
- 36 Die vielen Facetten der Aufmerksamkeit**
Reinhard Werth
Unterschiedlichste Teilleistungen ergeben ein faszinierendes Puzzle
- 42 Teuflische Krankheit**
Menna E. Jones, Hamish McCallum
Eine ansteckende Krebserkrankung droht den Tasmanischen Teufel auszurotten

- TITELTHEMA**
- ▶ **48 Der Licht-Turbo**
Luc Thévenaz, Thomas Schneider
Forscher verlangsamen Licht und speichern sogar Lichtpulse. Das könnte mehr Tempo für unsere Datennetze bringen
- 61 Die Physik – ein baufälliger Turm von Babel**
Tony Rothman
Die Physik hat ein gewaltiges Theoriegebäude errichtet, das unsere Welt erklären soll. Doch selbst in den unteren Stockwerken klaffen noch gewaltige Risse

- SCHLICHTING!**
- 66 Kunst in der Physik**
H. Joachim Schlichting
Es braucht nicht viel, damit eine glatte Flüssigkeitsoberfläche schöne Muster hervorbringt

- MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN**
- 68 Kollektive Verklemmung und das gehörnte Oktaeder**
Christoph Pöppe
Schon die Griechen der Antike hätten sie finden können: lückenlose Füllungen des Raums durch regelmäßige Körper verschiedener Kantenlänge. Aber entdeckt wurden sie erst kürzlich – von Materialforschern

Titelmotiv: iStockphoto / Mark Wragg
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

Der Licht-Turbo

Mehr Tempo für Datennetze durch gespeicherte optische Pulse



ERDE & UMWELT



SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



► 74 Die unerschöpfliche Kraft des Wassers

Robert Gast

Wir nutzen erst ein Viertel des weltweiten Potenzials der Wasserkraft. Zunehmend attraktiv wird die Energie der Weltmeere

INTERVIEW

78 »Noch ist Meeresenergie ein Abenteuer«

Kai-Uwe Graw über die Erschließung der Wellenenergie

84 Ringwallspeicher für die Energiewende

Matthias Popp

Gute Standorte für Pumpspeicher sind rar. Doch es gibt eine Alternative: Ringwallspeicher

TECHNIK & COMPUTER

► 88 Spiel mit dem Zufall

Brian Hayes

Zufallszahlen sind für vielerlei gut – etwa dazu, den Flächeninhalt kompliziert geformter Figuren zu ermitteln. Meist müssen sie aber gar nicht wirklich zufällig sein, sondern nur so aussehen. Manchmal funktionieren sogar schlechte Imitate am besten

Nach S. 94 folgt eine 20-seitige Sonderpublikation der Forschungsallianz Kulturerbe: *Dem Zahn der Zeit zum Trotz*

SPEKTROGRAMM

- 8 Kälteste Temperatur flüssigen Wassers ermittelt • Hochseefischerei vor 42 000 Jahren • Schwarze Löcher mit Rekordmassen • Dopamin gegen Tumoren • Altruistische Ratten • »Sprachgen« hilft beim Lernen

BILD DES MONATS

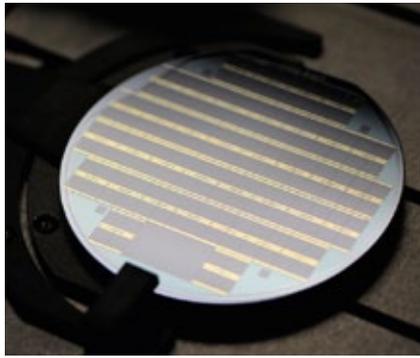
11 Elektronen-Assel

FORSCHUNG AKTUELL

- 12 **Sterne mit Raumtemperatur**
Neu entdeckte Braune Zwerge sind überraschend kühl
- 14 **Sinnvolle Selbstüberschätzung**
Die evolutionären Vorteile einer zu hohen Meinung von sich selbst
- 16 **Innenleben des Seidenfadens**
Hauchdünn und dennoch reißfest: Computersimulationen erklären die Eigenschaften der Spinnenseide
- 18 **Leuchtende Quantenmagnete**
Fein aufgelöste Spin-Information jenseits der Beugungsgrenze
- 20 **Springers Einwürfe**
Unwissen schadet nicht

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial
- 6 Leserbrief/Impressum
- 95 Rezensionen
Walter Lewin: Es funktioniert!
Marcel Robischon: Planet der Insekten
Tobias Hürter: Du bist, was du schläfst u. a.
- 100 Wissenschaft im Rückblick
Von der Dampfmaschine zur Welt-raumstation
- 101 Exponat des Monats
Das Saitengalvanometer und die Geburt der Elektrokardiografie
- 102 Vorschau



SOLAR JUNCTION

Weltrekord in der Fotovoltaik: CPV-Zellen fokussieren das Sonnenlicht um das 400-Fache und erzielen damit Wirkungsgrade von über 40 Prozent.

Wirkungsgrad der Fotovoltaik

Bernd Müller stellte Chancen und Herausforderungen einer zukünftigen Energieversorgung per Sonnenlicht vor. (»Die Zukunft der Energie, Teil 1: Sonnige Zeiten«, Dezember 2011, S. 68)

Alois Bitterli, Wiezikon (Schweiz): Die erreichten Fotovoltaik-Wirkungsgrade von CPV-Zellen sind beeindruckend, aber für eine Hausdach-PV-Anlage sind diese wegen den benötigten Lichtkonzentratoren wohl kaum einsetzbar. Darum meine Frage: Welche maximalen Wirkungsgrade von PV-Zellen, die für eine Hausdachinstallation geeignet wären, sind heute im Labor schon erreicht worden?

Antwort des Autors Bernd Müller:

Das kann man so pauschal nicht sagen, weil man nicht leicht abgrenzen kann, was für ein Hausdach geeignet ist und was nicht. Die höchsten Wirkungsgrade erreichen derzeit monokristalline Siliziumzellen. Sie kommen in der Serienfertigung auf etwa 18 und im Labor auf 25 Prozent. Polykristalline, amorphe und Dünnschichtsolarzellen liegen darunter. In dem Markt ist aber vieles in Bewegung. Ich gehe davon aus, dass Mehrschichtszellen irgendwann auch auf Hausdächer gebaut werden (Konzentratorzellen eher nicht, weil die der Sonne nachgeführt werden). Das ist aber weniger ein technisches Problem als eine Frage der Kosten.

Plädoyer für solide, langfristige Politik

Wegen des ungelösten Endlagerproblems befürwortete Michael Springer den Ausstieg aus der Kernenergie. (»Lehren aus Fukushima«, Oktober 2011, S. 20)

Otto Schult, Jülich: Der Auffassung, dass abgebrannte Brennelemente als separates Sicherheitsproblem erkannt werden müssen, stimme ich zu. Aus diesem Grund bin ich seit Jahrzehnten gegen Wiederaufarbeitung und Endlagerung, weil die Zeit dafür noch nicht reif ist. Radioaktiver Abfall, wobei es sich eigentlich um Wertstoff handelt, bedarf wegen der Strahlung besonders sorgfältiger Handhabung. Dazu ist es sinnvoll, abzuwarten, bis der Fortschritt uns die Werkzeuge an die Hand gibt, um die radioaktiven Substanzen optimal zu verarbeiten. Bis dahin muss man die nicht benötigten radioaktiven Substanzen reversibel und somit kontrollierbar zwischengelagern.

Der von unserer Regierung beschlossene kurzfristige Kernenergieausstieg ist falsch. Er ist antieuropäisch und widerspricht der globalen Energiestrategie. Dass der Ausstieg aus der Kernenergie langfristig richtig ist – und zwar global –, wird jedem klar, der sich im Internet darüber informiert, wie lange wir auf Öl, Gas und Kohle oder eben auch Kernenergie zurückgreifen können, um unseren weltweiten Energiebedarf zu decken. Über mehr als 1000 Jahre betrachtet, haben wir nur Wasser, Wind und Sonne zur Verfügung. Kurzfristig

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (vi.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
 E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinkelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
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 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Christian Hammer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Andreas Nestke, Dr. Sebastian Vogel
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (abgesehen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dözl; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Matthias O. Hüttköper, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01.2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



falsch war auch die massive Subvention von Fotozellen auf unseren Dächern und sogar Feldern. Bei uns scheint die Sonne nicht so intensiv wie in südlichen Ländern. Offenbar geschieht der Aufbau von Offshore-Windenergieanlagen ebenfalls überhastet, was Pannen beweisen. Solide Forschung und Entwicklung aus Steuermitteln und nicht durch Zwangsbeglückung des Stromverbrauchers sind die richtige Politik. Solide Politik beansprucht Zeit, die verfügbar ist, globales Denken und weltweite Kooperation.

Populationsdichten beeinflussen Biodiversität

Der Meeresforscher Craig R. McClain berichtete über das komplexe Ökosystem am Boden der Tiefsee. (»Üppige Vielfalt trotz Nahrungsmangel«, November 2011, S. 68)

Detlef Schroedter, Hamburg: Vor einigen Jahren habe ich in »Spektrum der Wissenschaft« einen Artikel gelesen, der sich mit Artenvielfalt und Populationsdichte beschäftigte. Es wurde da die »Bio«-Diversität mit Computerprogrammen getestet, indem virtuelle Populationen verschiedener Dichte und genetischer Variabilität unterschiedlichem Nahrungsangebot ausgesetzt wurden.

Das Ergebnis deckte sich mit den Aussagen des Artikels, womit die Auflistung von Tiefsee-, Land- und Süßwasserhabitaten getrost um digitale Habitate erweitert werden kann: Sehr große Populationen sind ebenso wie sehr kleine der Artenvielfalt hinderlich.

Bei einer kleinen Population drängt sich das Risiko eines raschen Aussterbens von Arten als Erklärung auf. Bei sehr großen Populationen müssen sich vorteilhafte Mutationen gegen erheblich mehr »Konkurrenz« durchsetzen, und selbst günstige Mutationen können schnell einfach durch die schiere Übermacht der Konkurrenz wieder verdrängt werden – ein Phänomen, das man übrigens auch in der Evolution der Technik kennt (man denke nur an die Dominanz des VHS-Formats bei Video-

rekordern oder von Windows als Computerbetriebssystem).

So sind große Populationen zu träge für eine schnelle Artentwicklung, kleine zu wenig resistent gegenüber Unglücken, und die höchste Biodiversität findet sich bei gemäßigten Populationsdichten.

Theorie vor der Praxis

Für die Entdeckung der Quasikristalle bekam der israelische Physiker Dan Shechtman den Chemienobelpreis 2011. (»Kristalle mit unmöglicher Symmetrie«, Dezember 2011, S. 18)

Peter Kramer, Tübingen: Der Artikel beschreibt das Experiment, auf dessen Basis Dan Shechtman 1984 das unerwartete Diffraktionsmuster der ersten Quasikristalle publizierte, das ihm den Nobelpreis für Chemie 2011 eintrug. Entgegen Ihrem Bericht ist die von Shechtman publizierte atomare Ordnung nicht zehnzählig, sondern ikosaedrisch. Sie weist damit fünfzählige Symmetrie in sechs räumlichen Richtungen aus, die senkrecht zu den zwölf paarweise parallelen Seitenflächen eines regulären Dodekaeders verlaufen. Die sichtbare zehnzählige Symmetrie des Diffraktionsmusters entsteht erst durch die Zentrosymmetrie in der Streuung an der atomaren Struktur.

Laut Artikel publizierte P. J. Steinhardt in Kenntnis der Experimente von Shechtman zusammen mit D. Levine nach wenigen Wochen eine Erklärung der Diffraktionsspektren im gleichen »Journal Physical Review Letters«. Doch schon elf Monate vor den Publikationen von Shechtman und von Levine und Steinhardt hat eine im Fachmagazin »Acta Crystallographica« (40A), S. 580–587, publizierte Arbeit von P. Kramer und R. Neri die mathematische Grundlage für Shechtmans Entdeckung geschaffen. Dort werden die erwähnten sechs fünfzähligen Richtungsvektoren als ikosaedrische Projektionen aus sechs Richtungsvektoren des sechsdimensionalen kubischen Gitters nachgewiesen. Nach den Regeln der Kristallografie für dieses Gitter werden die

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

Maxima der Diffraktion von Shechtmans ikosaedrischer Struktur bis heute durch je sechs ganze Zahlen bezeichnet. Auch die beiden von A. L. Mackay 1982 als Bausteine der ikosaedrischen Ordnung vorgeschlagene Rhomboeder werden von Kramer und Neri in Abbildung 6 ihrer Arbeit als Projektionen aus dem kubischen sechsdimensionalen Gitter erwiesen. Die Theorie wurde also vor dem Experiment gefunden und veröffentlicht.

Philip Zerner, Hannover: In Ihrem Artikel schreiben Sie, dass mit dem Oktaeder der Raum lückenlos gefüllt werden kann. Das ist nicht richtig. Im Fall des Oktaeders bleiben Lücken in Form eines Tetraeders übrig (siehe kubisch dichteste Kugelpackung).

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

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

PHYSIKALISCHE CHEMIE

Kälteste Temperatur flüssigen Wassers ermittelt

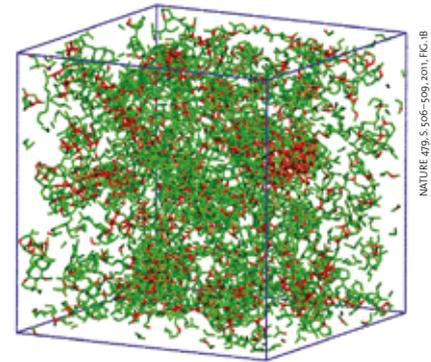
Wasser gefriert nicht zwangsläufig bei null Grad Celsius. Ohne größere Verunreinigungen, die als Kristallisationskeime dienen, kann es wesentlich weiter abkühlen, ohne zu erstarren. Die Chemikerinnen Valeria Molinero und Emily Moore von der University of Utah in Salt Lake City (USA) haben nun die Grenze entdeckt, unterhalb derer sich Wasser der Eisbildung nicht mehr entziehen kann: Bei minus 48 Grad Celsius verändert sich seine molekulare Struktur so, dass der Gefrierprozess zwangsläufig einsetzt.

Flüssiges Wasser ist ein Netzwerk aus H₂O-Molekülen, die lose über Wasserstoffbrücken miteinander verbunden sind. Beim Gefrieren bilden sich winzige Kerne aus kristallin angeordneten Molekülen. Sie können sich wieder auflösen, aber auch durch Anlagern weiterer H₂O-Gruppen wachsen. Überschreiten die kristallinen Strukturen eine bestimmte Größe, breiten

sie sich über das gesamte Volumen aus. Meist erleichtern Kristallisationskeime wie Staubpartikel oder Erschütterungen die Eisbildung.

Den Forscherinnen zufolge erstarrt völlig reines Wasser bei minus 48 Grad Celsius auch ohne diese Hilfestellung. Dann ordnen sich die Moleküle vermehrt zu Tetraedern an, in denen jede H₂O-Gruppe lose mit vier weiteren verbunden ist. Das führt dazu, dass entstehende Eiskerne von Molekülensembles umgeben sind, deren Struktur zwischen flüssig und fest liegt. Die Tetraeder stabilisieren die winzigen Eiskerne, wodurch das Wasser schneller kristallisiert und letztlich unausweichlich gefriert.

Um die Vorgänge auf molekularer Ebene genau verfolgen zu können, mussten Molinero und Moore aber auf Computermodelle zurückgreifen. Denn unterhalb von minus 41 Grad Celsius kristallisiert Wasser zu schnell, als dass



NATURE 479, S. 506–509, 2011, FIG. 1B

Wenn Wasser gefriert, nehmen große Molekülgruppen eine Struktur zwischen flüssig und fest ein (grün). Dazwischen liegen Kerne aus kristallinem Eis (rot).

sich die verbliebenen flüssigen Anteile noch experimentell untersuchen ließen. In aufwändigen Simulationen berechneten die Forscherinnen das Verhalten einiger tausend Moleküle.

Nature 479, S. 506–509, 2011

ARCHÄOLOGIE

Hochseefischerei vor 42 000 Jahren

Seit Urzeiten nutzt der Mensch Fische und Meeresfrüchte aus Küstennähe. Beweise dafür, dass er auch auf hoher See gefischt hat, gab es bislang nur aus den letzten 12 000 Jahren. Neue Funde auf der Insel Timor in Südostasien belegen nun aber, dass

Homo sapiens dort schon vor 42 000 Jahren Hochseefischerei betrieb.

Archäologen um Sue O'Connor von der Australian National University in Canberra (Australien) untersuchten die Kalksteinhöhle Jerimalai, die an der Ostküste Timors liegt. Sie entdeckten dort zahlreiche Gegenstände und Nahrungsreste, die wohl die Bewohner aus dem späten Pleistozän vor etwa 42 000 Jahren hinterlassen haben. Neben Feuersteinwerkzeugen und Muschelresten fanden sie zahlreiche Fischknochen, unter anderem von

Tunfisch. Da dieser sich normalerweise nicht in der Nähe der Küste aufhält, gehen die Forscher davon aus, dass die damaligen Menschen bereits weit aufs Meer hinausfuhren, um ihn zu fangen.

An der Fundstelle kam auch der älteste bekannte Angelhaken zu Tage, der auf 16 000 bis 23 000 Jahre datiert ist und aus dem Gehäuse einer Meeresschnecke gefertigt wurde. In jener Zeit standen oft Stachelmakrelen und Zackenbarsche auf der Speisekarte, wie die Überreste in der Höhle belegen. Diese Fische werden vorwiegend geangelt. Für Tunfische hingegen nutzten die Menschen wohl Netze, denn sie erbeuteten vorwiegend junge Tiere, die sich eher darin verfangen als ausgewachsene Exemplare.

Science 334, S. 1117–1121, 2011



SUSAN O'CONNOR, AUSTRALIAN NATIONAL UNIVERSITY

Dieser Angelhaken, gefunden im Osten Timors, stammt aus dem Pleistozän und wurde aus dem Gehäuse einer Meeresschnecke gefertigt. Gezeigt sind beide Seiten.

ASTRONOMIE

Schwarze Löcher mit Rekordmassen

Wohl alle großen Galaxien besitzen in ihrem Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch. Es sorgt bei Quasaren, den Kernen von aktiven Galaxien, dafür, dass sie intensiv leuchten. Um die Helligkeit der lichtstärksten Quasare zu erklären, die Astronomen beobachtet haben, müssen deren Schwarze Löcher mindestens zehn Milliarden Sonnenmassen enthalten. Nicholas McConnell von der University of California in Berkeley (USA) und seine Kollegen sind nun erstmals auf zwei Objekte dieser Größenordnung gestoßen.

Das Team untersuchte die elliptischen Galaxien NGC 3842 im Sternbild Löwe und NGC 4889 im Sternbild Haar der Berenike. Beide sind rund 300 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Für das Schwarze Loch im Zentrum von NGC 3842 ermittelten die Forscher 9,7 Milliarden Sonnenmassen, für jenes im Zentrum von NGC 4889 kamen sie auf etwa 21 Milliarden Sonnenmassen.

Die Wissenschaftler vermuten, dass beide Monster aus einer Verschmelzung gasarmer Galaxien hervorgegangen sind. Dabei fusionierten, so die Theorie, die zentralen Schwarzen Löcher der Vorgängergalaxien, wobei sich ihre Massen addierten.

Nature 480, S. 215–218, 2011

NASA, JPL / CALTECH

Sowohl Galaxien mit Zentralverdickung (links oben) als auch solche ohne Zentralverdickung (rechts unten) können supermassereiche Schwarze Löcher beherbergen.

MEDIZIN

Dopamin gegen Tumoren

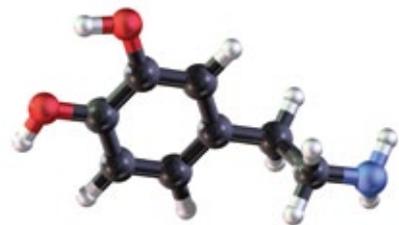
Die Blutgefäße von Tumoren sind häufig undicht, gewunden und ungewöhnlich geweitet. Dies beeinträchtigt den Blutfluss und führt zu Sauerstoffmangel in großen Teilen des Tumors, was die Krebszellen resistenter gegenüber Chemotherapien und Strahlenbehandlungen macht. Laut Forschern um Sujit Basu von der Ohio State University in Columbus (USA) kann die Substanz Dopamin, die man eigentlich eher vom Gehirn her kennt, wieder normale Verhältnisse in den Blutgefäßen herstellen.

Dopamin gehört zu den Neurotransmittern, jenen Botenstoffen, die Informationen zwischen Nervenzellen übermitteln. Es wird wegen seiner Wirkung im Gehirn häufig als Glückshormon bezeichnet. Daneben tritt es auch in anderen Geweben auf und

steuert dort wichtige Funktionen – unter anderem in Blutgefäßen.

Die Forscher um Basu pflanzten Mäusen menschliche Prostata- und Darmtumoren ein und beobachteten deren Wachstum. Zunächst stellten sie fest, dass sich in den Geschwulsten die bekannten missgestalteten Blutgefäße ausbildeten und ferner das Krebsgewebe keinerlei Dopamin enthielt. Bekamen die Tiere den Neurotransmitter jedoch sieben Tage lang regelmäßig verabreicht, normalisierte sich die Gefäßstruktur. Das förderte die Durchblutung, und der Sauerstoffgehalt im Krebsgewebe stieg an. Wie weitere Versuche zeigten, koppelt das Dopamin an spezielle Rezeptoren in den Gefäßzellen und aktiviert dadurch verschiedene Wachstums- und Transkriptionsfaktoren.

STOCKPHOTO / MARTIN MCCARTHY



Das Modell eines Dopaminmoleküls. Der Stoff kommt vor allem im Mittelhirn vor.

Für die Krebsmedizin könnte sich der Neurotransmitter gleich auf zweierlei Weise als nützlich erweisen. Indem er die Durchblutung verbessert, lässt er Krebsmedikamente leichter in den Tumor eindringen, so dass sie dort effizienter wirken. Außerdem erhöht die bessere Sauerstoffversorgung des entarteten Gewebes die Erfolgchancen einer Strahlentherapie.

PNAS 108, S. 20730–20735, 2011

VERHALTENSFORSCHUNG

Altruistische Ratten

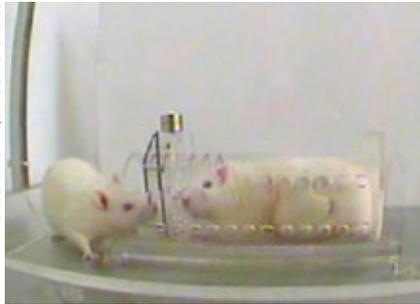
Ratten zeigen so etwas wie Mitgefühl: Sie befreien gefangene Artgenossen aus einem Käfig, selbst wenn sie sich dadurch um eine größere Portion Schokolade bringen. Das haben Wissenschaftler um Inbal Ben-Ami Bartal von der University of Chicago (USA) beobachtet. Sie deuten das Verhalten der Tiere als Ausdruck von Empathie.

Je zwei Ratten waren an diesen Experimenten beteiligt. Das frei laufende Tier hatte die Möglichkeit, die Tür eines Käfigs zu öffnen und dadurch einen gefangenen Artgenossen frei zu lassen. Anfangs umkreisten die

freien Ratten den Käfig, attackierten ihn und nahmen Kontakt mit den darin Eingesperrten auf. Nach durchschnittlich sieben Tagen hatten sie gelernt, die Tür zu öffnen, und taten es von da an zielgerichtet.

War der Käfig jedoch leer oder enthielt er eine Spielzeugratte, beachteten die Tiere ihn nicht weiter. Und wurden sie vor die Wahl gestellt, ihren Artgenossen zu befreien oder einen Käfig zu öffnen, in dem Schokolade bereitlag, taten sie beides und teilten die Süßigkeit mit den ehemaligen Gefangenen.

Die Anwesenheit einer Ratte im Käfig erregt die Neugier eines Artgenossen (links). Mit der Zeit lernt die freie Ratte, die Käfigtür zu öffnen (rechts).



INBAL BEN-AMI BARTAL, UNIVERSITY OF CHICAGO



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter

www.spektrum.de/spektrogramm

Dieses Verhalten lässt sich nicht damit begründen, dass die Ratten lediglich die Alarmrufe ihrer gefangenen Artgenossen abstellen wollten: Dazu kamen die Rufe zu selten. Reine Neugier scheidet als Motiv auch aus, da die Ratten mehr als einen Monat lang – bis zum Ende der Versuche – bei ihrem Verhalten blieben. Und dass die Tiere den Käfig zufällig geöffnet hatten, ist ebenso unwahrscheinlich, denn sie handelten im Lauf der Versuche immer schneller und zielgerichteter und zeigten sich immer weniger überrascht vom Ergebnis ihrer Aktion. Es war auch nicht die Aussicht auf sozialen Kontakt, die die Nager zur Befreiungsaktion veranlasste: Die Tiere erlösten ihre Gefährten selbst dann, wenn sie anschließend jedes Mal von ihnen getrennt wurden. Somit bleibt als plausible Erklärung nur, dass die Ratten mit ihrem Verhalten das Leid der Gefangenen beenden wollten.

Science 334, S. 1427–1430, 2011

GENETIK

»Sprachgen« hilft beim Lernen

Das Gen *FOXP2* hat großen Einfluss auf die Artikulationsfähigkeit: Funktioniert es nicht mehr, leiden die Betroffenen unter massiven Sprachproblemen. Zudem scheint zumindest seine menschliche Variante bestimmte Lernvorgänge zu fördern, wie Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig herausgefunden haben. Vielleicht half es unseren Vorfahren, sich die komplexen Muskelbewegungen anzueignen, die das Sprechen ermöglichen.

Die Forscher um Christiane Schreiwies pflanzten Mäusen die mensch-

liche *FOXP2*-Variante ein. Daraufhin lernten die Tiere deutlich leichter: Nach durchschnittlich acht Tagen Training konnten sie sich mit Hilfe von Schlüsselreizen zuverlässig in einem Labyrinth orientieren. Ihre Artgenossen, die nur die normale Mausvariante des Gens besaßen, brauchten dafür im Mittel zwölf Tage.

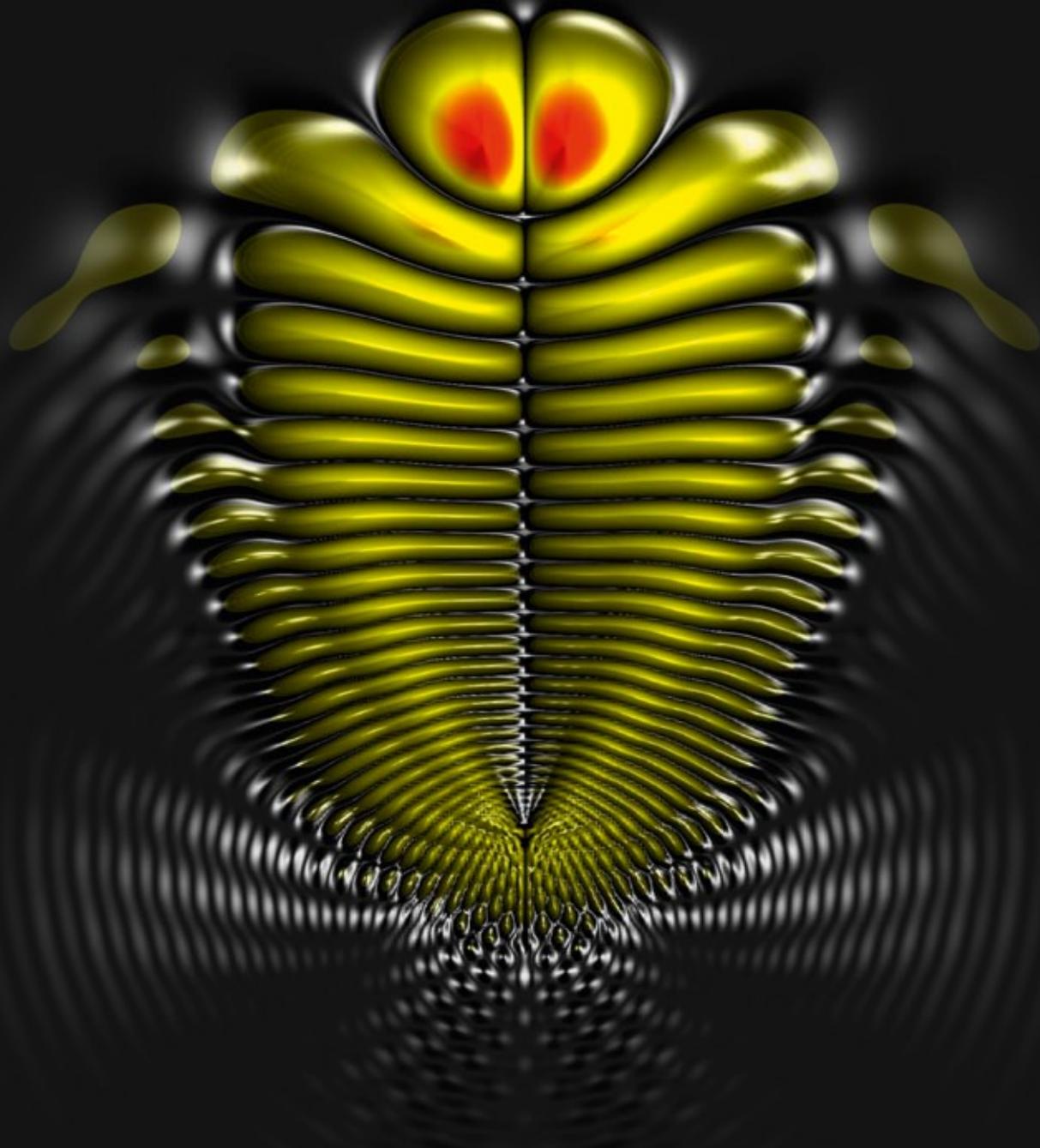
Frühere Versuche hatten bereits ergeben, dass Mäuse mit der menschlichen *FOXP2*-Version höhere Rufe ausstoßen als ihre wilden Artgenossen und sich von ihnen auch in der Verschaltung der Basalganglien unterscheiden – das sind Teile des Groß-

hirns, die unter anderem für Bewegungskontrolle und motorisches Lernen zuständig sind.

FOXP2 tritt bei den meisten Wirbeltieren in sehr ähnlicher Form auf. Es beeinflusst Hirnregionen, die am Einüben von Bewegungsabläufen mitwirken. Die menschliche Version des Gens unterscheidet sich geringfügig von der des Schimpansen, ist aber identisch mit der Neandertalervariante. Sie entstand demnach, bevor sich die Neandertalerlinie und die des *Homo sapiens* trennten – also vor mehr als 500 000 Jahren.

Nature 10.1038/nature.9395, 2011

ELEKTRONEN-ASSEL



Normalerweise sollten bei einer Verbindung aus zwei gleichen Atomen die beteiligten Elektronen gleichmäßig zwischen ihnen verteilt sein. Denn die Anziehungskraft der beiden positiv geladenen Kerne wirkt symmetrisch auf die negativ geladenen Teilchen. Bei diesem Molekül aus zwei Rubidiumatomen beruht die Bindung jedoch auf einem einzigen hochangeregten Elektron eines der beiden Partner, dessen Kern sich im unteren Teil des gelben Bereichs befindet. Das verändert die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons, dargestellt durch die ring- und wurstförmigen Strukturen auf dem im Computer berech-

neten und eingefärbten Bild. Besonders hoch ist sie im Bereich der beiden roten Flecke, zwischen denen der andere Atomkern liegt.

Damit handelt es sich hierbei um den ersten Nachweis einer Ladungstrennung innerhalb einer Verbindung aus zwei gleichen Atomen: Der Bereich des im Bild oben liegenden Atoms ist negativ geladen, der des anderen positiv. Der eigentlich zu erwartende Ausgleich findet nicht statt, weil die Atome dafür viel zu weit voneinander entfernt sind – das Molekül ist so groß wie ein Virus.

Science 334, S. 1110–1114, 2011

BRAUNE ZWERGE

Sterne mit Raumtemperatur

Mit dem Infrarotteleskop WISE haben Astronomen die bislang kältesten Zwergsterne gefunden. Einer von ihnen ist mit 25 Grad Celsius nicht einmal körperwarm.

VON JAN HATTENBACH

Eindrucksvolle 15 Millionen Grad Celsius herrschen im Kern der Sonne. Nach außen nimmt ihre Temperatur aber drastisch ab. Die sichtbare Oberfläche, die Photosphäre, bringt es auf gerade noch rund 6000 Grad. Masse-reichere Sterne erreichen hier bis zu mehrere hunderttausend, die kleinsten Exemplare immerhin noch 2000 Grad.

Noch tiefere Sternentemperaturen hatten die astronomischen Datensätze lange nicht zu bieten. Die nächstkühleren Objekte waren die Planeten. Sie besitzen kaum innere Energiequellen und

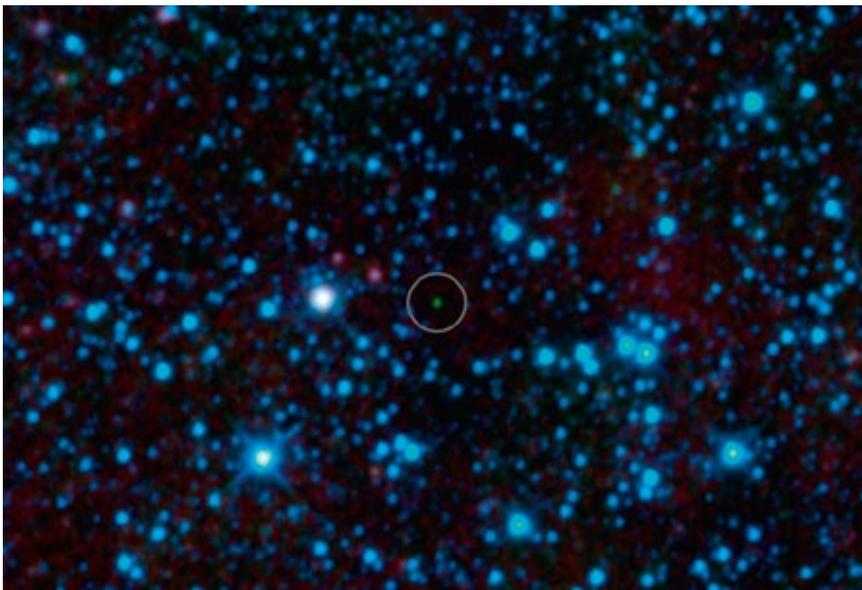
sind daher vor allem auf die Strahlung ihrer Zentralsterne angewiesen. In Jupiters äußeren Atmosphärenschichten messen die Forscher darum minus 110 Grad, beim sonnenfernsten Planeten Neptun nur noch minus 200 Grad.

Mittlerweile aber sind Forscher in die »Lücke« zwischen Planeten und Sternen vorgestoßen. Schon vor einigen Jahrzehnten hatten sie vermutet, dass man hier gescheiterte Sterne finden könnte: Objekte, die groß genug sind, damit in ihrem Innern zumindest zeitweise Kernfusionsprozesse einset-

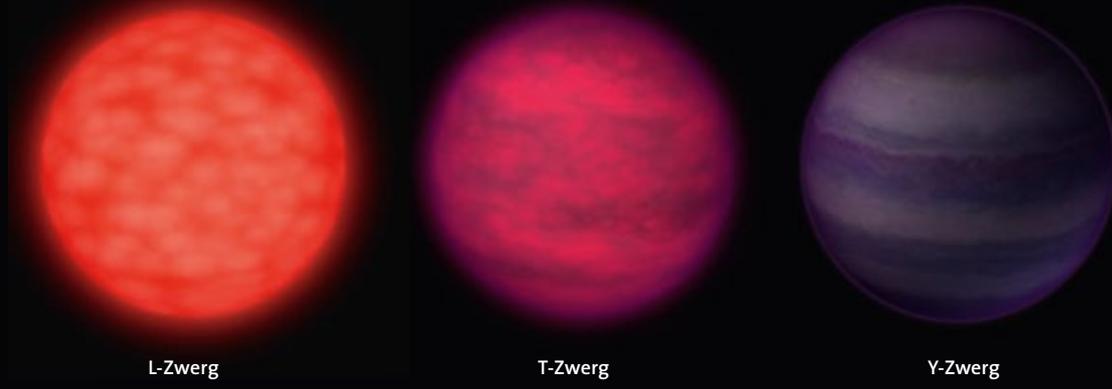
zen, aber zu klein, als dass sie daraus zuverlässig für lange Zeit Energie gewinnen könnten. Diese Braunen Zwerge, wie sie in den 1970er Jahren von der berühmten SETI-Forscherin Jill Tarter (SETI: englisch für Suche nach außerirdischer Intelligenz) getauft wurden, besitzen der gängigen Theorie zufolge mindestens 13, aber nicht mehr als 75 bis 80 Jupitermassen. Sie strahlen nur wenig sichtbares Licht ab und sind damit ähnlich schwierig aufzuspüren wie Planeten um andere Sterne. Tatsächlich wurden die ersten von ihnen etwa zeitgleich mit den ersten Exoplaneten Mitte der 1990er Jahre entdeckt. Und das, obwohl es höchstwahrscheinlich viel mehr Braune Zwerge als »richtige« Sterne gibt.

Ihre Wärmestrahlung macht sie zu lohnenden Zielen für Weltrauminfrarotteleskope wie Spitzer, Herschel oder WISE. Sie sind Gegenstand vieler Fragen: Wo liegt die Massenuntergrenze, bis zu der sich normale Sterne bilden, und was folgt daraus für ihre Entstehungsprozesse? Welche zusätzlichen Entstehungsmechanismen kommen für Braune Zwerge in Frage? Wie können die Astronomen extrasolare Planeten sicher von kühlen Sternen unterscheiden? Und welche besonderen Beobachtungschancen bieten die Objekte? Schließlich dürften sie auch in nächster Nähe zur Erde häufig vorkommen.

Die kältesten Braunen Zwerge weisen Oberflächentemperaturen von mehreren hundert Grad Celsius auf. Dies war



Mit rund 25 Grad Celsius Oberflächentemperatur ist der Braune Zwerg WISE 1828+2650 (grüner Punkt in Bildmitte) der kälteste, den wir bislang kennen. Wie bei anderen Vertretern dieses Sterntyps reichte seine Masse nicht aus, um in seinem Innern die Kernfusion zu zünden. Das Infrarotbild ist farbkodiert: Rot steht für die längsten, Grün für mittlere und Blau für die kürzesten Wellenlängen.



zumindest bis vor Kurzem stand der Dinge. Mit Hilfe des Satelliten WISE (Wide Field Infrared Explorer), der den Himmel bis zum Februar 2011 im Infrarotlicht beobachtete, konnten die Forscher die Werte jüngst noch weiter hinunterschrauben. Michael Cushing vom California Institute of Technology in Pasadena und seine Kollegen fanden sechs Exemplare, deren Photosphären nicht einmal 250 Grad Celsius heiß sind – Backofentemperatur. Den Rekord bricht aber WISE 1828+2650. Die Photosphäre des etwa 30 Lichtjahre entfernten Objekts bringt es auf gerade einmal 25 Grad, weniger, als im Innern des menschlichen Körpers herrscht. Klassische Sterne werden mit abnehmender Temperatur in die Spektralklassen O, B, A, F, G, K und M eingeteilt («oh be a fine girl kiss me», so der Merkspruch); die Sonne etwa ist ein G-Stern. Für Braune Zwerge existierten bislang lediglich die Klassen L und T. Die sechs kürzlich entdeckten Exemplare sind nun aber so kühl, dass sie der neuen Spektralklasse Y zugeordnet werden müssen, berichteten Cushing und seine Kollegen in der Fachzeitschrift »Astrophysical Journal«.

Viele der Objekte bilden sich vermutlich genau wie sonnenähnliche Sterne beim Kollaps großer Gaswolken. Das belegen unter anderem Aufnahmen von Spitzer, auf denen spanische Astronomen 2009 ein Paar Brauner Zwerge entdeckten, die noch im Entstehen begriffen sind. Bereits vier Jahre

Astronomen teilen Braune Zwerge in drei Spektralklassen ein. Die Atmosphären typischer L-Zwerge besitzen eine Temperatur von rund 1400 Grad Celsius, während T-Zwerge etwa 900 Grad warm sind. Die nun entdeckten Exemplare wurden in die neue Spektralklasse Y eingeteilt, die von etwa minus 100 bis plus 300 Grad Celsius reicht. L- und T-Zwerge besitzen tatsächlich ungefähr die Farben, in denen sie in der Illustration dargestellt sind. Der abgebildete Y-Stern wurde hingegen im Infraroten entdeckt; seine Einfärbung entspricht vermutlich nicht der Realität.

zuvor hatten Forschergruppen mehrere junge Braune Zwerge gefunden, die ähnlich wie junge Sterne von Staubscheiben umgeben sind. Die Forscher vermuten, dass sich aus ihnen einmal Miniaturplanetensysteme formen könnten – ein tausendstel Mal so groß wie unser eigenes.

Manche Zwerge senden periodisch Radiopulse aus

Einer der Zwerge besaß gerade einmal das Achtfache der Jupitermasse. Würde er einen Stern umrunden, hätte man ihn ohne Weiteres als Planet klassifiziert, zumal sich Braune Zwerge auch ähnlich wie Planeten in den Gas- und Staubscheiben junger Sterne bilden könnten. Als denkbarer Entstehungsprozess gilt zudem, dass bei der Begegnung junger Sterne Gasmassen verwirbelt werden, die sich anschließend zu Braunen Zwergen verdichten, wie Modellrechnungen kanadischer Astrophysiker bereits 2006 zeigten. Noch ist allerdings unklar, welche der gegenwärtig diskutierten Varianten vorherrscht.

Manche der Objekte senden intensive periodische Radiopulse aus, wie

US-Astronomen mit Hilfe der Radioteleskope des Very Large Array in New Mexico 2007 überraschend herausfanden. Verantwortlich dafür dürfte die Rotation des Sterns und seiner Magnetfelder sein – wie bei Pulsaren, den ausgebrannten Resten einstmaliger massereicher Sterne. Zuvor hatte man allerdings geglaubt, die Felder müssten extrem stark sein, um das Phänomen hervorzurufen.

In galaktischen Maßstäben sind uns die meisten der bislang gefundenen Zwerge sehr nah. Die von Cushing entdeckten Exemplare befinden sich in lediglich 9 bis 40 Lichtjahren Entfernung. Wenn sich die Messungen bestätigen, könnte WISE J1541-2250 sogar zur neuen Nummer sieben der sonnen nächsten Sterne werden. Und weil die Jagd nach den kühlen Zwergsternen derzeit sehr erfolgreich ist, könnte eine Neuentdeckung sogar dem sonnen nächsten Stern Proxima Centauri schon bald den Rang ablaufen.

Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er bloggt auf www.scilogs.de/kosmo/blog/himmelslichter.

Sinnvolle Selbstüberschätzung

Von sich selbst eine zu hohe Meinung zu haben, hat im Alltag oft negative Konsequenzen. Doch nach einer neuen evolutionstheoretischen Studie bringt es zumindest dann einen Vorteil, wenn der lockende Gewinn das Risiko übersteigt.

VON MATTHIJS VAN VEELN UND MARTIN A. NOWAK

Man braucht nur Menschen mit Führerschein zu fragen: Die allermeisten glauben, sie fahren besser Auto als der Durchschnitt. Ob wir unsere geistigen Fähigkeiten, unsere Attraktivität oder die psychische Normalität unseres Verhaltens bewerten sollen – stets kommt Ähnliches heraus: Normalerweise schätzen wir uns selbst zu hoch ein. Das zeigte auch eine große amerikanische Studie zur Selbstbewertung von einer Million Oberschülern. Volle 70 Prozent der Jugendlichen hielten sich für überdurchschnittlich, dagegen nur zwei Prozent für unterdurchschnittlich. Amerikanische Collegeprofessoren toppen das noch: Ganze 94 Prozent von ihnen glauben, dass ihre Lehrqualität über dem Mittelwert liegt.

Natürlich können diese Leute mit ihrer Selbsteinschätzung nicht alle Recht haben. Trotzdem ist eine solche Einstellung keineswegs unsinnig oder gar krank. Gerade geistig völlig gesunde Personen erfreuen sich so genannter posi-

ver Illusionen. Das heißt, sie pflegen ihre eigenen Fähigkeiten ebenso wie ihren Einfluss auf andere zu überschätzen, während sie hingegen Gefahren und Risiken für sich selbst gern verkennen und als nicht so schlimm abtun. Sicherlich gibt es auch Menschen, die damit übertreiben und unmäßig große Stücke auf sich halten. Dazu gehören narzisstische Persönlichkeitsstörungen und der Größenwahn. Bei gesunder Selbstüberschätzung hingegen sieht man sich anscheinend oft nur ein klein wenig zu rosig. Wieso ein leicht überhöhtes Eigenbild so oft auftritt und weshalb es von Vorteil ist, erklären der Biologe und Politologe Dominic D. P. Johnson von der University of Edinburgh und der Sozialwissenschaftler James H. Fowler von der University of California in San Diego anhand eines Evolutionsmodells (*Nature* 477, S. 317, 15. September 2011).

Evolutionstheoretiker fragten sich schon länger, wieso die Neigung von Menschen zu einem überhöhten, somit falschen Selbstbild der natürlichen Selektion überhaupt standhält. So stark verbreitet wie diese Eigenschaft unter uns offenbar ist, muss sie wohl irgendeinen evolutionären Anpassungswert haben. Nur: Was kann gut daran sein, sich selbst so gern falsch zu beurteilen? Verführt das nicht auch zu schmerzhaften Fehlentscheidungen?

Einige Forscher vermuteten den Vorteil darin, dass auf Grund unseres selbstgewissen Auftretens auch andere von uns eine hohe Meinung gewinnen. Denn es vermag nun einmal niemand seine Mitmenschen besser von den eigenen Qualitäten zu überzeugen als derjenige, der fest an sich selbst glaubt. Ebendieser Zusammenhang sollte demnach im

Lauf der Evolution die Selbstbeurteilung hochschaukeln. Gelegentlich mögen uns dann zwar Fehler unterlaufen, doch sollte die hohe Wertschätzung, die wir erfahren, kleine Misslichkeiten aufs Ganze gesehen überwiegen.

Aber Johnson und Fowler erklären das Phänomen nun ganz anders. Ihrem Modell zufolge verhilft einem ein falsches Selbstbild sogar eher zu einer vorteilhaften Entscheidung als ein reelles. Wieso? Die beiden Forscher verwenden bei ihrer Untersuchung das Werkzeug der Spieltheorie (siehe »Stichwort«), weichen allerdings in einem wesentlichen Aspekt davon ab. Und zwar setzen sie nicht allein auf rationale oder quasi-rationale Entscheidungsprozesse.

Suche nach der besten Strategie

Ihr Ansatz geht wie folgt: Angenommen, es gibt eine wertvolle Ressource, und zwei Individuen können jedes für sich entscheiden, ob sie darauf Anspruch erheben. Möchten beide das begehrte Objekt haben, werden sie im einfachsten Fall darum kämpfen – ein für beide Seiten kostspieliger Einsatz, bei dem der Stärkere gewinnt. Falls nur einer die Ressource anstrebt, erhält derjenige sie natürlich ohne Kampf. Falls von vornherein keiner von ihnen einen Anspruch erhebt, gehen zwangsläufig beide leer aus.

Nun wäre es denkbar, dass jeder die Kampfstärke des anderen schon vorher ganz genau einschätzen kann. Dann wäre die beste Strategie, als Stärkerer zu kämpfen und als Schwächerer nachzugeben. Interessant wird es aber, wenn sich die Stärke des anderen nicht präzise erkennen lässt. Unter Umständen gibt jemand dann sofort klein bei, weil er

Stichwort

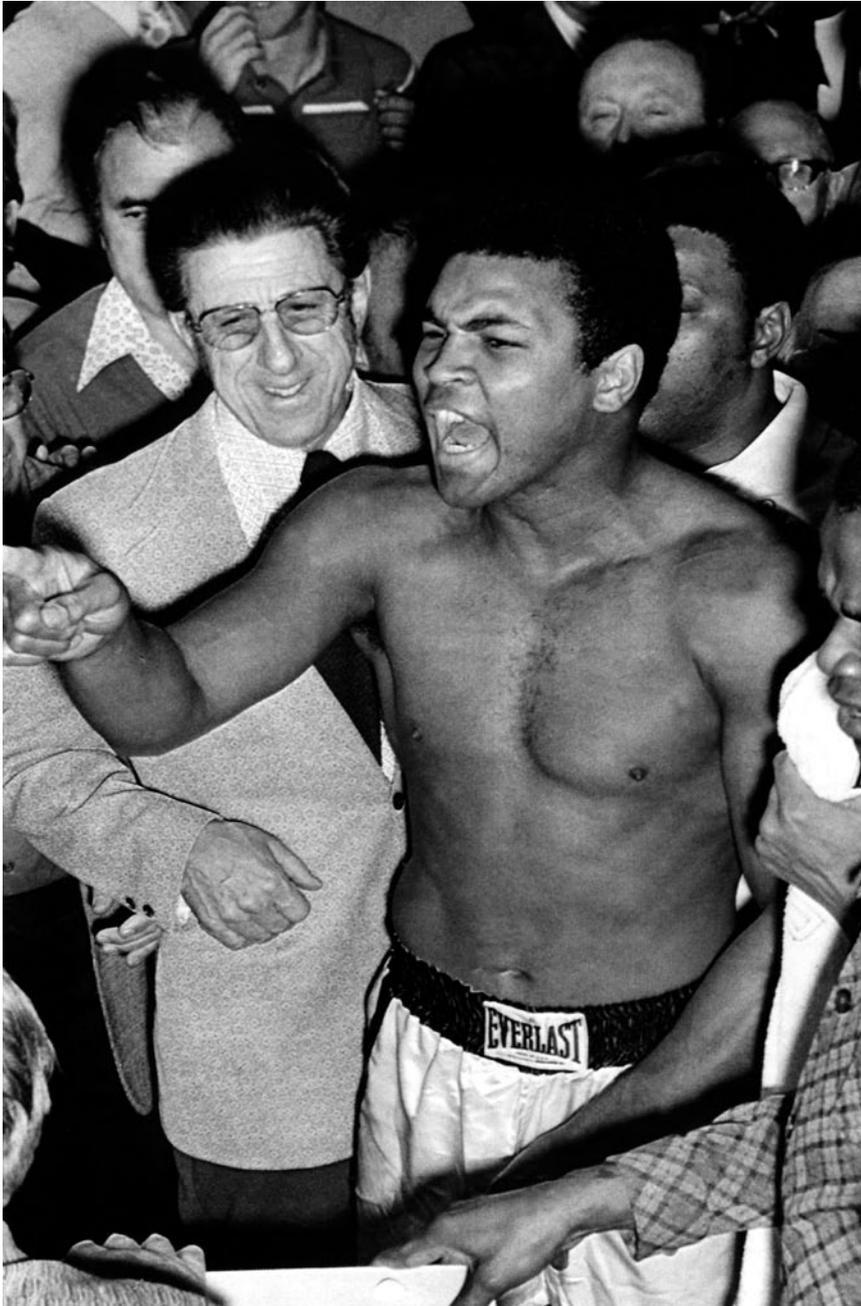
Das hier diskutierte Modell lehnt sich an die evolutionäre Spieltheorie an, die Biologen in Abwandlung der Spieltheorie der Ökonomie entwarfen. Letztere untersucht in mathematischen Modellen Hintergründe von Entscheidungsstrategien und fragt dabei insbesondere nach der dahinterstehenden Rationalität. Erstere befasst sich mit der Evolution von Verhaltensstrategien, das heißt komplexen Verhaltensabläufen, bei Tier und Mensch.

den Gegner für kräftiger hält, als dieser wirklich ist. So könnte manchmal sogar der Schwächere den Sieg davontragen.

Ökonomen entwerfen für solche Konstellationen gern Szenarien, in denen absolute Rationalität herrscht: Die Kontrahenten durchschauen ihre Situation vollkommen. Und sie kennen ebenso die Entscheidungshintergründe des Gegners. Sie wissen also auch, welche Chancen sich der andere für eine

bestimmte Situation gegen sie ausrechnet, und versuchen das bei ihrem eigenen Verhalten zu berücksichtigen.

Johnson und Fowler halten stattdessen eine Konstellation mit verkürztem, knapperem Entscheidungsweg für plausibler, bei dem Rationalität nur einen Teil ausmacht. In ihrem Modell kommt zu einer einfachen rationalen Komponente (»Kämpfe, wenn du der Stärkere bist«) ein schiefes Selbstbild



Der Boxer Cassius Clay alias Muhammad Ali machte in den 1960er und 1970er Jahren nicht nur durch Weltmeistertitel von sich reden, sondern noch mehr durch übersteigerte Selbstinszenierung und markige Sprüche.

Wissenschaft
+ Verständlichkeit
+ Öffentlichkeit
KlarText!

Bewerben Sie sich

um KlarText!, den Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft 2012.

Die Klaus Tschira Stiftung zeichnet jährlich Wissenschaftler aus, die die Ergebnisse ihrer herausragenden Dissertation in einem allgemein verständlichen Artikel beschreiben.

Jeder Bewerber hat die Möglichkeit, am Workshop Wissenschaftskommunikation teilzunehmen.

Bewerbungsbedingungen

- Promotion 2011 in Biologie, Chemie, Informatik, Mathematik, Neurowissenschaften, Physik oder einem angrenzenden Fachgebiet
- Herausragende Forschungsergebnisse
- Ein allgemein verständlicher Textbeitrag über die eigene Forschungsarbeit
- Einsendeschluss: 29. Februar 2012

Mitmachen lohnt sich

- 5000 Euro Geldpreis pro Gewinner in jedem der sechs Fachgebiete
- Veröffentlichung der Siegerbeiträge
- Teilnahme der Gewinner an den Kommunikationstrainings der Klaus Tschira Stiftung

hinzu. Dieses kann überhöht, aber auch zu bescheiden sein.

Nun hängt es vom Wert der Ressource gegenüber den Kosten eines Kampfeinsatzes ab, welches Verhalten in einer Situation am günstigsten ist: gleich klein begeben oder die Ressource wenn nötig erkämpfen. Fällt ihr Wert stärker ins Gewicht als die möglichen Einbußen, lohnt ein wenig Selbstüberschätzung durchaus. Denn dann zählt das Risiko, dass es zum Kampf kommt, eher wenig im Vergleich zu dem hohen Gewinn, der anfallen kann, wenn einem keiner die Ressource streitig macht.

Im umgekehrten Fall, wenn die Kampfkosten den Gewinn übersteigen, sollte man die eigene Stärke lieber etwas zu niedrig bewerten. Genau genommen sind die Verhaltenskonstellationen des Modells von Johnson und Fowler allerdings komplexer als hier beschrieben. Beispielsweise könnte sich in Populationen mit der Zeit ein stabiles Verhältnis von Selbstüberschätzern und Selbstunterschätzern herausbilden.

Allerdings ließe sich überhöhte Selbstachtung evolutionär auch noch anders erklären. Ein gutes Beispiel dafür ist Roulette: Wer fest daran glaubt, dass sein Einsatz irgendwann alles abräumt, der spielt immer wieder – auch wenn er ständig verliert. Doch die Gewinner sind in der Regel ebensolche Vielspieler. Wo der Gewinner alles bekommt, herrscht somit eine starke Selektion auf Selbstüberschätzung.

Theoretisch könnte die Gewinnstrategie – die hohe Kampfkosten vermeidet – im Gehirn auf zwei Weisen verankert sein. Entweder kämpfe nur, wenn du dich für stärker hältst, aber überschätze dich dabei ruhig etwas. Bei der zweiten Möglichkeit herrscht perfekte Rationalität, also komplette Einsicht in die Situation, und die Selbsteinschätzung entspricht der tatsächlichen Kampfstärke. Falls nun der Kampfausgang vorher nicht ganz sicher ist, lohnt es sich aber, auch gegen einen etwas stärker scheinenden Gegner anzutreten. Welche Möglichkeit unser Verhal-

ten besser beschreibt, müssen zukünftige Studien erweisen.

Aufschlussreich wäre herauszuarbeiten, wie die Befunde des Modells und verschiedene Alltagssituationen zusammenhängen: bei überhöhtem Selbstvertrauen im Handel; bei der Bereitschaft, übermäßig komplexe Finanzprodukte zu kaufen (angeblich Hintergrund der Finanz- und Bankenkrise); bei politischen Entscheidungen, die zu Kriegen führen. Wenn sich 94 Prozent der amerikanischen Collegeprofessoren für überdurchschnittlich gut halten, müsste bei ihnen ja genügend Selbstvertrauen herrschen, um sich an solche Fragen heranzuwagen.

Matthijs van Veelen forscht an der Universität Amsterdam, **Martin A. Nowak** ist Professor an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts).

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 477, S. 282–283, 15. September 2011

MOLEKÜLSIMULATION

Das Innenleben des Spinnfadens

Hauchdünn und dennoch unglaublich reißfest – Spinnenseide hat erstaunliche Eigenschaften. Computersimulationen ihres inneren Aufbaus zeigen, warum.

VON FRAUKE GRÄTER

Ein Spinnennetz ist ein kleines Wunderwerk der Natur. Im Gegensatz zu anderen Materialien wie Stahl oder Kunststoff kombiniert die Spinnenseide zwei Eigenschaften, die auf den ersten Blick unvereinbar scheinen: Erstens reißt selbst ein hauchdünner Faden erst bei vergleichsweise sehr hohen Zugkräften. Zweitens kann er stark gedehnt werden, bevor er bricht – nämlich um das Zwei- oder sogar Dreifache seiner Länge, je nach Spinnen- und Seidenart.

Physikalisch gesprochen ist die Arbeit, die man beim Ziehen leistet, gleich Kraft mal Weg (hier die Ausdehnung). In einen Seidenfaden kann man also

sehr viel mechanische Arbeit hineinstecken. Diese Eigenschaft bezeichnet man in der Mechanik auch als Zähigkeit. Zum Vergleich: Stahl bricht zwar erst bei hohen Kräften, verändert dabei seine Länge aber nur wenig. Ein konventionelles Gummiband hingegen lässt sich sehr stark dehnen, reißt jedoch schon bei relativ geringer Krafteinwirkung. Übrigens kommen auch die Fäden der Seidenraupen, die zu Stoffen verwoben werden, in dieser Hinsicht nicht an die Spinnenseide heran.

Woran liegt es, dass die Seidenfäden der Spinne diese besonderen Eigenschaften besitzen? Schon seit Jahrzeh-

ten versuchen Forscher, ihr Geheimnis zu lüften. Optimal wäre es, die einzelnen Verformungen von Molekülen innerhalb des gespannten Fadens in Echtzeit verfolgen zu können. Nur lassen sich leider die Bausteine der Seidenfaser nicht so einfach voneinander trennen, um sie einzeln zu studieren. Versucht man das, verlieren sie ihre charakteristischen strukturellen und mechanischen Eigenschaften, die sie im Gesamtzusammenhang des Seidenfadens besitzen. Selbst wenn man alle diese Eiweißbausteine im Labor zusammennimmt, ist es kaum möglich, daraus einen guten Faden zu spinnen,

so wie es die Spinne schafft. Hinzu kommt, dass sich die entscheidenden Eigenschaften des Seidenfadens erst im Nanometerbereich (milliardstel Meter) finden und dadurch nur indirekt beobachten lassen, zum Beispiel mit Röntgenstreuung.

Zerstückeln im Computer

Angesichts solcher Hürden helfen Simulationen mittels Computer, wie wir sie am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) in der Gruppe für »Molecular Biomechanics« durchführen. Dabei können wir, anders als im Labor, die Seide in kleinste Untereinheiten zerteilen, diese quasi beliebig neu kombinieren und daraus Rückschlüsse auf die Fäden als Ganzes ziehen.

Die Fasern bestehen hauptsächlich aus zwei sehr ähnlichen Eiweißbausteinen: dem Spidroin-1 und -2. Zusammen bilden die Proteine zwei unterschiedliche Phasen, in denen aber jeweils beide Moleküle vorkommen – das lässt sich durch Röntgenstreuung an einzelnen Fasern messen. Die eine Phase ist kristallin, also hochgeordnet, und die Proteinketten sind entlang der Achse der Faser ausgerichtet. Die andere Phase erscheint stark ungeordnet mit ineinander verknäuelten Ketten, ähnlich wie eine Portion gekochter Spaghetti auf dem Teller. Zwar lassen sich mit Experimenten die Details der Phasen nur schwer erfassen, doch konnten wir ihre molekulare Struktur am Computer nachbauen.

Wir haben hierfür Modelle entwickelt, welche die genaue Anordnung der Atome dieser Strukturen zueinander aufzeigen. Nun können wir am Computer solch ein Modell unter eine hohe Zugspannung setzen und in aufwändigen Simulationen beobachten, wie es sich verformt und letztendlich bricht (*Biophys. J.* 100, S. 1298–1305, 2011). Das Ergebnis einer solchen Molekulardynamiksimulation zeigt Bild a (im Kasten rechts). Hier simulierten wir einen Seidenkristall der Spinne, aus dem ein einzelner Proteinstrang herausgezogen wird – ein Vorgang, der Kräfte von einigen Nanonewton erfordert. Diese Werte sind natürlich winzig im Vergleich zu den Kräften im Newtonbereich, mit de-

nen wir im Alltag zu tun haben. Doch für das Auseinanderziehen von anderen Proteinen braucht man laut Studien von uns und anderen Forschungsgruppen nur ein paar hundert Pikonewton, also etwa eine Größenordnung weniger. So betrachtet ist der kristalline Baustein der Seide extrem reißfest. Vermutlich ermöglicht es die besondere Struktur der kristallinen Einheiten, die Proteinketten so miteinander zu verknüpfen, dass eine Seidenfaser großen Kräften standhalten kann, ohne zu reißen.

Woher rührt dann die Fähigkeit des Fadens, sich so stark auszudehnen? Der Kristall selbst lässt sich nur um drei bis fünf Prozent dehnen, bevor er entzweibricht, trägt also nur geringfügig zur

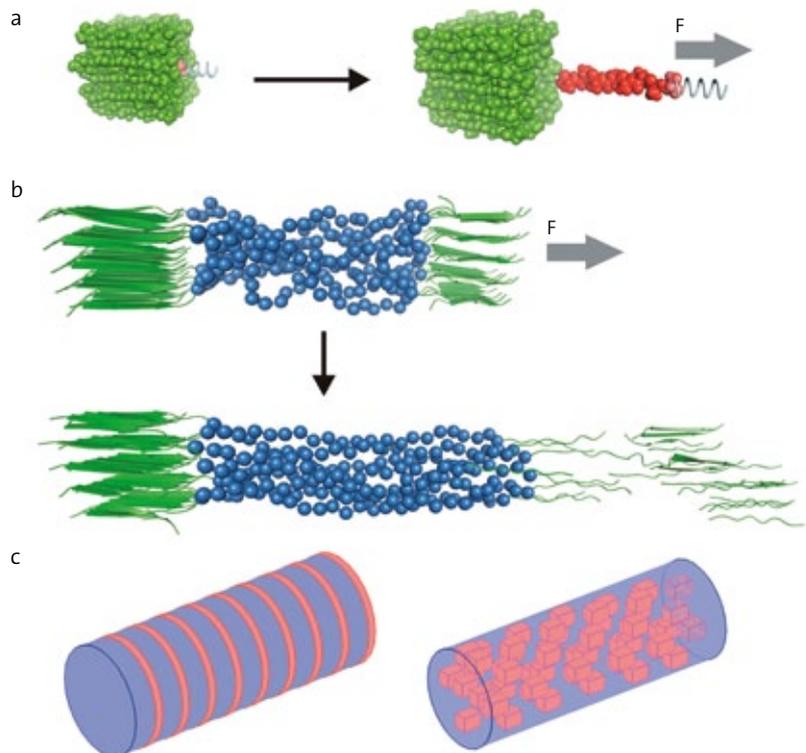
Elastizität der Seide bei. Unsere Computersimulationen zeigten, dass hierfür stattdessen die amorphe, ungeordnete Phase verantwortlich ist. Wir haben am Computer zwei Kristalle über ungeordnete Proteinketten miteinander verknüpft und der Zugspannung ausgesetzt. Die Proteinketten ließen sich dabei auf etwa die doppelte Länge strecken. Erst dann waren die Kräfte in den Kristallen so hoch, dass sie anfangen aufzubrechen (Bild b).

Ein wesentliches Geheimnis der Seidenfäden liegt also im Zusammenspiel der zwei Phasen. Aus der Simulation folgerten wir, wie die beiden zueinander angeordnet sein sollten, damit sie optimal »zusammenarbeiten«: Anstatt

Computermodell der Seidenfaser

Aus einem Seidenkristall (grün), wie er in Spinnenfäden vorkommt, wird in einer Computersimulation ein Seidenprotein (rot) herausgezogen (a). Seidenkristalle können wesentlich größeren Zugkräften standhalten als andere Proteine dieser Größe.

Die Elastizität einer Seidenfaser entsteht durch die Streckung von verknäuelten Proteinsträngen (blau) zwischen den Kristallen (grün) (b). In dem neuen Modell einer gesamten Seidenfaser (c) können die Kristalle (rosa) entweder in Scheiben angeordnet vorliegen (links) oder zufällig in der amorphen Phase (blau) verteilt sein (rechts). Ersteres führt zu einer höheren mechanischen Belastbarkeit.



FRAUKE GRÄTER

einer zufälligen Verteilung im Faden, wie sie bisher gemeinhin für Seide angenommen wurde, erweist sich eine Anordnung in Scheiben als vorteilhaft (Bild c, links). Das sorgt für eine homogene Kraftverteilung und dadurch für maximale Belastbarkeit.

Mit einer bewährten Methode aus dem Bauingenieurwesen, der Finite-Elemente-Analyse, bestätigten wir dies. Die oben beschriebenen Molekulardynamik-

simulationen sind nämlich so aufwändig, dass nur ein paar der Bausteine damit berechnet werden können – und selbst das dauert mehrere Wochen. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Analyse konnten wir stattdessen ganze Seidenfasern simulieren. Demnach führt die parallele Anordnung der geordneten und ungeordneten Phasen in Scheiben zu höherer Stabilität. Optimal ist dabei ein kristalliner Anteil von 10 bis 40 Prozent.

Inwieweit die Natur dieses Bauprinzip in der Seide umsetzt, darüber sind sich die Forscher noch nicht einig. Doch laut unseren Simulationen sollte es angestrebt werden, wenn es darum geht, ein Material mit Eigenschaften wie denen der Seide zu entwerfen.

Frauke Gräter leitet seit 2009 die Forschungsgruppe Molecular Biomechanics am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS).

NANOPHOTONIK

Leuchtende Quantenmagnete unterm Mikroskop

Ein Trick, der vor über zehn Jahren die Fluoreszenzmikroskopie revolutionierte, setzt bei magnetischen Quantenspeichern buchstäblich neue Maßstäbe. Die STED-Technik, mit deren Hilfe Forscher die Auflösungsgrenze im Lichtmikroskop überwinden, registriert nun auch in winzigen Störstellen von Diamanten gespeicherte Informationen.

VON MIKE BECKERS

Mehr als ein Jahrhundert lang galt in der Mikroskopie ein unumstößliches Gesetz: Die Wellenlänge des Lichts, das auf ein Untersuchungsobjekt fällt, bestimmt die erreichbare Auflösung. Nur Strukturen, die größer sind als etwa 200 Nanometer, lassen sich im sichtbaren Licht noch unterscheiden.

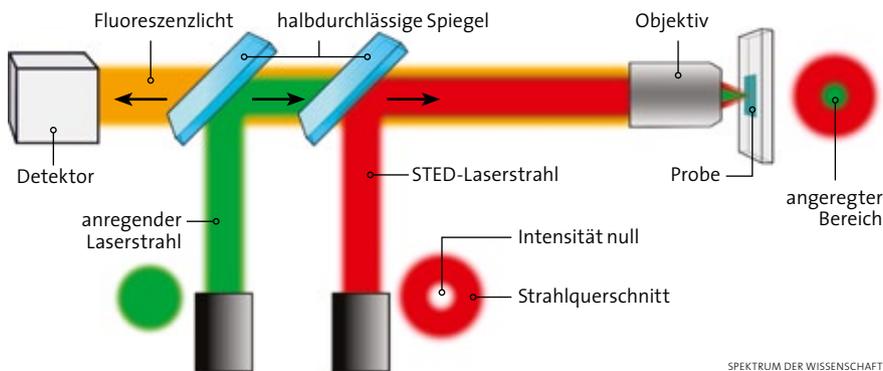
Bei kleineren dominieren Beugungseffekte – dann verschwimmt das Bild.

Diese fundamentale Einschränkung überwinden Forscher unter anderem mit der STED-Mikroskopie (stimulated emission depletion). Ihr Erfinder ist Stefan Hell, heute Direktor am Göttinger Max-Planck-Institut für biophysikali-

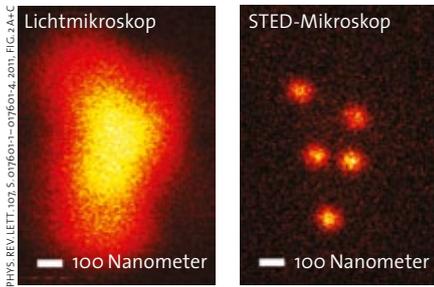
sche Chemie. Nachdem er die Idee 1994 vorgestellt hatte, demonstrierte der Physiker sein Verfahren fünf Jahre später erstmals im Experiment. Seither hat es ihm zahlreiche Preise eingebracht, und seit 2007 untersuchen Wissenschaftler Material- oder Gewebeproben mit kommerziellen STED-Mikroskopen.

Eine neue Anwendung von STED steckt indessen noch in den Kinderschuhen. Mit STED-ODMR (optical detection of magnetic resonances, optischer Nachweis magnetischer Resonanzen) übertrugen Forscher um Hell die Methode auf ein weiteres physikalisches System. Sie betrachteten die atomaren magnetischen Zustände einer Probe unter dem Lichtmikroskop – bei einer Auflösung von etwa 50 Nanometern (*Physical Review Letters* 107, S. 17601, 2011).

Die STED-ODMR-Technik analysiert hochreine Diamanten, in deren sonst perfektem Kohlenstoffgitter Unregelmäßigkeiten erzeugt wurden. An diesen so genannten Stickstofffehlstellen im Kristall sitzt an Stelle von Kohlen-



In einem STED-Mikroskop wird der Anregungsstrahl (grün) von einem ringförmigen STED-Strahl (rot) überlagert, in dessen Mitte die Intensität null beträgt. Wo er auf die Probe trifft, regt er die Moleküle sofort wieder ab und schaltet ihre Fluoreszenzfähigkeit aus. Nur die Moleküle, die sich innerhalb eines kleinen Flecks befinden, leuchten dann noch. So lassen sich feinere Details erkennen, als wenn benachbarte Moleküle ebenfalls fluoreszieren würden. Bewegt man die Probe nun schrittweise, entsteht Punkt für Punkt ein hoch aufgelöstes Bild.



Das Fluoreszenzsignal von mehreren Stickstofffehlstellen im Lichtmikroskop (links) verschwimmt, wenn ihr Abstand die durch Beugungsgesetze vorgegebene Grenze unterschreitet. Die Anzahl der Lichtquellen ist dann unmöglich zu erkennen. Die STED-mikroskopische Aufnahme (rechts) trennt hingegen fünf optische Signale.

stoff ein einzelnes Stickstoffatom; direkt daneben fehlt dem Diamantgitter ein Kohlenstoffatom (Grafik S. 21). Die Fehlstellen verhalten sich wie atomare Magneten, denn an ihnen treten frei ge-

wordene Elektronen aus den angrenzenden Atomhüllen miteinander in Wechselwirkung.

Elektronen besitzen einen quantenmechanischen Drehsinn, der ihre magnetischen Eigenschaften bestimmt. Dieser Spin kann den Wert $+\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$ annehmen. In einer Stickstofffehlstelle koppeln zwei solcher Elektronenspins aneinander, so dass sich die Einzelspins entweder zu null auslöschen oder zum Betrag eins addieren. Diese beiden magnetischen Ausrichtungen besitzen dann verschiedene Energien. Stickstofffehlstellen speichern also Information – genau wie die magnetischen Nullen und Einsen auf Computerfestplatten. Sie lassen sich auch zwischen null und eins umschalten. Dazu müssen die Forscher ihre Probe mit Mikrowellen bestrahlen, deren Frequenz dem Energieunterschied zwischen den Zuständen entspricht. Sie können sie aber auch mit dem Licht eines grünen Lasers anregen. Dann absorbieren die Fehl-

stellen dessen Energie und senden kurz darauf Fluoreszenzlicht größerer Wellenlänge aus, in diesem Fall rotes Licht. Weil null und eins unterschiedlich stark fluoreszieren, lässt sich der Spin der Fehlstelle nun einfach an der Lichtintensität ablesen.

Ideale Bauelemente für Quantencomputer?

Auf Grund ihrer quantenmechanischen und optischen Eigenschaften sind Stickstofffehlstellen in Diamanten schon längere Zeit heiße Anwärter auf die Rolle von Datenspeichern in zukünftigen Quantencomputern (siehe »Spintronik mit Diamant«, SdW 12/2007, S. 112). Die Spinzustände sind auch bei Raumtemperatur außergewöhnlich stabil, und ihre Lebensdauer übersteigt deutlich die Zeit, die für Rechenoperationen benötigt wird. Hinzu kommt, dass sich die Zustände über ihre Fluoreszenz auslesen lassen, die Datenübertragung also auf optischem Weg erfolgen kann.

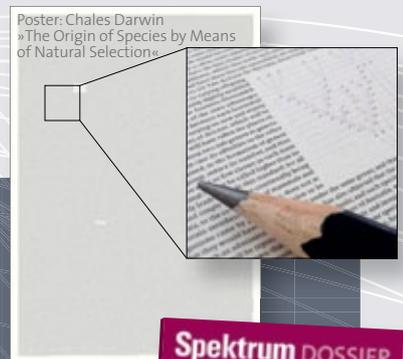
www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- ▶ Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält
- ▶ Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- ▶ Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat vier Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

Unwissen schadet nicht

Die Demokratie braucht Laien.

Die moderne Welt ist schrecklich kompliziert – nehmen wir nur so vertrackte Probleme wie die Eurokrise, »Stuttgart 21« oder die Endlagerung nuklearen Abfalls. In Talkshows und an runden Tischen redet man sich darüber die Köpfe heiß, und der verwirrte Zuhörer findet, dass jeder der gegensätzlichen Standpunkte etwas für sich hat. Aber am Ende muss ein Konsens herauskommen: Eurobonds ja oder nein, Kopf- oder Tiefbahnhof, Gorleben oder ein anderes Endlager.

Sicher soll es dabei demokratisch zugehen, aber je komplizierter das Problem, desto unwissender kommt einem die Mehrheit vor. Kann man wirklich diesem Heer von Laien die Entscheidung überlassen, wo doch Expertise gefragt ist? Als der vormalige griechische Premier Giorgos Andrea Papandreou sein Volk abstimmen lassen wollte, ob es einschneidende Sparauflagen für EU-Kredite gutheiße, gab es europaweites Kopfschütteln – und das Plebiszit wurde schleunigst abgeblasen. Angeblich kursierte in den Brüsseler Wandelgängen sogar der üble Scherz, am besten für Griechenland wäre eine Militärdiktatur. Im Ernst: Kann Demokratie in einer Welt funktionieren, in der nur noch ausgesuchte Experten, sei es für Finanzmärkte, Schienenverkehr oder Endlagergeologie, Bescheid wissen?

Bevor wir die Flinte der Demokratie ins Korn werfen, sollten wir auf Iain D. Couzin hören. Mit seinem Team erforscht er seit Jahren an der Princeton University kollektives Tierverhalten. Insekten, Vögel und Fische dienen ihm als Modelle für die Konsensbildung in sozialen Gruppen. Zur Klärung einzelner Fragen zieht er auch Computersimulationen heran (*Science* 334, S. 1578–1580, 2011).

Angenommen, eine Population muss sich zwischen zwei Optionen A und B entscheiden. Die Mitglieder werden zufällig von den Nachbarn beeinflusst, deren Ansicht zu übernehmen, leisten aber einen gewissen Widerstand, wenn sie die einmal gefasste Meinung ändern sollen. In der Population gibt es drei unterschiedliche Typen von Individuen. Zwei davon favorisieren jeweils von vornherein sehr stark eine der beiden Ansichten. Das sind sozusagen die »Experten«. Es gibt aber noch eine dritte Sorte von Teilnehmern: Die haben keine Präferenz und sind leicht beeinflussbar; sie spielen die »uninformierten Laien«.

Wie sich sowohl im Computermodell als auch in Tierexperimenten mit schwarmbildenden Süßwasserfischen zeigte, sorgen erst die »Laien« für einen demokratischen Meinungswechsel. Falls es nämlich nichts als kontroverse Experten gibt, setzt sich einfach die zahlen- oder meinungsstärkere Fraktion durch: Sie erzwingt die Entscheidung in ihrem Sinn – selbst wenn dies der Population schadet.

Im Tierversuch wurden die Fische mehrheitlich darauf konditioniert, ein gelbes Ziel anzusteuern, wo sie Futter erwarteten – das sich nun aber am anderen, blauen Zielort befand. Im Extremfall kompletter Konditionierung wäre die gesamte Population verhungert. Erst durch Beimengung einer Teilgruppe von unkonditionierten – »unentschlossenen« – Fischen bekehrte sich der Schwarm ziemlich rasch dazu, den Weg zum neuen Futter spendenden Ziel zu nehmen.

Wie das Experiment demonstriert, spielen uninformierte Individuen eine wichtige Rolle bei der »richtigen«, realitätsgerechten Konsensbildung. Indem der Laie die Angelegenheit ohne vorgefasste Meinung bewertet, ermöglicht er ein sachgerechtes Ergebnis, das auf demokratischem Weg zu Stande kommt. Es ist also durchaus zielführend, die Entscheidung über ein kompliziertes Problem – nach Anhörung von Pro und Kontra – einer Bevölkerung zu überlassen, die keineswegs nur aus Experten besteht.

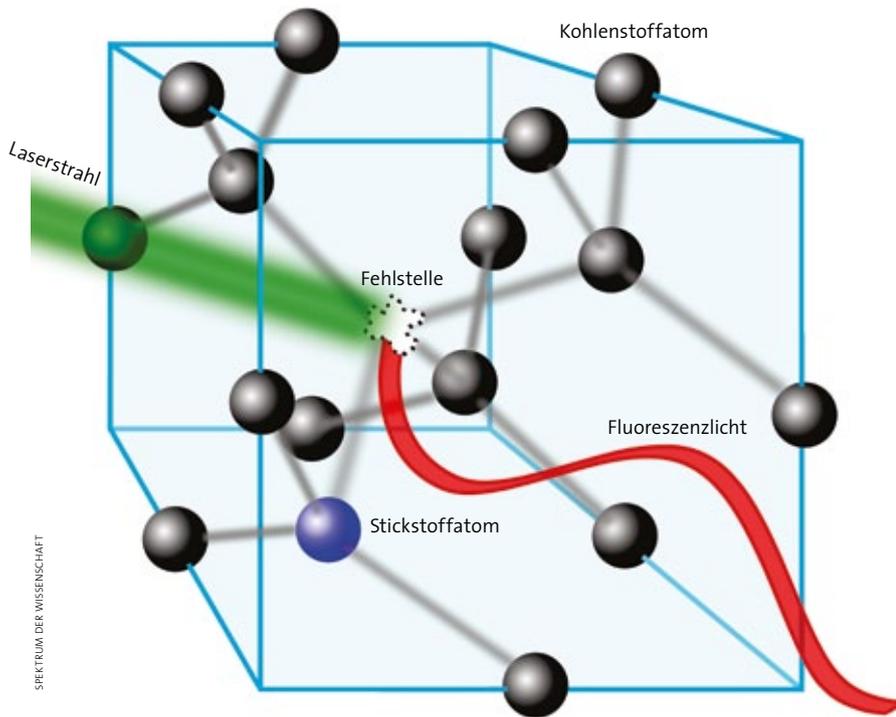


Michael Springer

Doch wenn die Information einer Fehlstelle sich über das Aussenden von Licht verrät, unterliegt auch dieses Signal der Beugungsgrenze. Damit wäre die Dichte der Daten, die sich mit einem Mikroskop aus dem Kristall auslesen lassen, durch die Wellenlänge des ausgesandten Lichts begrenzt. Hier kommt der Trick ins Spiel, mit dem Stefan Hell bereits in den 1990er Jahren die Auflösungs-grenze überwand. Bestrahlt man Moleküle mit einem Laser, um sie zum Fluoreszieren anzuregen, ist die leuchtende Fläche anschließend mindestens so groß wie der Fokus des Lasers. Auch dieser lässt sich infolge von Beugungseffekten nicht beliebig verkleinern.

Doch Hell richtete einen zusätzlichen ringförmigen Laserstrahl – wegen seiner Form Donutstrahl genannt – auf die Probe. Dieser zwingt die angeregten Moleküle zu so genannter stimulierter Emission: Sie senden also Photonen entsprechend der Frequenzen aus dem Donutstrahl aus. Damit haben sie ihre Energie verloren und sind gewissermaßen ausgeschaltet. Nur auf einem wenige zehn Nanometer großen Fleck im Zentrum des Donutstrahls, wo dessen Intensität null ist, bringt der anregende Laserstrahl den Farbstoff tatsächlich zum Fluoreszieren (Grafik S. 18). Indem Hell und sein Team die Probe Schritt für Schritt durch den Fokus der einander überlagernden Laserstrahlen bewegten, ließen sie Punkt für Punkt ein mikroskopisches Bild entstehen.

Bereits 2010 hatte eine Gruppe internationaler Forscher, darunter Hell selbst, ein ähnliches Prinzip an Stickstofffehlstellen demonstriert (*Nature Physics* 6, S. 912, 2010). Es arbeitet ebenfalls mit einem Donutstrahl, ist aber kein STED-Verfahren im engeren Sinn, weil die stimulierte Emission dabei keine Rolle spielt. Die Forscher unterschieden benachbarte Stickstofffehlstellen anhand der verschieden stark fluoreszierenden Spinzustände null und eins. Unter Federführung des Physikers Peter Maurer, Doktorand an der Harvard University in Boston, richteten sie mit Laser- und Mikrowellenstrahlung zunächst alle Stickstofffehlstellen in den Zustand eins aus. Anschließend ver-



So wird ein Diamant zum leuchtenden Datenspeicher: An künstlich erzeugten Stickstofffehlstellen in seinem Gitter aus Kohlenstoffatomen sitzt Stickstoff (blau) an Stelle eines Kohlenstoffatoms (schwarz); daneben fehlt ein Kohlenstoffatom. Diese Fehlstelle absorbiert grünes Laserlicht und fluoresziert daraufhin rot. Je nach Gesamtspin (nicht abgebildet) der Fehlstelle ist das Fluoreszenzleuchten unterschiedlich hell.

so betonen die Autoren in ihrer Veröffentlichung, sogar Strukturen im Bereich einzelner Nanometer zugänglich. Denn dann ließe sich das Loch in der Mitte des Donutstrahls, in dem Fluoreszenz erlaubt ist, weiter verkleinern.

Für zukünftige Anwendungen ist aber nicht nur die hohe Auflösung und Geschwindigkeit der STED-ODMR-Technik entscheidend, sondern auch ihre Eigenschaft, den ursprünglichen Zustand der Spins zu erhalten. Andernfalls würden die Informationen eines diamantenen Datenspeichers während der Messung verloren gehen. Tatsächlich, so zeigten Experimente, bleibt die Ausrichtung der Spins unter dem STED-Strahl erhalten – zumindest wenn die Intensität des Lasers einen Wert nicht überschreitet, der einer Auflösung von etwa 100 Nanometern entspricht. Bei höherer Intensität nehmen aber immer mehr Spins einen Energiezustand ein, aus dem sie nicht ohne Informationsverlust zurückkehren können.

Im Prinzip scheint es jedoch möglich, dass Computer eines Tages tatsächlich die magnetischen Informationen einzelner, dicht gepackter Kristalldefekte auslesen und optisch übertragen. Von der Elektronik, die auf der elektrischen Ladung von Elektronen beruht, wäre damit ein weiterer Schritt in Richtung der Spintronik erfolgt, die auf dem Spin der Teilchen basiert. Dazu bräuchte es nicht einmal Diamanten. Für das Verfahren kommen den Göttinger Forschern zufolge alle Materialien in Frage, in denen leuchtende Spinzustände existieren.

Mike Beckers ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

setzen sie mit einem Donutstrahl alle Spins – außer im Zentrum des Strahls – in den Zustand null.

Weil der Zustand null um 30 Prozent heller als der Zustand eins leuchtet, erhielten die Forscher immer dann ein anderes Fluoreszenzsignal aus dem bestrahlten Bereich, wenn das Zentrum des Donutstrahls auf eine Stickstofffehlstelle traf. Durch viele Messungen entlang der Probe unterschieden die Forscher auf diese Weise zwei benachbarte Stickstofffehlstellen, die nur 150 Nanometer voneinander entfernt lagen.

Methodische Unzulänglichkeiten

Die Methode kämpft allerdings mit Unzulänglichkeiten. »Zwischen den An- und Aus-Zuständen herrscht kein absoluter Hell-dunkel-Kontrast wie zwischen 100 und 0 Prozent, sondern lediglich einer zwischen 100 und 70 Prozent«, erläutert Stefan Hell. Liegen die Stickstofffehlstellen sehr dicht beieinander, so der Physiker, lasse sich das Signal daher nur durch sehr lange Messungen klar identifizieren. Zudem müsse man außer dem Laserlicht auch Mikrowellen einstrahlen und das Resonanzverhalten der Spinzustände kennen, um zwischen ihnen umzuschalten.

Darum stellten Dominik Wildanger aus Göttingen und Jeronimo Maze aus

Chile – Maze war schon 2010 mit an Bord – gemeinsam mit Hell 2011 eine neue Variante des Verfahrens zur Vermessung und scharfen Trennung von eng benachbarten Fehlstellen vor. Sie kommt ohne Mikrowellen aus und beruht nur auf optischen Prinzipien: Mit einem STED-Strahl zwangen die Forscher alle Spinzustände außerhalb des Strahlzentrums zur stimulierten Emission. So fielen die Fehlstellen in den dunklen Grundzustand. Dort hielt sie der STED-Strahl auch in der Folge fest, während der anregende Laser nur noch die Fehlstelle im Zentrum aufleuchten ließ.

Mit diesem absoluten Hell-dunkel-Kontrast erreichten sie nicht nur eine beeindruckende Auflösung von etwa 50 Nanometern (siehe Bild S. 19). Auch die Messdauer verringerte sich um mehrere Größenordnungen. Das einzige Problem: Der Laserstrahl muss sehr intensiv sein, um die Moleküle effektiv genug am Fluoreszieren zu hindern. Die 2010 vorgestellte Methode kommt hingegen mit einem schwachen Donutlaser aus; schließlich schaltet sie nur zwischen eins und null um und unterdrückt nicht die Fluoreszenz. Doch dieser Vorteil hebe die Nachteile im Vergleich zu STED nicht auf, so Hell. Mit einem nochmals stärkeren STED-Laser wären,



Ein menschliches Auge unterscheidet sich vom Auge der Fische nur in Feinheiten. Seine Grundkonstruktion und Funktionsweise sind uralt.

EVOLUTION

Das Auge – Organ mit Vergangenheit

Die Geschichte des Wirbeltierauges beginnt bei den Vorfahren der Fische. Seine wesentlichen Strukturen entstanden bereits vor einer halben Milliarde Jahren. Auch manche Mängel erklären sich aus dieser Evolution.

Von Trevor D. Lamb

Die Augen gehören zu unseren kompliziertesten Organen. Ähnlich einer Kamera fangen sie Licht ein und fokussieren es auf ihren Hintergrund. Dort gewinnt eine hoch spezialisierte Netzhaut daraus elektrische Signale. Mit Dutzenden verschiedener Nervenzelltypen verarbeitet dieses Häutchen die Information gleich an Ort und Stelle weiter und schickt das Ergebnis dann mit dem Sehnerv ins Gehirn, das daraus Bilder erzeugt.

Lange war schwer vorstellbar, wie eine derart ausgeklügelte Konstruktion überhaupt durch normale Evolution entstehen konnte. Bereits Charles Darwin machte sich hierüber in seinem Hauptwerk »Über den Ursprung der Arten«, das 1859 erschien, ausführlich Gedanken. Die Antwort kannte er noch nicht. Kreationisten und Anhänger eines Intelligent Design halten das Auge sogar für ein Paradebeispiel des Schöpfungsakts. Darwin war allerdings davon überzeugt, dass es nach und nach aus irgendwelchen Vorstufen durch Selektionskräfte entstanden sein muss. Nur – welche Zwischenschritte mag es gegeben haben, über die sich allmählich die einzelnen Komponenten dieses Sehorgans herausbildeten und zusammenfanden, bis es schließlich seine heutigen Aufgaben erfüllte? Und vor allem mussten diese Zwischenstadien für ihre Besitzer schon nützlich gewesen sein.

Direkte Belege von der Evolution des Wirbeltierauges in Form von Fossilien lassen sich nach wie vor schwer beschaffen. Anders als Knochen versteinerten weiche Gewebe höchst selten – und falls doch, sind die Feinheiten meist so ungenügend erhalten, dass keine genauen Rückschlüsse auf die evolutionäre Herkunft möglich sind. Studien der Embryonalentwicklung, Artenvergleiche sowie morphologische und genetische Untersuchungen liefern neue Erkenntnisse. Diese Analysen erlauben jetzt tatsächlich einen Blick darauf, wie und wann sich die wichtigsten Strukturen unseres Auges in der Vorzeit wohl herausbildeten.

Demnach lief die Evolution des Wirbeltierauges in weniger als 100 Millionen Jahren ab. Die Ausgangsstruktur dürfte vor

rund 600 Millionen Jahren ein simpler Lichtsensor gewesen sein, mit dessen Hilfe sich frühe Tiere an Tag und Nacht und auch an den Jahreszeiten orientieren konnten. Vor etwa 500 Millionen Jahren sahen die frühen Wirbeltiere – äußerlich fischähnliche Wesen – die Welt schon mit richtigen Augen, deren optische und neuronale Finessen im Wesentlichen denen unserer eigenen Augen glichen. Aber die Evolution hinterließ, wie so oft, gewissermaßen Narben. Denn als Konstruktion ist dieses Auge keineswegs perfekt. Wie immer hat die Natur auch hier vorhandenes Material benutzt und für den neuen Zweck zurechtgeschustert.

Der Beginn des Lebens auf der Erde – und damit auch die Reihe unserer Vorfahren – reicht fast vier Milliarden Jahre zurück. Primitive mehrzellige Tiere teilten sich vor ungefähr einer Milliarde Jahren in zwei Gruppen auf: zum einen in die so genannten Hohltiere oder radialsymmetrischen Tiere (Radiata), zu denen etwa die Quallen gehören; zum anderen in die bilateralsymmetrischen Tiere (Bilateria), wozu das Gros der heutigen Tiere zählt, von den verschiedenen Würmern bis zu den Weich-, Glieder- und Wirbeltieren. Die Hohltiere

AUF EINEN BLICK

DIE EVOLUTION DES WIRBELTIERAUGES

1 An Fossilien lässt sich die Entstehung unseres Auges kaum ablesen. Aber **anatomische, physiologische, genetische und Entwicklungsvergleiche** verschiedener Organismen geben Aufschluss über die Anfänge und frühen Stadien dieser Evolution.

2 Das Wirbeltierauge – ein Kameraauge mit einer Linse – war im Prinzip schon **vor 500 Millionen Jahren** bei den frühen Wirbeltieren des Kambriums fertig entwickelt. Sein Ursprung muss folglich noch weiter zurückliegen.

3 Es begann mit einem **reinen Lichtdetektor**, der eine Orientierung nach der Tages- und Jahreszeit verschaffte. Eine komplexe **Netzhaut und ein optischer Apparat**, die Bildersehen erlaubten, kamen erst später hinzu. Diese Entwicklungen erklären etliche Unzulänglichkeiten unseres Sehorgans.

weisen eine Ober- und Unterseite auf, die Bilateria zusätzlich eine Bauch- und Rückseite – und damit eine Rechts-links-Symmetrie mitsamt Kopf und Hinterende.

Vor rund 600 Millionen Jahren spalteten sich die Bilateria wiederum in zwei wichtige Gruppen auf. Der einen entsprang die Mehrheit der heutigen Wirbellosen, die zweite brachte unter anderem die Wirbeltiere hervor. Schon bald nach dieser Trennung hinterließ vor 490 bis 540 Millionen Jahren die so genannte kambrische Explosion im Fossilbericht deutliche Spuren: Denn damals, teils wohl auch schon vorher, entstanden erstaunlich viele neuartige Grundbaupläne (Hauptmuster) des Körperbaus und mit ihnen die meisten der heutigen Tierstämme. Der Evolutionsschub brachte auch die Voraussetzungen für das Wirbeltierauge.

An Fossilien aus jener Zeit ist zu erkennen, dass während der kambrischen Explosion im Tierreich zwei völlig unterschiedliche Typen von Augen auftraten. Einerseits entwickelte sich schon damals ein so genanntes Fassetten- oder Komplexauge, manchmal auch Netzauge genannt. Diesen Typ weisen insbesondere die Insekten und Krebse auf. Solch ein Sehorgan besteht aus vielen schlanken Einzelaugen mit jeweils eigener Linse und einer Hand voll Sehzellen. Es eignet sich gerade für kleine Tiere. Sie erfassen damit ein weites Blickfeld bei sehr guter zeitlicher, allerdings mäßiger räumlicher Auflösung. Sicherlich leistete das Komplexauge den frühen Gliederfüßern des Kambriums gute Dienste, etwa den ausgestorbenen Trilobiten, und brachte ihnen gegenüber blinden Zeitgenossen Vorteile.

Zwei Typen komplizierter Augen

Für größere Tiere erscheinen Fassettenaugen allerdings eher unpraktisch, denn für eine hinlängliche räumliche Auflösung müssen sie riesig groß sein. Zunehmende Körpergröße bevorteilte offensichtlich die Evolution des zweiten Augentyps: die des Linsenauges, auch Kameraauge genannt. Dieses besitzt nur eine einzige Linse, genauer einen für alle Sehzellen gemeinsam zuständigen Lichtbrechungsapparat. Die Sehzellen oder Fotorezeptoren liegen im Augenhintergrund in einer Netzhaut (Retina), die den Augapfel auskleidet. Und sie gehören im Fall der Wirbeltiere zu einem anderen Typ als etwa die von Insekten.

Nur oberflächlich betrachtet ähneln Tintenfischaugen den unseren. Denn bei genauerem Hinsehen unterscheiden sich beide in manchen wesentlichen Aspekten völlig, etwa im Feinbau der Netzhaut. Auch entsprechen die Fotorezeptoren der Tintenfische dem Insektentypus.

Es erscheint merkwürdig, dass die Wirbeltiere mit einer anderen Klasse von Fotorezeptoren sehen. Von diesem Typ finden sich bei den mit Kiefern ausgestatteten Wirbeltieren – den Kiefermäandern; dazu zählen neben den meisten heutigen Fischen auch alle höheren Wirbeltiere – zwei verschiedene Ausführungen: Dem Sehen am Tag dienen so genannte Zapfen, der Nachtsicht die viel lichtempfindlicheren Stäbchen. Weil wir die Evolution der unterschiedlichen Klassen und Varianten von Lichtsinneszellen verstehen wollten, be-

schlossen Edward N. Pugh jr., damals noch an der University of Pennsylvania in Philadelphia, Shaun P. Collin, der an der University of Queensland (Australien) arbeitete, und ich vor einigen Jahren, deren Herkunft und Werdegang gemeinsam zu erforschen. Dabei gewannen wir nicht nur in dieser Frage mehr Klarheit. Mindestens ebenso faszinierend ist das Szenario, das wir nun vom Ursprung und von der Evolution des Wirbeltierauges zeichnen können.

Wie so manche Forscher vor uns staunten auch wir bei unseren Studien darüber, wie stark sich die Augen völlig verschiedener kieferbewehrter Wirbeltiere gleichen – egal, ob es Fische oder Säugetiere sind. Viele der grundlegenden Merkmale stimmen bei ihnen allen letztlich überein. In so einem Fall dürften die betreffenden Strukturen von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen. Da die ersten Kiefermänder vor etwa 420 Millionen Jahren lebten, muss also unser Augentyp schon damals existiert haben. Diese Tiere waren Meeresbewohner und ähnelten wahrscheinlich modernen Knorpelfischen. Vielleicht sahen sie ungefähr so aus wie Haie.

Aus solchen Überlegungen folgte für unsere eigenen Studien: Das Kameraauge und seine Fotorezeptoren hatten wohl noch tiefere Wurzeln. Also wandten wir uns den ursprünglicher gebauten kieferlosen Wirbeltieren zu, von denen ein paar wenige noch heute vorkommen. Diese urtümlichen Fische und wir haben einen gemeinsamen Vorfahren, der vor rund 500 Millionen Jahren lebte.

Für die erforderlichen detaillierten anatomischen Untersuchungen wählten wir Neunaugen. Die aalförmigen Geschöpfe mit einem kieferlosen Saugmund haben nur zwei Augen – ihrem Namen zum Trotz, welchen sie den beidseits hinter dem Auge aufgereihten je sieben Kiemenlöchern plus dem Nasenloch verdanken. Doch wir mussten erkennen: Auch Neunaugen besitzen schon ein komplettes, richtiges Kameraauge mitsamt Linse, Iris und sogar Muskeln, die in dem Fall von außen ansetzen und die Hornhautkrümmung verändern. Sogar die Netzhaut von Neunaugen weist Gemeinsamkeiten mit der unseren auf. Sie ist ebenfalls dreischichtig, da zwischen die Sinneszellen und die Neurone für den Sehnerv weitere Nervenzellen geschaltet sind, die eine Vorverarbeitung leisten. Und die Sehzellen ähneln stark unseren Zapfen. Allerdings haben Neunaugen anscheinend noch nicht die lichtempfindlicheren Stäbchen. Die Gene der uralten Fische belegen ebenfalls die Verwandtschaft: Ob es die Augenentwicklung beim einzelnen Tier betrifft, die Lichtperzeption oder die neuronale Verarbeitung – hinter vielen dieser Vorgänge und Strukturen stehen die gleichen Erbanlagen wie bei Kiefer tragenden Wirbeltieren.

Dermaßen zahlreiche Parallelen konnten nicht unabhängig voneinander entstanden sein. Der Ursprung des Wirbeltierauges musste darum sogar noch einiges weiter zurückliegen. Allem Anschein nach war er also schon vor über 500 Millionen Jahren bei gemeinsamen Vorfahren der kieferlosen und Kiefer tragenden Wirbeltiere zu suchen. Plausibel erschienen die vorangegangenen 50 Millionen Jahre.

Nachklänge der Entwicklungsgeschichte

Sehr urtümliche Wirbeltiere, einerseits die Schleimaale (Inger), andererseits die Neunaugen, lassen darauf rückschließen, wie das Wirbeltierauge entstand und wie seine Vorläufer aussahen.

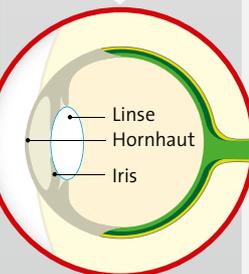
- ❶ Schleimaale können mit ihrem sehr viel einfacheren Lichtorgan nicht sehen, aber vermutlich ihren Tagesrhythmus auf die Lichtverhältnisse abstimmen.
- ❷ Die Larven von Neunaugen besitzen noch ähnliche primitive »Augen« wie Schleimaale. Die Augen von erwachsenen Neunaugen gleichen aber in den wesentlichen Strukturen schon den unseren.
- ❸ In einigen Aspekten entwickelt sich das menschliche Auge beim Kind über ähnliche Stadien, wie sie wohl auch in der Evolution aufeinander folgten. So besteht die zukünftige Netzhaut zunächst aus nur zwei neuronalen Schichten – wie die von Schleimaalen. Erst später tritt eine dritte Schicht dazwischen, wie sie auch bei erwachsenen Neunaugen existiert.



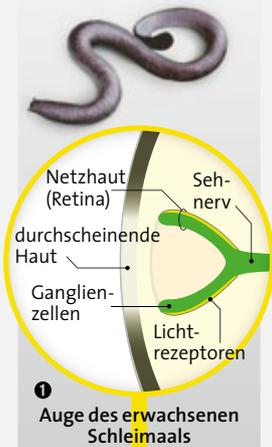
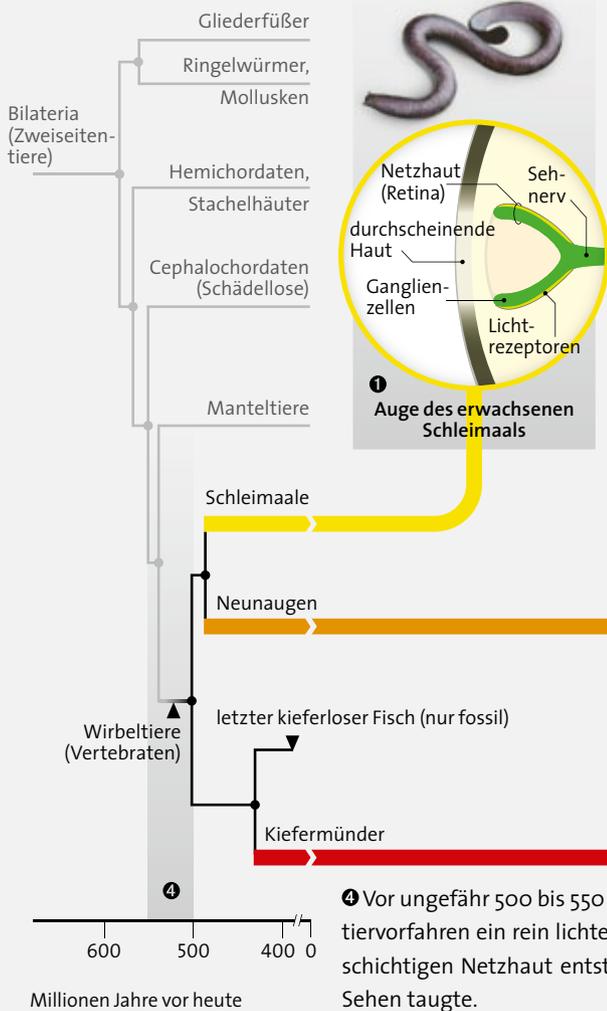
Embryo, vier Wochen alt



Embryo, fünf Wochen alt



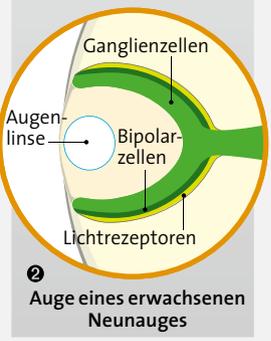
❸ menschliches Auge



❶ Auge des erwachsenen Schleimaals



Auge eines Quorders (Neunaugenlarve)



❷ Auge eines erwachsenen Neunauges

❹ Vor ungefähr 500 bis 550 Millionen Jahren scheint bei Wirbeltiervorfahren ein rein lichtempfindliches Organ mit einer zweischichtigen Netzhaut entstanden zu sein, das noch nicht zum Sehen taugte.

Allerdings fragten wir uns nun, ob wir den Anfängen unseres Auges und seiner Sehzellen jemals auf die Schliche kommen würden. Eigentlich, so überlegten wir, müssten wir heutige Tiere untersuchen, deren Vorfahren sich im fraglichen Zeitraum von unseren Vorfahren abgespalten hatten. Doch es gibt keine lebenden Vertreter solcher Linien. Wir fanden dann aber andere primitive Fische, die uns weiterhalfen:

die Schleimaale oder Inger, die mit den Neunaugen verwandt sind. Sie leben am Meeresgrund, auch in großer Tiefe, und ernähren sich von Krebsen, toten Fischen bis zu Walkadavern (siehe »Oasen der Tiefsee«, SdW 3/2011, S. 74). Bei Bedrohung sondern sie einen besonders zähen Schleim ab.

Zwar werden Inger den Wirbeltieren zugerechnet, aber sie besitzen nur ganz einfache Augen, falls man diese Organe

überhaupt so bezeichnen sollte. Hornhaut, Iris, Linse und Augenmuskeln sind nicht vorhanden. Die Netzhaut besteht nicht aus drei, sondern nur aus zwei Schichten. Obendrein liegen diese Augen tief eingebettet unter durchscheinender, unpigmentierter Haut. Nach Verhaltensbeobachtungen sind Schleimaale wohl praktisch blind. Nahrung spüren sie offenbar mit ihrem vorzüglichen Geruchssinn auf.

Nach Ansicht einiger Forscher könnte ein gemeinsamer Vorfahr von Inger und Neunaugen ein komplizierteres Auge mitsamt Linse ähnlich dem von Neunaugen besessen haben. Dann würde das Auge der Schleimaale eine Rückbildung darstellen, ein Rudiment. Doch bezeichnenderweise ging dieses Organ nicht völlig verloren wie bei manchen – längst nicht allen – Höhlenfischen. Bei denen vollzog sich die Degeneration manchmal in nur 10000 Jahren. Aber die Inger behielten ihr primitives Auge über mehrere hundert Jahrmillionen. Für irgendetwas scheinen sie es demnach zu benötigen, wenn auch wohl nicht fürs Sehen.

Ob dieses einfache Auge der Inger nun rudimentär ist oder nie komplizierter war – es könnte einiges über die Augenevolution erzählen. Denn auch falls es nur auf einer Rückbildung beruht, wäre denkbar, dass die Organentwicklung einst an irgendeiner Stelle anhielt, dass also manche embryonalen Entwicklungsschritte jetzt nicht mehr stattfinden. Mit der nötigen Vorsicht ließe sich dann aus dem Überbleibsel unter Umständen auf frühere Evolutionsstadien unseres Auges schließen. Solche Studien können somit Aufschluss darüber geben, wozu das unbekanntes Augenvorläuferorgan diente und was es leistete.

Erste Hinweise hierauf lieferte uns die zweischichtige Netzhaut des Ingerauges. In der sonst für Wirbeltiere üblichen dreischichtigen Retina liegen in der mittleren Schicht unter anderem so genannte Bipolarzellen. Diese Neurone bearbeiten die Information, die von den Sehzellen kommt. Das Ergebnis reichen sie an Nervenzellen (so genannte retinale Ganglienzellen) weiter, die ihre Signale über den Sehnerv ins Gehirn schicken, den ihre langen Ausläufer bilden. Diese zwischengeschalteten Bipolarzellen sind bei Inger nicht vorhanden. Stattdessen beliefern die Sinneszellen direkt die ins Gehirn führenden Neurone.

Diesbezüglich ähnelt das Verschaltungsmuster dem der Epiphyse oder Zirbeldrüse, auch Pinealorgan genannt. Die kleine Hormondrüse im Gehirn reguliert den inneren Tagesrhythmus. Bei allen Wirbeltieren enthält sie lichtempfindliche Zellen, mit Ausnahme der Säuger, bei denen die Eigenschaft verloren ging. Die Sinneszellen geben ihre Signale direkt – ohne Umschaltstation – an die weiterleitenden Neurone.

Wegen dieser Ähnlichkeiten äußerten meine Mitarbeiter und ich 2007 folgende Idee: Das Auge der Inger hat mit Sehen vielleicht gar nichts zu tun. Möglicherweise informiert es stattdessen spezifische Hirngebiete über die Tages- oder auch Jahreszeit, so dass die Tiere beispielsweise wissen, wann sie am besten fressen oder sich paaren sollen. Wir stellen uns

vor, dass Urwirbeltiere vor 500 bis 550 Millionen Jahren mit ihren »Augen« noch gar nichts wirklich sahen, sondern nur Helligkeit registrierten. Erst später entstanden wirkliche Augen zum räumlichen Sehen mit allem, was dazu gehört – optischer Apparat, Augenmuskeln und neuronale Verarbeitung.

Für solch einen Ablauf der Evolution spricht in manchem auch die embryonale Entwicklung des Wirbeltierauges. Beziehungen zwischen der Evolutionsgeschichte und Abfolgen in der Individualentwicklung sollte man, wie wir heute wissen, zwar vorsichtig und erst nach genauen Analysen herstellen, doch sie können mitunter aufschlussreich sein.

Um mit den Neunaugen anzufangen: Sie leben jahrelang als blinde Larven, Querder genannt, bevor sie sich in geschlechtsreife Tiere verwandeln. Die Larven besitzen ganz ähnliche primitive, von Haut verdeckte »Augen« wie Schleimaale. Erst während der Metamorphose zum erwachsenen Tier bilden sich eine dreischichtige Netzhaut, Linse, Hornhaut und Augenmuskeln. Das Auge wird nun deutlich größer und tritt als das typische Kameraauge der Wirbeltiere an die Oberfläche. Unseres Erachtens könnten sich in dieser Abfolge bestimmte Evolutionsstadien spiegeln.

Ebenso aufschlussreich erscheint die Embryonalentwicklung eines Säugerauges. Wie Benjamin E. Reese und seine Mitarbeiter von der University of California in Santa Barbara herausfanden, gleichen die neuronalen Verschaltungen in der Netzhaut eines jungen Säugetiers zunächst ziemlich denen bei Schleimaalen: Die lichtempfindlichen Sinneszellen haben direkten Kontakt mit den ableitenden Neuronen. Erst später reifen Bipolarzellen heran und drängen sich dazwischen. Diese Reihenfolge würde man sich auch für die Evolution vorstellen, sofern die komplexe Netzhaut der Wirbeltiere aus einer zweischichtigen Struktur zum Erfassen des Tagesrhythmus entstand. Somit könnte das »Auge« der Schleimaale wirklich eine frühere Evolutionsstufe darstellen, bevor sich der optische Apparat mit einer Linse entwickelte.

Querder haben noch ähnlich primitive Augen wie Schleimaale

Ungewöhnliche Sehzellen für Säugtiere

Zur Entstehungsgeschichte der verschiedenen Augen im Tierreich gehört auch die Evolution ihrer unterschiedlichen Fotorezeptoren. Biologen unterscheiden zwei Klassen dieser Sinneszellen: einen rhabdomeren und einen ziliären Typ. Die beiden Typen unterscheiden sich im Aufbau und in den physiologischen Prozessen. Noch vor Kurzem glaubten viele Forscher, die wirbellosen Tiere würden rhabdomere Rezeptoren benutzen und die Wirbeltiere ziliäre Zellen. Doch die Sachlage erweist sich als wesentlich komplizierter.

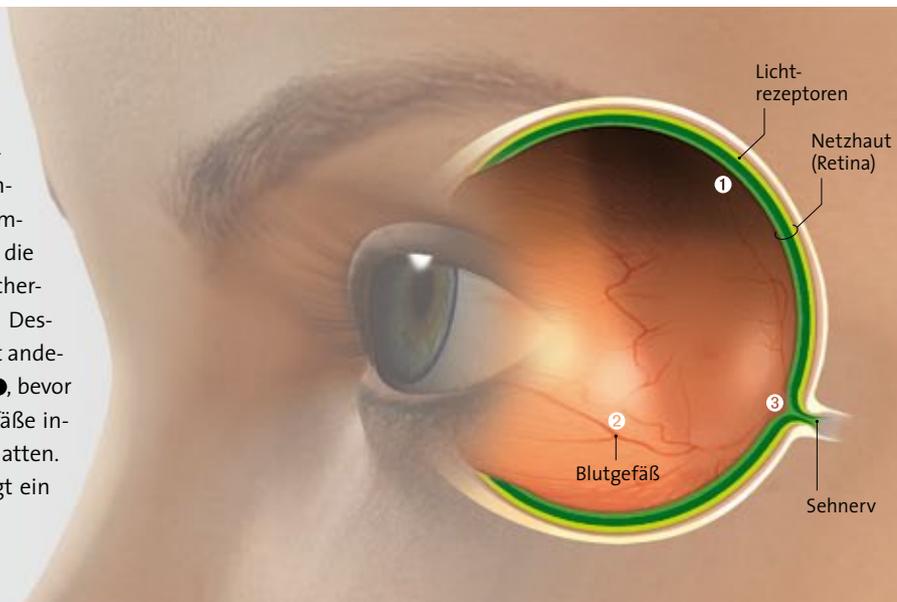
Denn bei den allermeisten Organismen, auch bei wirbellosen Tieren, sind für die reine, nichtvisuelle Lichtwahrnehmung – etwa für den Tag-Nacht-Rhythmus – ziliäre Fotorezeptoren zuständig. Dagegen dienen rhabdomere Sinneszellen dort, wo sie vorkommen, allein dem richtigen, abbildhaften Sehen. Sie bestücken beispielsweise die Fassettenaugen von Insekten und anderen Gliederfüßern – und

Narben der Evolution

Konstruktionsfehler unseres Auges

gehen auf seine Evolutionsgeschichte zurück und auf die damit in mancher Hinsicht zusammenhängende Embryogenese. Beim Embryo entsteht die Netzhaut aus einem sich später becherförmig einstülpenden Hirnbläschen. Deswegen muss einfallendes Licht zuerst andere Netzhautschichten durchqueren ❶, bevor es auf die Sinneszellen trifft. Blutgefäße innen auf der Netzhaut ❷ werfen Schatten. Dort, wo der Sehnerv anfängt ❸, liegt ein »blinder Fleck«.

DOV/FOLEY



stellen die Sehzellen im Kameraauge der Tintenfische, das unserem Auge oberflächlich ähnelt. Die Wirbeltiere aber benutzen zum Sehen ziliäre Rezeptoren.

Allerdings lieferte Detlev Arendt vom European Molecular Biology Laboratory in Heidelberg 2003 Hinweise darauf, dass auch unser Auge in der Netzhaut anscheinend noch Abkömmlinge von rhabdomeren Fotorezeptoren aufweist. Sie haben sich jedoch offenbar stark abgewandelt und sind zu den Neuronen (retinalen Ganglienzellen) geworden, deren lange Ausläufer den Sehnerv bilden. Somit blieben die ziliären Zellen Lichtrezeptoren, haben jedoch ihre Funktion erweitert – während die ursprünglich rhabdomeren Sinneszellen bei den Wirbeltieren eine neue Aufgabe übernommen haben. Dergleichen kommt in der Evolution öfter vor. Diese Prozesse beim Auge genauer zu ergründen, kann helfen, die Konstruktion unseres durchaus nicht perfekten Sehorgans besser zu verstehen. Also fragten wir uns, welche Umweltzwänge einst jene gravierenden funktionellen Veränderungen bewirkt haben mögen.

Lichtsinnzellen besitzen Sehfärbstoffe, mit denen sie Licht einfangen. Als Proteinanteil enthalten die hier interessierenden Fotopigmente ein Opsin, weshalb einige wichtige von ihnen Rhodopsine genannt werden. Laut einer Arbeit von Yoshinori Shichida von der Universität Kioto und seinen Kollegen von 2004 scheint sich ein solches Pigment bei frühen Wirbeltieren derart verändert zu haben, dass es nach Anregung durch Licht in einer stabileren Form vorlag als vorher, was zugleich seiner Aktivität – und somit der Sinnesreaktion – zugutekam. Ich vermutete damals, wegen dieser neuen Form könnte die Rückführung des Pigments in den inaktiven Ausgangszustand blockiert sein, in dem der Rezeptor erst neuerlich einsatzbereit ist. Sehfärbstoffe von rhabdomeren Zellen absorbieren zu dem Zweck einfach nochmals Licht. Doch die Fotozellen der Wirbeltiere benötigten wohl eine andere biochemische Lösung – über die heutige Organismen tatsächlich verfügen.

Nachdem so die ziliären Sehzellen wieder zurückschalten konnten, erwiesen sie sich den rhabdomeren Rezeptoren in lichtarmer Umwelt überlegen. Damit ausgestattete Tiere mögen etwa in der Tiefsee besser zurechtgekommen sein. Vielleicht konnten Vorfahren der Wirbeltiere deswegen manche Lebensräume besiedeln, die damals Tieren mit rhabdomeren Lichtrezeptoren verwehrt blieben. Das betraf allerdings zu der Zeit nicht wirkliches Sehen, denn Kameraaugen besaßen diese Tiere noch keineswegs. Aber sie vermochten sich nun bei sehr wenig Licht auf Tages- und Jahreszeiten einzustellen.

Embryonalentwicklung liefert Indizien

Gleichzeitig verloren die weniger lichtempfindlichen, in diesen Augen auch noch vorhandenen rhabdomeren Zellen in der neuen schummerigen Umwelt ihre Funktion als Fotorezeptoren, denn damit konnten jene frühen Tiere dort praktisch nichts mehr wahrnehmen. So wurden diese Zellen zu Neuronen umfunktioniert, die dem Gehirn die visuellen Signale überbringen. Dabei verloren sie den Sehfärbstoff – zumindest die meisten von ihnen (siehe »Das zweite Auge«, SdW 12/2011, S. 26).

Wie aber wurde vor rund 500 Millionen Jahren aus solch einem schlichten Lichtorgan das zum Sehen befähigte Wirbeltierauge mit all seinen Feinheiten? Nachdem wir uns vorstellen konnten, woher die Bestandteile der Netzhaut kamen, wollten wir auch diesen Prozess genauer ergründen. Wiederrum liefert die Embryonalentwicklung Hinweise (siehe Kasten S. 25, rechte Spalte).

Beim Wirbeltierembryo wachsen seitlich aus dem späteren Zwischenhirn schon früh zwei neuronale Augenbläschen, die sich dann becherförmig einstülpfen und eine zunächst zweischichtige Retina hervorbringen, die das werdende Auge innen auskleidet. Es erscheint gut möglich, dass in der Evolution ähnliche Schritte abliefen. Bei Wirbeltiervorfahren könnte so vor 500 bis 550 Millionen Jahren ein Organ

mit zweischichtiger Netzhaut entstanden sein, wobei die Lichtrezeptoren auf der Außenseite des Auges, also nach hinten, lagen und die ableitenden Ganglienzellen dem Augeninneren zu, also vorn. Somit erklärt sich die »verkehrte« Anordnung der Netzhautschichten in unserem Auge aus diesem Werdegang, das heißt aus der Herkunft von einer Gehirnausstülpung, die sich dann nachträglich nach innen stülpte.

Die Ganglienzellen jenes urtümlichen Auges, die den Sehnerv hervorbrachten, stammten wie gesagt von rhabdomerer Sinneszellen ab und die Rezeptoren für Licht von ziliären Zellen. Dieses Organ diente anfangs wohl immer noch hauptsächlich zur Abstimmung der inneren Uhr auf Hell-dunkel-Wechsel. Vielleicht nahmen Tiere damit aber auch schon schattenhafte Konturen wahr, an denen sie sich orientierten.

Im Evolutionsmaß ein Augenblick

Wenn sich beim Embryo die spätere Netzhaut zum Augenbecher einstülpt, entsteht an dessen »Öffnung« die Linse – und zwar aus der darüberliegenden Haut: Die Stelle vor dem Augenbläschen verdickt sich, diese Struktur wandert etwas nach innen, schnürt sich schließlich von der Haut ab und bildet die quasi frei schwimmende Linse. Eine in manchem ähnliche Abfolge könnte es in der Evolution gegeben haben. Beim Embryo greifen allerdings Einstülpung des Augenbechers und Linsenbildung zeitlich ineinander. In der Evolution mag beides nacheinander geschehen sein – vielleicht ein Beispiel dafür, dass die Individualentwicklung die Stammesgeschichte nicht zwangsläufig und in allen Einzelheiten spiegelt.

Wann das erste richtige – sehende – Auge dieser Art entstand, wissen die Biologen nicht. Nach Berechnungen von Dan-Eric Nilsson und Susanne Pelger von der Universität Lund (Schweden) von 1994 könnten alle optischen Komponenten des Wirbeltierauges in nicht einmal einer Million Jahren zusammengewachsen sein. Falls diese Entwicklung tatsächlich so schnell erfolgte, wäre aus dem praktisch blinden Vorläuferorgan in nur einem evolutionären Augenblick das Auge fürs Bildsehen entstanden.

Die lichtbrechende Linse – genauer gesagt der gesamte lichtbrechende Apparat – fokussierte nun Abbilder der Außenwelt auf die Netzhaut und ermöglichte dem Auge dadurch eine viel bessere Informationsaufnahme. Sicherlich erzeugte diese Situation wiederum neue Selektionsdrücke für eine leistungsfähigere Signalverarbeitung schon in der Netzhaut. Bisher hatten die Fotorezeptoren ihre Signale direkt den Sehnervenzellen geliefert. Nun aber entwickelten sich einige aus ihrer Fraktion nicht mehr zu ziliären Rezeptoren wie ihre Schwestern, sondern wurden Bipolarzellen und schoben sich – als dritte Retinaschicht – zwischen die Sinneszellen und die Sehnervneurone. Ihre Herkunft erklärt, wieso die Bipolarzellen den Stäbchen und Zapfen so sehr ähneln – nur dass sie kein Rhodopsin besitzen und selbst nicht auf Licht ansprechen, vielmehr chemische Signale von den Lichtsinneszellen empfangen.

Im Prinzip würde solch ein Kameraauge ein Sichtfeld von ungefähr 180 Grad erlauben. Aber davon nehmen wir nur einen kleinen Ausschnitt auf einmal wahr, denn so viel Information kann der Sehnerv wegen seiner begrenzten Anzahl an Nervenfasern nicht gleichzeitig ins Gehirn schicken. Bestimmt waren die ersten Linsenaugen noch stärker eingeschränkt. In dieser Situation dürften kräftige Selektionsdrücke für eine äußere Augenmuskulatur, mit der die Augäpfel bewegt werden konnten, aufgetreten sein. Offenbar existierten solche Muskeln bereits vor 500 Millionen Jahren. Sie sind schon bei den Neunaugen fast genauso angeordnet wie bei den Kiefer tragenden Wirbeltieren.

Bei aller Leistungsfähigkeit ist unser in vielem so genial erscheinendes Auge keineswegs perfekt. Als Konstruktion wirken einige Details sogar stümperhaft. Die Netzhaut etwa liegt wie gesagt verkehrt herum: Bis das Licht die Sinneszellen erreicht, muss es erst die anderen neuronalen Zellschichten mitsamt all den lichtstreuenden Zellkörpern und Nervenfasern passieren, was die Bildqualität verschlechtert, gar nicht zu reden von Blutgefäßen, die ihre Schatten auf die Sinneszellen werfen. Und an der Stelle, wo sich Nervenfasern bündeln, die Netzhaut durchqueren und dann hinter der Retina als Sehnerv erscheinen, sehen wir gar nichts.

Dass ein linsenbewehrtes Kameraauge nicht zwangsläufig so ungeschickt aufgebaut sein muss wie unseres, beweist das Tintenfischauge, das diese Unzulänglichkeiten nicht aufweist. Erst von der Evolution her lässt sich verstehen, wieso unser Auge bestimmte Mängel hat. Jeder einzelne Evolutionsschritt bedeutete für frühe Wirbeltiere oder deren Vorläufer eine vorteilhafte Anpassung. Darum trägt unser Auge heute noch Merkmale von seinen Vorgängern aus Urzeiten, mit denen Tiere überhaupt nicht sehen konnten. ~

DER AUTOR



Trevor D. Lamb forscht an der Australian National University in Canberra. Der Sinnesphysiologe und ausgebildete Elektroingenieur arbeitet dort an der John Curtin School of Medical Research im Institut für Neurowissenschaften und am ARC Center of Excellence in Vision Science.

QUELLEN

Lamb, T.D. et al.: Evolution of the Vertebrate Eye: Opsins, Photoreceptors, Retina and Eye-Cup. In: Nature Reviews Neuroscience 8, S. 960–975, 2007

Lamb, T.D. et al.: The Evolution of Phototransduction and Eyes. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B 364, S. 2789–2967, 2009

The Evolution of Eyes. Verschiedene Aufsätze. Sonderband von: Evolution: Education and Outreach 1, S. 351–516, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135748

Anzeige

ZOOLOGIE

Die Tricks der Fühlerschlange

Eine kleine Wasserschlange überrumpelt ihre Beute mit höchst ausgeklügelten Techniken – und in atemberaubendem Tempo. Solche Raffinessen beherrscht sie schon von Geburt an.

Von Kenneth C. Catania

Der Name sagt es: Fühlerschlangen tragen vorn am Maul zwei Tentakel. Dieses Tier züngelt gerade.

KENNETH C. CARANIA

Wir Menschen bilden uns viel auf unser überragendes Gehirn ein. Aber als Biologe hüte ich mich inzwischen davor, die Hirnleistungen anderer Geschöpfe zu unterschätzen, und mögen es angeblich noch so primitive, dumme Tiere sein. Oft haben mir Säugetiere hier schon verblüffende Lektionen erteilt, wie der Sternmull (siehe meinen Artikel »Die schnellste Nase der Welt«, SdW 12/2002, S. 54). Doch jetzt brachte mich ein kleines Reptil zum Staunen: die Tentakel- oder Fühlerschlange aus Südostasien.

Erpeton tentaculatus (teils auch als *E. tentaculatum* bezeichnet) lebt in Gewässern Thailands, Kambodschas und Südvietnams. Die Tiere werden 70 bis 90 Zentimeter lang, sind lebend gebärend und ernähren sich fast ausschließlich von Fischen. Das Auffälligste an dieser kleinen Schlange sind die beiden beschuppten, an Fühler erinnernden Fortsätze oben beidseits des Mauls, eine Besonderheit dieser Art.

Zum ersten Mal fiel mir das seltsame Reptil auf, als ich vor zehn Jahren wieder einmal den Washingtoner »National Zoo« besuchte, wo ich als Student oft gejobbt hatte. In einem ziemlich zugewucherten Aquarium im Reptilienhaus lag solch eine Schlange reglos im Wasser. Man konnte sie fast für

einen Pflanzenstängel halten. Genauer gesagt ähnelte sie einem vorn J-förmig gebogenen Stöckchen – die typische Lauerstellung einer hungrigen Fühlerschlange. Ich fragte mich damals, wozu ihr die beiden eigenartigen Tentakel vorn am Kopf wohl dienen mochten. Ob sie damit vielleicht Beute aufspürt? Doch als ich später die wissenschaftliche Literatur durchforstete, fand ich dazu nichts als ein paar Vermutungen. Offenbar hatte noch niemand diese Frage experimentell untersucht. Also nahm ich die Sache in Angriff.

Bei diesen Studien überraschten mich die Fühlerschlangen bald in unerwarteter Weise. Denn nicht nur die beiden Anhängsel am Maul entpuppten sich tatsächlich als einzigartige Hilfsinstrumente zum Fressen. Das Reptil beherrscht, wie ich bald entdeckte, auch mehrere unglaubliche Tricks, um Fische zu fangen. Da das bereits frisch geborenen, erst wenige Zentimeter langen Schlangen gelingt, kann dieses komplizierte Verhalten nicht gelernt sein. *Erpeton tentaculatus* liefert somit ein eindrucksvolles Beispiel dafür, dass die Evolution mitunter höchst aufwändige Verhaltensweisen hervorbringt.

Doch anfangs wollte ich ja nur herausfinden, ob die Kopfanhängsel wirklich Fühler darstellen – also dem Tier in irgendeiner Weise zur Orientierung dienen, wie ich vermutete. Dazu musste ich zunächst genauestens beobachten, wie die Tentakelschlangen überhaupt jagen. Das war allerdings schwierig, denn sie – und auch ihre Opfer – bewegen sich dabei unglaublich fix: Eine Attacke, einschließlich Fluchtreaktion des Fisches und kompletten Verschlingens der Beute, dauert gewöhnlich nur rund 40 Millisekunden: eine fünf- und zwanzigstel Sekunde. Ich musste eine Hochgeschwindigkeitskamera zu Hilfe nehmen. Damit filmte ich eine Reihe von Schlangen wieder und wieder mit 500 bis 2000 Bildern pro Sekunde beim Fressen.

Als ich diese Filme in Zeitlupe auswertete, wunderte ich mich, dass die doch eigentlich flüchtenden Fischchen recht oft direkt auf das Schlangenmaul zuschwammen und nicht selten sogar geradewegs hineinflitzten. Nun haben Fische eine Menge Feinde und stehen bei vielen räuberischen Arten ganz oben auf der Beuteliste. Entsprechend sind sie eigent-

AUF EINEN BLICK

HINTERLISTIGER KILLERINSTINKT

1 Die Fühlerschlange, eine kleine, für den Menschen nur schwach giftige Wasserschlange, lebt in Südostasien und ernährt sich von Fischen. Außerlich fallen ihre beiden **Tentakel** seitlich vor dem Maul auf – sie zeichnen diese Art aus.

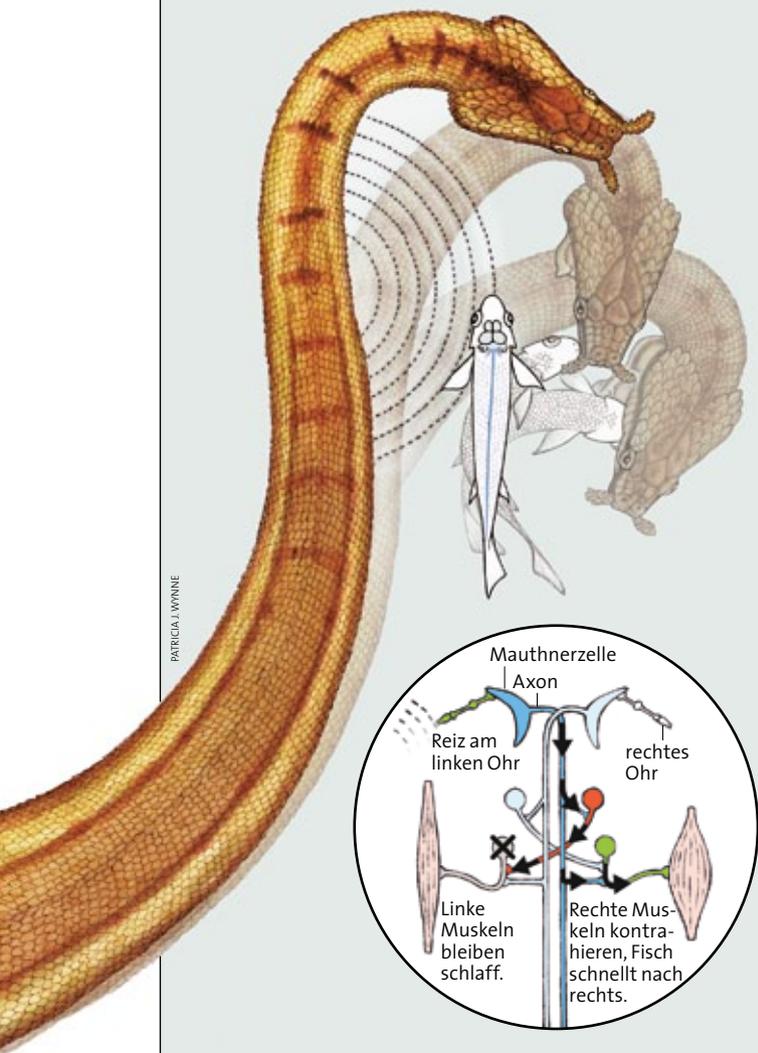
2 Die beiden Fühler vorn am Kopf dienen zur **Ortung von Beutefischen**. Mit ihrer Hilfe kann sich das Reptil, das meist reglos im Wasser lauert, selbst unter schlechten Sichtverhältnissen Nahrung beschaffen.

3 Zudem bedient sich die Schlange angeborener, höchst ausgefeilter Fangmethoden. Erst **hochfrequente Filmaufnahmen** zeigten, wie sie den Fluchtreflex von Fischen ausnutzt, damit sich die Beute selbst direkt in ihr Maul befördert.

Den Fluchreflex ausgenutzt

Fühler- oder Tentakelschlangen lauern ihrer Beute mit im Bogen gekrümmtem Vorderkörper auf, wobei sie reglos wie ein Pflanzenstängel im Wasser treiben. Für Beutefische ist das eine Falle. Durch eine Zuckung gegenüber ihrem Kopf erzeugt die Schlange eine Druckwelle, die den Fisch reflexhaft flüchten lässt. Die Fluchrichtung ist von der Schlange so berechnet, dass das Opfer auf ihr Maul zuschwimmt.

Noch unglaublicher sind ihre Fangmethoden, wenn der Fisch in ungünstiger Position zum Schlangenkopf steht. Auch dann schickt das Reptil das Opfer in die Flucht – doch es berechnet die Fluchrichtung voraus und stößt mit dem Kopf schon vorher an die richtige Stelle vor (Zeichnung).



Dank ihres Fluchreflexes können Fische blitzschnell entfliehen. Die beiden riesigen Mauthnerzellen in ihrem Hirnstamm sorgen dafür. Diejenige von ihnen, die zuerst erregt wird, löst den so genannten C-Start aus: Der Fisch krümmt sich sofort von der Gefahr weg und flitzt davon. Dieses Verhalten berechnen Fühlerschlangen bei ihren Attacken ein.

lich bestens dafür gerüstet, bei Gefahr blitzschnell zu reagieren und zu fliehen. Wenn ein Geräusch oder eine Wasserbewegung sie aufschreckt, setzt ihr Fluchreflex schon nach sechs bis sieben Millisekunden ein. Typischerweise machen sie dabei einen so genannten C-Start: Sie biegen den Körper sogleich direkt von der Gefahrenrichtung weg und schnellen dann fort. Wieso liefern sie sich den Fühlerschlangen trotzdem regelrecht aus?

Fallenbau mit dem eigenen Körper

Das Reptil, so entdeckte ich schließlich, stellt ihnen eine Falle – mit seinem eigenen Körper. Es attackiert nämlich hauptsächlich Fische, die sich gerade im Halbrund der J-Biegung von Kopf und Vorderkörper der Schlange aufhalten. Die sorgfältige Analyse der Filmaufnahmen ergab: Unmittelbar bevor die bis dahin reglose Schlange zuschnappt, zuckt bei ihr eine Körperpartie, die genau in Verlängerung der Linie von ihrem Maul zum Opfer liegt – also auf der von ihrem Kopf abgewandten Seite des Fisches. Dieser nimmt die vom Zucken ausgelöste Druckwelle wahr und flieht sofort vor der vermeintlichen Gefahr in die entgegengesetzte Richtung, somit direkt auf das offene Schlangenmaul zu. Dass die Druckwelle stark genug ist, um einen Fisch zu erschrecken, konnte ich mit einem Mikrofon nachweisen, mit dem ich das Geräusch unter Wasser aufzeichnete, während ich die Szene gleichzeitig mit einer Auflösung von 2000 Bildern pro Sekunde filmte.

Das Täuschungsmanöver der Schlange ist deswegen so tückisch, weil es ausgerechnet den natürlichen Fluchreflex von Fischen ausnutzt, der bereits nach wenigen Millisekunden einsetzt. Dieser basiert auf einem eigentlich höchst hilfreichen neuronalen Schaltkreis, der dafür sorgt, dass sich der Fisch von der Gefahr zur Seite wegbiegt und in dieser Richtung davonschnellt (siehe Verschaltungsschema im Kasten links). Dabei treten die beiden so genannten Mauthnerzellen in Aktion, zwei auffallend große Neurone im Hirnstamm von Fischen und auch Amphibien, je eins auf der rechten und auf der linken Seite. Sie heißen nach ihrem Entdecker, dem österreichischen Forscher Ludwig Mauthner (1840–1894). Ob ein Fluchreflex erfolgt und nach welcher Seite hin er gerichtet ist, machen die beiden riesigen Hirnzellen unter sich aus. Es gewinnt immer diejenige, die nach einem Reiz zuerst erregt wird – und das ist normalerweise jene auf der Gefahrenseite. Etwaige spätere Befehle der anderen Zelle werden dann sofort automatisch unterdrückt.

Kommt die Gefahr von links – zum Beispiel weil das linke Ohr ein Geräusch zuerst wahrnimmt –, registriert also die linke Mauthnerzelle die Meldung zuerst. Sie schickt daraufhin unverzüglich ein Signal an die motorischen Neurone der rechten Körperhälfte, denn das Axon (der weiterleitende Fortsatz) einer Mauthnerzelle kreuzt jeweils auf die andere Seite des Gehirns. Die erregten Motoneurone veranlassen sogleich die Muskeln der rechten Körperflanke, sich kräftig zusammenzuziehen. Gleichzeitig verhindern hemmende Nervenzellen, die zurück nach links kreuzen, dass Muskeln der linken Seite kontrahieren. Durch diesen ausgeklügelten,

strengen Reflex kann der Fisch gar nicht anders als nach rechts davonschnellen. Pech hat er nur, wenn genau in seiner Fluchtrichtung ein Schlangenmaul wartet. Er könnte die Reaktion im Übrigen gar nicht mehr korrigieren – das verhindern die automatischen Hemmsignale.

Die besondere Weise, wie Fühlerschlangen ihre Beute überwältigen, erklärt manche früheren, bisher unverständlichen Beobachtungen. Zum Beispiel wunderte sich 1999 John C. Murphy vom Field Museum of Natural History in Chicago darüber, wie unglaublich schnell die Schlange frisst. Er filmte sie dabei mit 30 Bildern pro Sekunde. Mitunter war ein Fisch schon von einem Bild zum nächsten spurlos verschwunden – und die Schlange wirkte, als wäre nichts gewesen. Schlangen können Fische am raschesten mit dem Kopf voran verschlingen. Meine Aufnahmen beweisen, dass ebendies Fühlerschlangen meistens gelingt. Auf den Bildern ist deutlich zu sehen: Auch wenn das Opfer dem Reptil nicht geradewegs ins Maul flitzt, bringt es sich durch die reflexartige Kehrtwende doch meist in eine Position, bei der es Kopf voran verschluckt wird.

Die hohe Geschwindigkeit dürfte nicht nur eine größere Anzahl von Beuteschlägen in kurzer Zeit erlauben – solche äußerst rasch beendeten Attacken erhöhen sicherlich auch die Tarnwirkung als scheinbar regloses Stöckchen, sowohl für die nächsten Opfer als auch die eigenen Fressfeinde. Andere bislang arglose potenzielle Beutefische in der Nähe sollten schließlich von dem ganzen Vorgang möglichst überhaupt nichts bemerken, genauso wenig wie die vielen größeren Räuber, die es in dem Lebensraum auch gibt.

Gemäß einem Motto des amerikanischen Psychologen Burrhus F. Skinner (1904–1990): »Lass alles andere stehen und liegen, wenn dir irgendwo etwas richtig Interessantes unterkommt«, schob ich zunächst die Studien über die Fühler zur Seite und erforschte stattdessen den Beutefang von Tentakelschlangen genauer. Wie vielseitig dieses Reptil ist und wie gut es verschiedene Situationen austariert, hatte ich allerdings nicht erwartet.

Gut geplant ist halb gefangen

Die eben beschriebene Fangmethode – bei der das Opfer dem praktisch reglosen Räuber mehr oder weniger direkt ins Maul schwimmt, ohne dass der seinen Kopf groß bewegen muss – funktioniert nur, wenn sich der Fisch sozusagen im Brennpunkt des von der Schlange geformten Bogens aufhält und dabei außerdem etwa parallel zu den Kiefern des Räubers ausgerichtet ist. Dann vermag ihn die Schlange so zu erschrecken, dass er genau auf ihr Maul zu abdreht. Einen Fisch, dessen Kopf schon vorher zu ihrem eigenen weist, kann sie aber nicht auf die gleiche Weise schnappen – er würde im Reflex nach rechts oder links ausbrechen. Für solche Fälle hat sie eine andere, noch eindrucksvollere Lösung parat (dargestellt in der Zeichnung im Kasten links): Sie berechnet Fluchtrichtung und -geschwindigkeit des Opfers im Voraus und schnell mit dem Kopf zeitlich passend so vor und herum, dass sie dem Flüchtling den Weg abschneidet. Auch in dieser Situa-



KENNETH C. CATANIA

Die beschuppten Fühler der Tentakelschlange sind im Rasterelektronenmikroskop deutlich zu erkennen. Sie sind hervorragende Ortungsorgane für geringe Wasserbewegungen – und somit hocheffiziente Fischdetektoren.

tion veranlasst sie zuerst mit einem Körperzucken einen Fluchtreflex weg von sich selbst. Das bringt den Fisch diesmal parallel zu ihrer Ausgangskopfhaltung. Aber schon bevor dieser sich überhaupt bewegt, stößt der Schlangenkopf bereits vor – und erwischt dann, wenn alles gut geht, den flüchtenden Fisch wiederum genau am Kopf.

So schnell, wie das Ganze geschieht, kann die Schlange unmöglich eine visuelle Rückmeldung über den wegschwimmenden Fisch einbeziehen. Ihr Bewegungsablauf in dieser Situation scheint demnach zuvor geplant zu sein. Dass dem tatsächlich so ist, zeigt sich, wenn der Fisch im Experiment einmal nicht die übliche Fluchtrichtung einschlägt. Die Attacke zielt dann trotzdem genau auf eine bestimmte Stelle der normalen Fluchtrichtung – und somit ins Leere.

Also führen die Angriffstricks nicht zwangsläufig in jedem Fall zum Erfolg. Manchmal schnappt die Schlange auch einfach nur zu, wenn sie sich das Opfer nicht vorher durch ein Körperzucken zutreiben kann. Meistens allerdings lauern Fühlerschlangen darauf, dass ein Fisch in die Falle geht, die sie mit ihrem Vorderkörper bilden. In dem Zusammenhang



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Die raffinierte Fangtechnik der
Fühlerschlange im Video:

www.spektrum.de/fuehlerschlange



KENNETH C. CATANIA

Eine Fühlerschlange scheut keine Verrenkungen, um einen Fisch von vorn zu erwischen – die praktischste und vor allem schnellste Fressmethode.

beobachtete ich noch mehrere andere bemerkenswerte Angriffswesen mit offenbar vorher feststehendem Ablauf. Bei einer besonders akrobatischen Variante verdreht das Reptil seinen Kopf unter seinen eigenen Körper. Auch so erwischt es manches davonflitzende Opfer von vorn.

Erpeton tentaculatus beherrscht demnach verschiedene Fangstrategien und wählt jeweils die zur Situation passende. Wir fragten uns, ob eine Tentakelschlange solche Feinheiten erst mühsam lernen muss oder ob sie schon mit den passenden Verhaltensprogrammen geboren wird. Glücklicherweise bekamen einige unserer Tiere Junge. Als wir den unerfahrenen Nachwuchs, der anfangs nur zwei oder drei Zentimeter misst, beim Fischfangen filmten, zeigte sich klar: Fühlerschlangen können von Geburt an vorausberechnen, wohin der getäuschte Fisch sich normalerweise wenden wird, und richten ihre Attacke dorthin. Sowohl die Einschätzung des Fluchtwegs eines aufgeschreckten Fisches als auch die jeweils beste Überrumpelungstaktik für eine Situation ist ihnen anscheinend angeboren. Sogar Fangschläge mit unter den Körper gewundenem Kopf beobachteten wir schon bei den unerfahrenen Jungschlangen.

Schnelligkeit als Tarnstrategie

Wenn ein Tier ohne jede Lernerfahrung über derart raffinierte Verhaltensabläufe verfügt, spricht das für eine längere evolutionäre Vorgeschichte. Bei den Fühlerschlangen muss sich dieses Verhalten in seinen verschiedenen Formen über viele Generationen fischfangender Vorfahren herausgebildet haben, wobei die Attacken immer findiger wurden. Wir wissen zwar aus unseren Versuchen, dass eine Tentakelschlange durchaus auch aus Vorkommnissen lernen kann, doch die einzelnen Fangstrategien dürften ihr grundsätzlich angeboren sein. Insbesondere die noch unerfahrenen Jungtiere sind von Anfang an auf rasches, effektives Beuteschlagen angewiesen, das in der Umgebung möglichst kein Aufsehen erregt.

Unauffälligkeit steigert ihre Überlebenschancen. Im Grunde nutzt die Tentakelschlange einfach einen angeborenen Reflex von Fischen aus – den C-Start. Daran hat sie sich während ihrer Evolution hochpräzise angepasst. Die Fluchtrichtung eines Fisches ist vorhersagbar, wenn klar ist, woher der Schreckreiz kommt – und danach richtet sich die Schlange. Wer sich nun fragt, wieso denn die Fische nicht ihrerseits evolutionäre Gegenanpassungen hervorgebracht haben, dem sei mit dem amerikanischen Evolutionsforscher Stephen Jay Gould (1941–2002) geantwortet: Ein bestimmter Feind kann ein Schutzverhalten der potenziellen Beute für seine Zwecke verwenden, ohne dass die Beutetiere spezielle Maßnahmen gegen ihn entwickeln würden – sofern er selten genug vorkommt. Vor den meisten anderen Feinden hilft der C-Start auf einen Schreckreiz hin Fischen ja wirklich zu entkommen.

Und was ist mit den auffälligen Fühlern dieser Schlange? Über ihre Funktion haben meine Mitarbeiter Duncan Leitch, Danielle Gauthier und ich ebenfalls einiges herausgefunden. Die beiden Anhängsel stecken, wie wir erkannten, voller feiner Nervenendigungen. Anatomische und neurophysiologische Studien und Gehirnkartierungen erwiesen, dass sie höchst empfindliche Tast- oder Fühlorgane – Mechanorezeptoren – darstellen. Mit ihnen erkennt das Reptil an leichten Wasserbewegungen genau, wo sich etwas in der Nähe bewegt.

Zwar haben Fühlerschlangen offenbar sehr gute Augen und erkennen damit Beutefische. Doch sie können auch im Dunkeln, wenn sie nichts mehr sehen, ihre Opfer orten und erfolgreich zuschlagen. Als wir die Tiere nur bei Infrarotlicht filmten, das sie nicht wahrnehmen, erwischten sie die Fische trotzdem – sicherlich mit Hilfe der Tentakel. Das dürfte ihnen nachts und in trübem Wasser beim Jagen helfen, während sie sonst wohl Fühler und Augen zusammen einsetzen. ~

DER AUTOR



Kenneth C. Catania ist Professor für Biowissenschaften an der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee). Der Neurobiologe erforscht hauptsächlich Sinnessysteme verschiedener Tiere.

QUELLEN

Catania, K.C.: Tentacled Snakes Turn C-Starts to Their Advantage and Predict Future Prey Behavior. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 106, S. 11183–11187, 7. Juli 2009

Catania, K.C.: Born Knowing: Tentacled Snakes Innately Predict Future Prey Behavior. In: PLoS One 5, e10953, 16. Juni 2010

Catania, K.C. et al: Function of the Appendages in Tentacled Snakes (*Erpeton tentaculatus*). In: Journal of Experimental Biology 213, S. 359–367, Februar 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124677

Anzeige

Die vielen Facetten der Aufmerksamkeit

Ein viel bemühter Begriff harrt noch immer seiner wissenschaftlichen Klärung. Fest steht jedoch: Hinter »Aufmerksamkeit« verbirgt sich ein kompliziertes Puzzle ganz unterschiedlicher kognitiver Teilleistungen.

Von Reinhard Werth

Nach einem anstrengenden Arbeitstag fährt Herr S. mit dem Auto nach Hause. Er nimmt seine übliche, vertraute Strecke und lässt im Geist noch einige Ereignisse des Tages Revue passieren. Plötzlich schrecken ihn Hupen und das Geräusch blockierender Räder auf. Er sieht gerade noch, wie ein Fahrzeug auf ihn zurast. Später wird ihm unerklärlich sein, wie er das Stoppschild und das andere Auto übersehen konnte. Vor Gericht wird man ihm vorwerfen, er habe dem Straßenverkehr nicht genügend Aufmerksamkeit geschenkt und sei schuld an dem Unfall.

Doch was heißt hier eigentlich »Aufmerksamkeit«? In den letzten Jahrzehnten hat sich bei Untersuchungen von Gesunden, von Heranwachsenden mit Aufmerksamkeitsstörungen und von hirngeschädigten Patienten gezeigt: Was wir alltags-sprachlich als Aufmerksamkeit bezeichnen, setzt sich in Wirklichkeit aus mehreren voneinander unabhängigen Einzelleistungen unseres Gehirns zusammen. Entsprechend unterschiedlich können auch mögliche Einbußen ausfallen, denn jede dieser Komponenten kann für sich gestört sein, während andere intakt bleiben. Bis heute ist diese Erkenntnis

allerdings weder in die gängigen diagnostischen Handbücher psychischer Störungen, das DSM-IV und den ICD-10, noch in die medizinischen Praxis eingegangen.

Eine zentrale Einzelleistung ist die Steuerung des Aufmerksamkeitsfelds – jenes Ausschnitts unserer Umgebung, auf den wir bewusst achten. Die Empfindlichkeit unseres Sehsystems passt sich den Umständen an. Erwarten wir beispielsweise, dass ein Auto von rechts im Gesichtsfeld auftauchen könnte, während wir die Augen geradeaus auf den Verkehr vor uns gerichtet halten, erhöhen wir willentlich die Sensibilität des Gehirns für Informationen im rechten Sehfeld. Subjektiv erleben wir das als Richten der Aufmerksamkeit dorthin. Man kann in Labormessungen nachweisen, dass dann in dem entsprechenden Netzhautareal lichtschwache Reize Reaktionen auslösen, die normalerweise nicht mehr registriert würden. Es lassen sich sogar gezielt sehr kleine Bereiche unseres Gesichtsfelds auf diese Weise sensibilisieren.

Je schwerer die Aufgabe, desto mehr Hirnaktivität

Welche neurobiologischen Mechanismen dem zu Grunde liegen, entdeckte ein Forscherteam um Yao Chen und Susana Martinez-Conde vom Laboratory of Visual Neuroscience des Barrow Neurological Institute in Phoenix, US-Bundesstaat Arizona. Die Wissenschaftler brachten Affen bei, geradeaus zu blicken, während ein Lichtreiz irgendwo im Gesichtsfeld erscheint. Zudem trainierten sie die Tiere darauf, bei einer veränderten Farbe des Reizes einen Hebel zu betätigen. Vor einem solchen Stimulus erhielten die Affen einen Hinweis, in welchem Bereich des Gesichtsfelds er erscheinen wird und ob sich die Farbänderung einfach oder nur schwer entdecken lässt. Je nachdem richteten sie folglich mehr oder weniger Aufmerksamkeit dorthin, wo sie den Lichtreiz erwarteten.

Es zeigte sich, dass bei einer als schwierig angekündigten Aufgabe 42 Prozent der Nervenzellen im betreffenden Bereich des Sehsystems des Großhirns (Area V1) überdurchschnittlich stark feuerten. Erwarteten die Tiere eine leichte

AUF EINEN BLICK

SCHIEFER WERFER DES BEWUSSTSEINS

1 Was wir im Alltag »Aufmerksamkeit« nennen, setzt sich aus **mehreren voneinander unabhängigen Teilleistungen** zusammen. Entsprechend unterschiedlich fallen auch einzelne Aufmerksamkeitsdefizite aus.

2 **Heranwachsende mit ADHS** leiden unter Umständen an sehr verschiedenen Teilleistungsstörungen. Kinderärzte und Therapeuten müssen sie daher jeweils individuell betrachten und behandeln.

3 Die Fokussierung der Aufmerksamkeit wird durch Hirnstrukturen gesteuert, die **Teile des präfrontalen Kortex und der Großhirnrinde im Bereich von Schläfen- und Scheitellappen** einschließen.

Aufgabe, waren nur acht Prozent der Neurone dort aktiver. Dieser Zusammenhang zwischen Aufmerksamkeit und Höhe der Entladungsrate trat jedoch nur in jenen Bereichen der Sehrinde auf, die den Ort im Gesichtsfeld repräsentieren, für den die Reize angekündigt waren.

Übertragen auf den Fall von Herrn S. lässt sich annehmen, dass dieser seine Aufmerksamkeit in Fahrtrichtung richtete, also in das Zentrum des Gesichtsfelds. In dessen Außenbereichen erwartete er keine bedeutsamen Reize wie sich nähernde Fahrzeuge, da er irrtümlich glaubte, er hätte Vorfahrt. Wegen seiner Müdigkeit war das Aufmerksamkeitsniveau dort besonders niedrig. Die Hirnareale, die diese äußeren Gesichtsfeldbereiche repräsentieren, waren also nur sehr wenig aktiv. Informationen am Gesichtsfeldrand wie das Stoppschild oder das sich nähernde Fahrzeug übersah er deshalb.

Fehlsteuerungen des Aufmerksamkeitsfelds treten auch bei verschiedenen Störungen auf, wie man sie häufig bei Kindern und Jugendlichen beobachtet: Das Feld weitet sich nicht nach den Erfordernissen der Situation aus, weshalb die Betroffenen Objekte übersehen, etwa im Schulunterricht. Sie wirken dann oft schwerfällig und reaktionsträge. Umgekehrt weisen viele Kinder mit einem Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom mit oder ohne Hyperaktivität (AD(H)S) eine dauernde

Selbst ein auffälliges Stoppschild übersieht ein Autofahrer leicht, wenn seine Aufmerksamkeit nicht darauf gerichtet ist. Im konkreten Einzelfall führt vielleicht Müdigkeit zu einem eingegengten Aufmerksamkeitsfeld oder zu unsystematischen Suchbewegungen von Augen und Kopf.

DREAMTIME / CHRIS DRISCOLL



Weitstellung des Aufmerksamkeitsfelds auf. Sie registrieren dadurch fortwährend völlig irrelevante Objekte der Umwelt, lassen sich also beispielsweise in der Schule leicht ablenken, anstatt sich mit dem zu beschäftigen, was ihren Lehrern wichtig ist. »Ihr Kind ist unfähig, sich mehr als fünf Minuten auf etwas zu konzentrieren«, bekommen die Eltern dann oft vorgehalten.

Ein typischer Fall von erweitertem Aufmerksamkeitsfeld tritt etwa bei meiner Patientin Frau H. zu Tage. In einer Umgebung mit zahlreichen ablenkenden Reizen, zum Beispiel einem Restaurant, fällt es ihr schwer, sich auf den Gesprächspartner zu konzentrieren. Fortwährend entdeckt sie Personen im Gesichtsfeld, die andere Menschen übersehen würden, und ihre Augen springen unwillkürlich bald zu dieser, bald zu jener. Zudem kann Frau H. es nicht vermeiden, Gesprächen an Nachbartischen zuzuhören, die sonst niemand wahrnehme. Dennoch ist sie in entscheidenden Situationen mit einiger Anstrengung in der Lage, ihre Aufmerksamkeit zu fokussieren, so dass sie in Studium und Beruf erfolgreich ist. Das ständig erweiterte Aufmerksamkeitsfeld hat hier sogar den Vorteil, dass Frau H. über eine besondere Beobachtungsgabe verfügt und manches aufschnappt, was anderen entgeht. Damit handelt es sich bei ihrem Fall zwar um eine Abweichung von der Norm, aber keine echte Erkrankung.

Ganz anders verhielt es sich bei einem siebenjährigen Jungen, den ich vor einigen Jahren untersuchte. Er konnte sei-

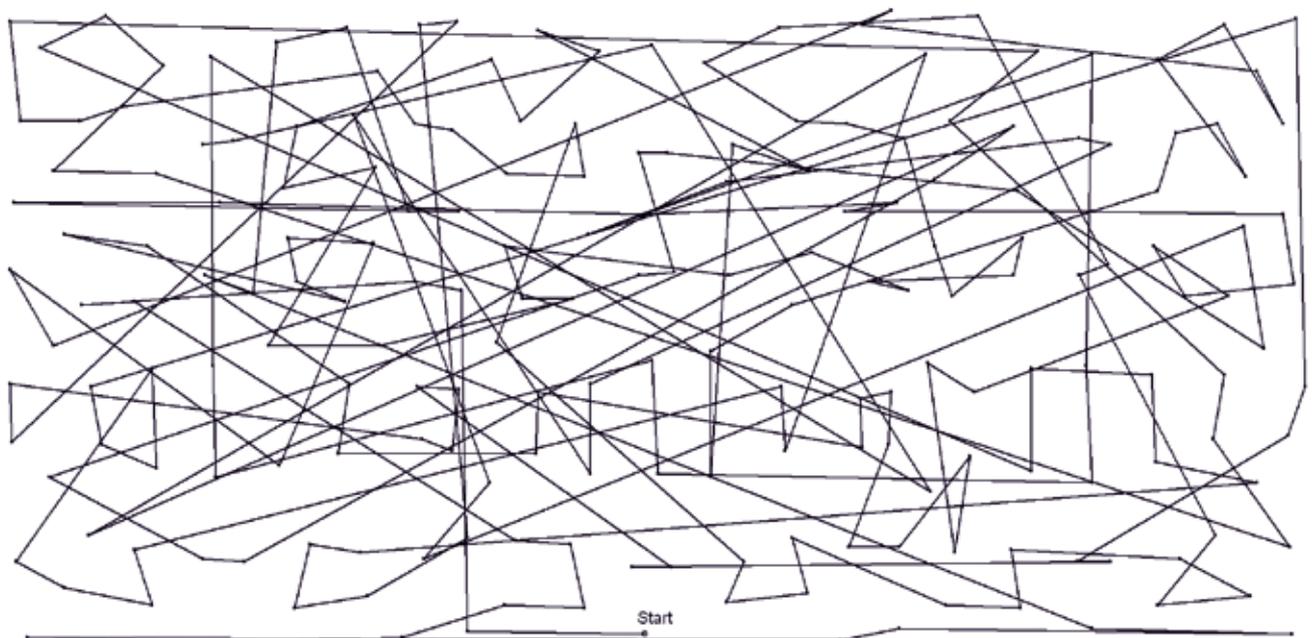
nen Blick zwar einige Sekunden auf einen Reiz richten, solange sich keine weiteren in seinem Gesichtsfeld befanden. Doch jeder noch so schwache neue Stimulus, den ein normaler Beobachter nicht wahrnehmen würde, wurde registriert und zog seinen Blick geradezu magnetisch an. Der Junge erwies sich als derart leicht ablenkbar, dass er nicht am Schulunterricht teilnehmen konnte. Eine genaue Untersuchung seines Aufmerksamkeitsfelds brachte an den Tag, dass er unerwartet auftretende Lichtpunkte von einer äußerst geringen Helligkeit entdeckte, die andere Kinder gar nicht mehr registrierten, und die Augen auf sie richtete.

Schere als Puzzlebild

Umgekehrt können sich nach einer Hirnschädigung geradezu röhrenartige Einschränkungen des Aufmerksamkeitsfelds einstellen. Der deutsche Militärarzt Walther Poppelreuter (1886–1939) beschrieb das bereits 1917 sehr treffend als »Störung des Überschauens«. Ein Patient von mir, bei dem geschädigte Hirnregionen durch eine verminderte Durchblutung nachweisbar waren, konnte sein Aufmerksamkeitsfeld nicht einmal so weit ausdehnen, dass er einen Gegenstand wie eine Schere als Ganzes wahrnahm. Obwohl er in keinem Gesichtsfeldbereich erblindet war, vermochte er jeweils nur einen Teil einer Klinge zu erkennen, dann eine zweite Klinge, schließlich deren Kreuzung und zuletzt die Griffe. Daraus schloss er, dass es sich um eine Schere handeln müsse. Untersuchte man dagegen sein Gesichtsfeld mit einem einzigen Lichtpunkt, zeigte sich keinerlei Einschränkung – egal, wo darin der Reiz auftauchte.

Gilt es, ein Objekt genau visuell zu analysieren, so müssen wir den Blick darauf richten und an der Stelle des schärfsten Sehens im Zentrum des Gesichtsfelds (Fovea centralis) ein Aufmerksamkeitsfeld ausbilden. Objekte außerhalb dieses Felds erkennen wir dann schlechter. Es kann jedoch auch

Die Linien zeichnen die unsystematischen Suchbewegungen bei einem siebenjährigen Jungen nach, der am Computer ein Bild nach zwei Zentimeter langen Strichen durchforsten und jeden davon mit der Maus markieren sollte. Den Grad der Systematik bei diesem Test drücken Psychologen mit dem so genannten Explorationsleistungsfaktor aus.



sein, dass wir auf etwas schauen und dennoch kein Aufmerksamkeitsfeld ausbilden. Das sind etwa Zustände, die man im Alltag als »geistig abwesend«, »träumen mit offenen Augen« und »mit leerem Blick vor sich hin starren« bezeichnet. So mag ein Schüler seinen Blick durchaus auf die Tafel richten und dennoch das dort Notierte nicht erfassen, weil er für die Stelle schärfsten Sehens kein Aufmerksamkeitsfeld ausbildet. Die Information über die abgebildeten Reize gelangt dann zwar ins Gehirn, wird dort aber nur wenig oder gar nicht verarbeitet.

Eine ganz andere Art von Problem sind Störungen der visuellen Exploration: des Absuchens der Umwelt mittels Augen- und Kopfbewegungen. Dieses ist notwendig, da die Sehschärfe zum Rand des Gesichtsfelds hin rapide abnimmt. Wandert

ein Reiz, etwa ein Verkehrsschild oder ein Fahrzeug, in die Peripherie des Gesichtsfelds, kann es dort auf Grund der geringen Sehschärfe nicht ausreichend analysiert werden. Das Bild dieses Objekts muss hierfür erst mittels Augen- und Kopfbewegungen in das Zentrum des Gesichtsfelds gelangen: zum Ort des schärfsten Sehens. In Situationen wie dem Straßenverkehr, in denen laufend neue wichtige Reize in das Gesichtsfeld treten, lösen diese automatisch solche motorischen Reaktionen aus.

Daneben erfolgen solche Bewegungen auch laufend spontan und ohne dass sie willentlich gesteuert werden. So erkunden wir fortwährend unsere Umwelt, ohne jedes Mal bewusst zu entscheiden, wohin wir als Nächstes schauen werden.

Das Absuchen der Umwelt durch Augen- und Kopfbewegungen muss nun einem bestimmten Plan folgen, damit ein Mensch die Ausschnitte seiner Umwelt und die Objekte, die in der jeweiligen Situation für ihn wichtig sind, möglichst rasch entdeckt und analysiert. Nähert sich ein Autofahrer zum Beispiel einer Kreuzung, so wird er in der Regel nicht in die Wolken oder auf das Grün der Alleebäume schauen, sondern nach einem Verkehrsschild suchen, das die Vorfahrt regelt, und dann in die Seitenstraße blicken. Nur so kann rechtzeitig eine der Situation angemessene Reaktion erfolgen. Bei planlosem Absuchen dauert es nicht nur länger, bis die Bilder wichtiger Objekte zum Ort schärfsten Sehens verschoben werden, sondern sie werden auch leichter völlig übersehen.

Eine Störung der visuellen Exploration beobachten Mediziner bei manchen Patienten mit erworbenen Hirnschädigungen, aber auch bei Kindern mit entwicklungsbedingten Aufmerksamkeitsstörungen. Wenn die Betroffenen sich orientieren oder ein Objekt suchen, schauen sie ziellos umher (siehe Bild links). Diese Form der Aufmerksamkeitsstörung unterscheidet sich grundlegend etwa von der Ablenkbarkeit auf Grund eines ständig zu weit ausgedehnten Aufmerksam-

keitsfelds. Tobias Barner und ich haben am Institut für Soziale Pädiatrie und Jugendmedizin der Ludwig-Maximilians-Universität München ein Verfahren entwickelt, mit dem wir verschiedene Abstufungen mangelnder Suchsystematik ausdrücken und vergleichen können.

Allein die Tatsache, dass das Bild eines Objekts auf der Netzhaut am Ort schärfsten Sehens ist und hierfür ein Aufmerksamkeitsfeld ausgebildet wurde, reicht noch nicht aus, damit ein Proband das Objekt richtig erkennt. Entscheidend ist auch die Fixationszeit: die Zeitspanne, die das Abbild in

der Fovea centralis verweilt. Bereits die Alltagserfahrung lehrt, dass wir viele Dinge oder Vorgänge nicht richtig erfassen, wenn wir nur einen flüchtigen Blick auf sie werfen. So müssen etwa mehrere übereinander angebrachte Verkehrsschilder oder ein

Fußgänger am Fahrbahnrand lange genug im Bereich schärfsten Sehens verbleiben, also fixiert werden, damit wir sie erkennen. Sonst können wir die Bedeutung der Verkehrsschilder oder die Absicht des Fußgängers nicht entschlüsseln.

Kinder zeigen häufig zu kurze Fixationszeiten: Sie blicken dann nur flüchtig zu Objekten hin und wenden den Blick bereits wieder von ihnen ab, bevor sie sie richtig erkannt haben. Dem zu Grunde liegen Fehler des Gehirns bei der Aufgabe, automatisch, also unbewusst, zu entscheiden, wie lange der Blick auf ein Objekt oder eine Szene gerichtet sein muss. Manchmal ziehen auch Reize, die in der Peripherie des Gesichtsfelds erscheinen und normalerweise ignoriert werden, die Augen automatisch auf sich. Diesem Impuls können die Kinder nur mit Mühe oder gar nicht widerstehen.

Wann ein kurzer Blick nicht genügt

Auf zu kurzen Fixationszeiten beruhen häufig auch Lesestörungen. Ein Kind, das nur einen kurzen Blick auf die Tafel wirft, wird ein dort aufgezeichnetes Schaubild nicht erfassen, eine dort ausgeführte Rechenaufgabe nicht verstehen, einen geschriebenen Text nicht lesen können. Wie lange die Fixation dauern muss, hängt von der Komplexität des Gegenstands oder der Szene ab.

Um all diese verschiedenen Komponenten der visuellen Aufmerksamkeit unter genauer Kontrolle der Augenbewegungen zu untersuchen, haben Tobias Barner und ich gemeinsam mit weiteren Kollegen computergestützte Diagnoseverfahren entwickelt. Außer der erwähnten visuellen Exploration untersuchen wir dabei unter anderem die Fähigkeit, einen stationären und einen bewegten Reiz in Gegenwart ablenkender Stimuli konstant zu fixieren, messen die Größe des Aufmerksamkeitsfelds in Abhängigkeit von Anzahl, Helligkeit und Kontrast der Reize und erfassen Reaktionszeiten je nach Ort, auf den die Aufmerksamkeit einer Testperson fokussiert wird. Außerdem registrieren wir Maskierungseffekte – also das gegenseitige Verdecken benach-

In Situationen wie dem Straßenverkehr lösen neue wichtige Reize laufend automatische Augen- und Kopfbewegungen aus

barter Reize – sowie die Fähigkeit zur geteilten Aufmerksamkeit, mit der sich etwa gleichzeitig visuelle und auditive Informationen entdecken lassen. Eine neu entwickelte Software ermöglicht in diesen Tests die hierfür notwendige Kontrolle von Fixation und Augenbewegungen.

Allein im Bereich des Sehens finden sich also ganz unterschiedliche Formen von Aufmerksamkeitseinbußen:

► Das Aufmerksamkeitsfeld ist zu schwach ausgeprägt oder zu klein. Damit einher geht eine geringe Aktivierung in dem Großhirnrindenareal, das Reize in diesen Bereich verarbeitet.

► Das Aufmerksamkeitsfeld ist dauerhaft zu weit gestellt, weshalb unwichtige Informationen nicht »herausgefiltert« werden. Manchmal lenken auch irrelevante Reize die Augen von relevanten ab, weil sich der von ersteren ausgehende Impuls nicht unterdrücken lässt.

► Suchbewegungen mit Augen und Kopf laufen zu unsystematisch ab, wodurch es zu lange dauert, bis der Betroffene die wichtigen Reize findet und ihr Abbild zum Ort schärfsten Sehens gelangt.

► Die Fixationszeit ist zu kurz, um das Objekt richtig zu erkennen.

Verkehrsunfälle wie der eingangs beschriebene beruhen meist spezifisch auf der Verminderung einer oder mehrerer dieser Teilleistungen – und nicht etwa auf einer allgemein reduzierten Aufmerksamkeit.

Viele Alltagsaktivitäten, auch das Autofahren, erfordern zudem, die Aufmerksamkeit gleichzeitig auf mehrere Ereig-

nisse zu richten. Wie schwierig das ist, zeigt sich bereits daran, dass es kaum möglich ist, zwei Sprechern gleichzeitig zu lauschen. Wollen Sie etwa Ihrem Gesprächspartner am Telefon zuhören und gleichzeitig den Nachrichten im Radio folgen, werden Sie feststellen, dass Ihnen das nicht gelingt. Sie verstehen nur jeweils den Sprecher, auf den Sie gerade achten.

Besonders gefordert ist die Aufmerksamkeit beim Erlernen eines Musikinstruments: Man muss gleichzeitig die Noten lesen, die Finger bewegen und dabei auch noch den Rhythmus und den musikalischen Ausdruck berücksichtigen.

All das ist deshalb so schwierig, weil es sich bei Aufmerksamkeit um ein be-

grenztes Gut handelt. Beansprucht eine Tätigkeit viel davon, kann man einer anderen entsprechend weniger widmen.

Das Gehirn meistert diese Aufgabe, indem es bestimmte Abläufe beim Lernen automatisiert. So muss ein Fahranfänger seine Aufmerksamkeit noch gleichzeitig auf das Verkehrsgeschehen und die komplizierten motorischen Tätigkeiten beim Steuern richten. Im Lauf der Zeit werden Letztere automatisiert, so dass mehr Aufmerksamkeit zum Beobachten des Verkehrsgeschehens zur Verfügung steht.

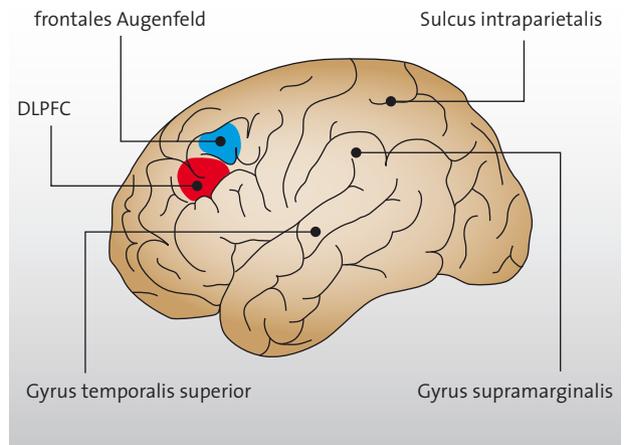
Dieser Aspekt spielt auch bei den bereits erwähnten Lesestörungen, die oft pauschal als »Legasthenie« bezeichnet werden, eine Rolle. Verschiedene Hirnleistungen, die das Lesen erst ermöglichen und normalerweise automatisiert sind, erfordern so viel Aufmerksamkeit, dass für den Inhalt des Ge-

Aufmerksamkeit ist ein **begrenzt**es Gut. Beansprucht eine Tätigkeit viel davon, kann man einer anderen nur entsprechend weniger widmen



Anatomie der Aufmerksamkeit

Welche Hirnstrukturen einzelne Aufmerksamkeitsleistungen vermitteln und welche neuronalen Störungen welche Beeinträchtigungen hervorbringen, ist bis heute nicht befriedigend geklärt. Das Richten der Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Raumausschnitt dürfte unter anderem vom so genannten dorsolateralen präfrontalen Kortex (Abkürzung DLPFC) hinter der Stirn abhängen sowie von der Großhirnrinde im Bereich des Sulcus intraparietalis. Das frontale Augenfeld, ebenfalls ein Teil des präfrontalen Kortex, scheint die Aufmerksamkeitssteuerung im visuellen System über den Sulcus intraparietalis zu kontrollieren. Entdeckt eine Versuchsperson einen gesuchten visuellen Reiz und zieht dieser die Aufmerksamkeit auf sich, so scheint die Aufmerksamkeitsfokussierung über Hirnregionen im Bereich des Gyrus supramarginalis und des Gyrus temporalis superior gesteuert zu werden. Bei der Suche selbst sind diese Areale dagegen nicht aktiv. Auch bei ADHS funktionieren wohl Teile des präfrontalen Kortex, die Dopamin und Noradrenalin als Überträgersubstanzen verwenden, nicht richtig.



Für die Aufmerksamkeitssteuerung relevante Bereiche des menschlichen Gehirns. DLPFC: dorsolateraler präfrontaler Kortex

lesen zu wenig übrig bleibt. Dies wirkt sich besonders bei so genannten eingekleideten (sprachlich formulierten) Mathematikaufgaben aus, so dass oft die falsche Diagnose »Rechenstörung« gestellt wird.

Vor allem nach Schädigungen in der rechten Hirnhemisphäre zeigt sich manchmal ein kurioses Phänomen: Die Betroffenen richten von sich aus ihre Aufmerksamkeit überhaupt nicht mehr auf einen bestimmten Bereich des Raums oder auch ihres eigenen Körpers, etwa auf einen Arm. Dies darf man nicht mit einem so genannten Neglect verwechseln, bei dem das Bewusstsein für die Existenz der betreffenden Raum- beziehungsweise Körperhälfte fehlt.

Der vergessene linke Arm

So »vergaß« eine Patientin von mir, die an einem Tumor der rechten Hirnhemisphäre litt, geradezu die Existenz ihres linken Arms! Schrieb sie mit rechts auf ein Blatt Papier und rutschte dieses weg, kam sie nicht auf die Idee, es mit der linken Hand festzuhalten. Doch das Bewusstsein für die Existenz des linken Armes war dabei nicht verloren. Sobald ich ihre Aufmerksamkeit auf diesen lenkte, verwendete sie ihn. Ein Zwölfjähriger ohne erkennbare Hirnschädigung wiederum lenkte sein Fahrrad nur mit dem rechten Arm und ließ den linken, voll funktionsfähigen herunterhängen. Beide Patienten mussten üben, ihre Aufmerksamkeit in einem bestimmten zeitlichen Rhythmus bewusst auf den linken Arm zu richten, bis sie gelernt hatten, ihn wieder automatisch einzusetzen.

Die aktuelle Forschung zeigt: Ärzte und Therapeuten sollten nicht pauschal von einer »Aufmerksamkeitsstörung« sprechen, und entsprechend gibt es auch keine allgemein

gültige »Aufmerksamkeitstherapie«. Stattdessen gilt es, Patienten auf die verschiedenen Einzelleistungen hin zu untersuchen und die Behandlung an der jeweiligen speziellen Störung auszurichten. ~

DER AUTOR



Reinhard Werth ist Neuropsychologe und Professor für Medizinische Psychologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

QUELLEN

- Chen, Y. et al.:** Task Difficulty Modulates the Activity of Specific Neuronal Populations in Primary Visual Cortex. In: Nature Neuroscience 11, S. 974–982, 2008
- Steinhausen, H. C. et al. (Hg.):** Handbuch ADHS. Grundlagen, Klinik, Therapie und Verlauf der Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung. W. Kohlhammer, Stuttgart 2010
- Werth, R.:** Die Wurzeln der Legasthenie. In: Gehirn&Geist 7-8/2008, S. 64–70

LITERATURTIPP

Werth, R.: Die Natur des Bewusstseins – wie Wahrnehmung und freier Wille im Gehirn entstehen. C.H.Beck, München 2010
Anhand klinischer Fälle aus seiner Praxis versucht der Autor, das Konzept »Bewusstsein« wissenschaftlich präzise zu beschreiben.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135749

Beutelteufel sind beeindruckende Tiere. Doch gegen den ansteckenden Krebs, der sie massenhaft dahinrafft, haben sie möglicherweise keine Chance.



ONKOLOGIE

Teuflische Krankheit

Eine ansteckende Krebserkrankung droht den Tasmanischen Teufel auszurotten. Zoologen versuchen, der rätselhaften Seuche Herr zu werden. Können ähnliche Tumoren auch beim Menschen entstehen?

Von Menna E. Jones und Hamish McCallum

Der Freycinet-Nationalpark an der Ostküste der australischen Insel Tasmanien ist ein Juwel der Natur. Hier blühen Akaziensträucher, rauscht das Meer in azurblauen Buchten, laden rosa Granithügel zum Wandern ein und lockt der Sandstrand der Wineglass Bay. Ich (Jones) sitze auf der Erde und halte ein junges Beutelteufel-Weibchen fest, das ich eingefangen habe. Das Tier trägt Liebesbisse am Hals, hat sich also kürzlich gepaart. Doch die kleinen Verletzungen künden nicht nur von der Zeugung neuen Lebens, sie sind auch ein böses Vorzeichen: Vielleicht ist das Weibchen schon tot, bevor es ihren ersten Wurf Jungtiere großziehen kann.

Hier, im Freycinet-Nationalpark, lernte ich 2001 erstmals die heimtückische Krankheit kennen: Im Gesicht der Tasmanischen Teufel entstehen große, eiternde Tumoren, welche die Tiere am Fressen hindern und meist innerhalb von sechs Monaten nach der Ansteckung zum Tod führen. Heute ist der Bestand an Beutelteufeln im Freycinet-Park nahezu verschwunden – ein Abbild dessen, was sich fast überall im Verbreitungsgebiet der Spezies abspielt. Die Krebserkrankung, von der man heute weiß, dass sie ansteckend ist, wurde 1996 im Nordosten Tasmaniens entdeckt und hat seither die Bestände auf der ganzen Insel um bis zu 95 Prozent dezimiert. Damit steht die Spezies, die nur hier heimisch ist, kurz vor dem Aussterben.

Die meisten Krebserkrankungen sind glücklicherweise nicht übertragbar: Wir können im Bus neben einem Krebspatienten sitzen und müssen nicht befürchten, selbst einen Tumor zu bekommen. Zwar gibt es ansteckende Viren oder Bakterien, die bösartige Veränderungen in menschlichen Zellen hervorrufen, etwa die humanen Papillomviren, die Gebärmutterhalskrebs verursachen. Doch sie verbreiten die Krankheit nicht unmittelbar von Mensch zu Mensch, sondern lassen die Zellen der infizierten Person nur mit größerer Wahrscheinlichkeit entarten. Beim Beutelteufel dagegen sind die Tumorzellen selbst die übertragbaren Erreger.

Das rasche Aussterben des Tasmanischen Teufels wirft viele Fragen auf und gibt Anlass zu intensiven Forschungen. Wie wurde der Krebs ansteckend, und was kann man tun, um seine Verbreitung aufzuhalten? Und könnten ähnliche Tu-

moren sich auch unter Menschen verbreiten? Offenbar lautet die Antwort: Vorerst haben wir gute Chancen, dass uns das Schicksal der Beutelteufel erspart bleibt, aber eines Tages könnte sich das ändern (siehe Kasten auf S. 44).

Neben der Krankheit des Tasmanischen Teufels kennt man in freier Wildbahn nur noch eine weitere ansteckende Krebsform: das Sticker-Sarkom, einen Tumor der äußeren Geschlechtsorgane von Hunden. Diese Krankheit, die es vermutlich seit einigen tausend Jahren gibt, überträgt sich während des Geschlechtsverkehrs von Tier zu Tier. Beim Menschen werden Tumoren gelegentlich von der Mutter an den Fetus weitergegeben oder zusammen mit Organen transplantiert; in der Regel jedoch beginnt und endet eine Krebserkrankung in einem einzigen Organismus. Krebszellen können im Körper zwar erhebliche Schäden anrichten, sie stoßen aber auch auf zahlreiche Barrieren, die normalerweise verhindern, dass sie von einem Individuum auf ein anderes übergehen. Bei den Tasmanischen Teufeln verbreitet sich der ansteckende Tumor auf Grund eines unglücklichen Zusammentreffens mehrerer Faktoren.

Typischerweise entsteht eine Krebserkrankung, indem sich einige Zellen genetisch verändern, woraufhin sie der Kontrolle des Organismus entgleiten und ein Eigenleben entwickeln. Wenn sie sich ungebremst vermehren und dabei das

AUF EINEN BLICK

DER FLUCH DER BEUTELTEUFEL

1 Ein ansteckender **Gesichtskrebs** hat die Tasmanischen Teufel in weniger als 20 Jahren an den Rand des Aussterbens getrieben.

2 Ansteckend ist der Krebs unter anderem deshalb, weil die Beutelteufel sich häufig gegenseitig beißen. Dabei gelangen Zellen des Tumors in die Wunden des gebissenen Tiers und siedeln sich dort an. Zudem sind sich die meisten Beutelteufel **genetisch sehr ähnlich**, so dass ihr **Immunsystem** die eingedrungenen Krebszellen nicht als fremd erkennt und deshalb auch nur unzureichend gegen sie vorgeht.

3 Auch beim Menschen könnten unter bestimmten Voraussetzungen **ansteckende Krebsarten** entstehen; allerdings scheint keine unmittelbare Gefahr zu drohen.

umgebende Gewebe verdrängen, bilden sie einen Tumor. Mit jeder weiteren Teilung können zusätzliche genetische Änderungen auftreten, so dass ein wachsender Tumor sich allmählich zu einer komplexen Gemeinschaft aus unterschiedlich stark entarteten Zellen entwickelt. Irgendwann kann die Zellmasse derart zunehmen, dass ihre Sauerstoff- und Nährstoffversorgung nicht mehr ausreicht. Dann setzt sie verschiedene Substanzen frei, die neue Blutgefäße zum Tumor sprossen lassen. Unter Umständen geht das damit einher, dass Tumorzellen sich von der Masse ablösen und im Organismus verteilen. Die Zellen wandern mit dem Blut oder der Lymphe, setzen sich in anderen Organen fest und bilden dort neue Tumoren (Metastasen). Doch wenn der Wirtsorganismus stirbt, gehen sowohl der Ausgangstumor als auch seine Tochtergeschwülste zu Grunde. Deshalb wäre es für bösartige Zellen von großem Vorteil, wenn sie sich auf andere Organismen ausbreiten könnten.

Dieser Weg ist jedoch voller Hürden. Zunächst einmal können Zellen nur dann von einem Organismus in einen anderen gelangen, wenn das sehr rasch geschieht. Zellen sind an das Überleben in der Außenwelt nicht angepasst. In der Regel trocknen sie schnell aus und sterben innerhalb weniger Minuten, nachdem sie den Körper verlassen haben. Damit Krebszellen übertragen werden können, muss ihr Wirt in direkten Kontakt mit lebendem Gewebe eines anderen Organismus kommen.

Dort angelangt, müssen die Tumorzellen der Immunabwehr des neuen Wirts entgehen. Diese verfügt bei höheren Tieren über zahlreiche Mechanismen, um fremde Zellen aufzuspüren und zu zerstören. Natürliche Killerzellen und zytotoxische T-Lymphozyten etwa erkennen Zellen, die anders aussehen als die des eigenen Organismus, und vernichten sie. Ermöglicht wird das dadurch, dass Zellen auf ihrer Oberfläche bestimmte Proteinstrukturen präsentieren, die für

Ansteckende Krebserkrankungen – eine Gefahr für Menschen?

Menschen weisen eine größere genetische Vielfalt auf als Tasmanische Teufel; zudem praktizieren sie im Allgemeinen kein Verhalten, das eine direkte Übertragung von Tumorzellen so erleichtert, wie es bei den Tieren der Fall ist. Angesichts dessen ist es unwahrscheinlich, dass unsere Spezies ein ähnliches Schicksal wie die Beutelteufel erleidet. Selbst wenn ein Mensch von einem infizierten Beutelteufel oder einem Hund mit Sticker-Sarkom gebissen würde, wäre durch die genetischen, molekularen und zellulären Unterschiede zwischen den Spezies gewährleistet, dass eine starke Immunabwehr die eingedrungenen Zellen erkennt und abtötet. Der gebissene Mensch würde weder erkranken noch die Krankheit an andere weitergeben.

Dennoch gibt es Anlass zur Sorge. Theoretisch könnten ansteckende Krebserkrankungen in einer Gruppe von Menschenaffen (etwa Schimpansen, Gorillas oder Orang-Utans) entstehen, die wegen des Rückgangs ihrer Bestände nur wenig genetische Variabilität aufweisen. Würden diese Tiere von Menschen mit einem geschwächten Immunsystem gejagt, könnten die Tumorzellen durch engen Körperkontakt auf humane Wirte übergehen und sich dann in der Bevölkerung verbreiten. Diese Voraussetzungen sind gegeben, wenn Menschengruppen mit hoher HIV-Infektionsrate gefährdete Affenarten jagen, etwa in Afrika.

Allerdings dürfte die Übertragung über Artgrenzen hinweg nicht der wahrscheinlichste Weg sein, auf dem eine ansteckende Krebsform des Menschen entstehen könnte. Denn bislang kennen wir keinen einzigen Fall aus der Natur, bei dem sich artfremde Tiere mit dem übertragbaren Hundetumor angesteckt hätten – obwohl es im Labor gelungen ist, die Krankheit auf näher und weitläufiger verwandte Hundartige zu übertragen. Beunruhigender ist das starke Anwachsen der menschlichen Bevölkerung. Millionen Menschen sind heute mit HIV infiziert:

Ihr Immunsystem ist geschwächt, wodurch sie häufig an Krebsarten erkranken, die früher selten waren. Diese Situation begünstigt die Evolution ansteckender Tumoren. Die Möglichkeit, dass eine Krebserkrankung zunächst bei immungeschwächten Menschen auftritt und später auch die gesunde Bevölkerung infiziert, ist nicht von der Hand zu weisen. Bei Hunden ist genau das geschehen: Das Sticker-Sarkom, das ursprünglich wohl in einer genetisch sehr einheitlichen Population mit starker Inzucht entstand, kann heute auch Hunde- und Wolfsbestände anstecken, die sich durch große genetische Variabilität auszeichnen. Dass die Krankheit meist nicht tödlich verläuft, ist dabei keine große Beruhigung. Denn wahrscheinlich machte sie zunächst eine Phase durch, in der sie viele ihrer Wirtsorganismen tötete, so wie wir es heute von HIV kennen. Erst später vermehrten sich Hunde- und Wolfspopulationen, die den Krebs unter Kontrolle halten konnten, und irgendwann stellten sie die Mehrzahl.

Die Krebserkrankung der Beutelteufel bietet für Biologen eine einzigartige Gelegenheit, mehr über ansteckende Krebsarten zu erfahren. Außerdem gemahnt sie uns Menschen daran, was wir potenziell anrichten können, ohne es beabsichtigt zu haben. Wir setzen Krebs erzeugende Wirkstoffe in üppigen Mengen in die Umwelt frei, gleichzeitig zerstören wir auf der ganzen Welt die natürlichen Lebensräume, was sowohl einen Verlust von Arten als auch von genetischer Vielfalt nach sich zieht. Infolge der Globalisierung und des Eindringens in bislang unberührte Lebensräume kommen Menschen und Wildtiere mit Krankheitserregern in Kontakt, denen sie nie zuvor begegnet sind. Wir können deshalb damit rechnen, dass künftig immer häufiger neue Krebsarten auftauchen werden, darunter solche, die ansteckend sind. Dass sie eines Tages auch uns infizieren könnten, möglicherweise indem sie Artgrenzen überschreiten, lässt sich nicht ausschließen.

ihren Herkunftsorganismus charakteristisch sind. Es ist, als würden die Eindringlinge eine Fahne mit der Aufschrift »Ich bin ein Fremder« tragen, und wenn die Immunabwehr eine solche Fahne entdeckt, schlägt sie zu. Kodiert werden die Fahnen unter anderem von den sehr variablen Genen des so genannten Haupt-Histokompatibilitätskomplexes (*Major Histocompatibility Complex*, abgekürzt MHC). Nach Ansicht mancher Biologen sind diese Erbgutabschnitte im Lauf der Evolution vor allem deshalb so vielgestaltig geworden, um eine Übertragung von Krebszellen zu erschweren.

Leichtes Spiel für den Tumor

Das Handikap der Tasmanischen Teufel: Ihnen fehlen solche Übertragungshindernisse. Der Krebs, der sie dahinrafft – offiziell heißt er Beutelteufel-Gesichtstumor-erkrankung (*Devil Facial Tumour Disease*, abgekürzt DFTD) – entsteht meist im Mund oder in seiner Nähe. Die Tiere beißen sich sowohl bei der Paarung als auch bei Kämpfen häufig, vielfach ins Gesicht. So können bösartige Zellen schnell auf ein anderes Individuum übergehen, entweder durch den Biss selbst, wenn die Zellen zuvor von der benachbarten Geschwulst auf die Zähne gelangt sind, oder indem der Gesichtstumor die Wunde des Partners streift. Auch das Sticker-Sarkom der Hunde verbreitet sich durch unmittelbaren Körperkontakt, in diesem Fall allerdings beim Reiben der Geschlechtsorgane während der Kopulation oder durch Lecken an den betroffenen Stellen. Sowohl bei Hunden als auch beim Beutelteufel wird der Tumor mit zunehmendem Alter und wachsender Größe immer brüchiger, so dass seine Zellen sich leichter ablösen, was ihre Übertragung begünstigt.

Hinzu kommt, dass die genetischen Unterschiede zwischen den Beutelteufeln gering sind, insbesondere bei den MHC-Genen. Wahrscheinlich ist die Population früher schon einmal stark dezimiert worden, wobei nur eine kleine Gruppe mit sehr ähnlicher genetischer Ausstattung überlebte. Daher ist ihr Immunsystem nur eingeschränkt in der Lage, die Zellen eines anderen Individuums als fremd zu erkennen – mit der Folge, dass es sie nur schwach oder überhaupt nicht bekämpft. Auch der Hundetumor hat sich nach derzeitigem Wissensstand in einer kleinen Population mit geringer genetischer Variabilität und hoher Inzucht herausgebildet, möglicherweise in einer isolierten Gruppe von Wölfen oder in einem kleinen Tierbestand zur Zeit der Domestikation.

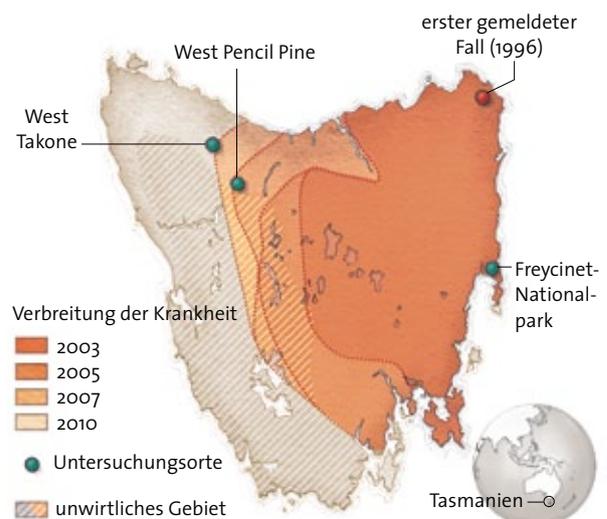
Die Bedingungen, die bei Beutelteufeln und Hunden zur Übertragung von Krebszellen führen, sind wohl auch beim Menschen dafür verantwortlich, dass Tumoren manchmal von einer Mutter auf den Fetus oder von einem Organspender auf den Empfänger übergehen. In beiden Fällen wandern die Tumorzellen schnell von einem Wirt zum anderen, und das Immunsystem eines Fetus ist noch nicht ausgereift, während Transplantatempfänger Medikamente nehmen müssen, die das Immunsystem unterdrücken, um die Abstoßung des verpflanzten Organs zu verhindern.

Erbgutanalysen zufolge stammen die Tumoren der Tasmanischen Teufel von Krebszellen ab, die ursprünglich in ei-

Eine sich schnell ausbreitende Seuche

Seit der Gesichtstumor der Beutelteufel

(Foto) 1996 im Nordosten Tasmaniens erstmals entdeckt wurde, hat er sich rasch ausgebreitet (Landkarte) und manche Bestände, etwa die im Freycinet-Nationalpark, um bis zu 95 Prozent dezimiert. Zuvor ging es den Tieren fast überall auf der Insel gut; eine Ausnahme machte nur der Südwesten mit seinem recht unwirtlichen Gelände (in der Karte schraffiert). Die Beutelteufel ganz im Nordwesten der Insel unterscheiden sich genetisch von ihren Artgenossen und sind deshalb für die Krankheit weniger anfällig. Die Autoren und ihre Mitarbeiter forschen in dieser Region, um herauszufinden, wie sich die Zahl der Beutelteufel wieder steigern lässt.



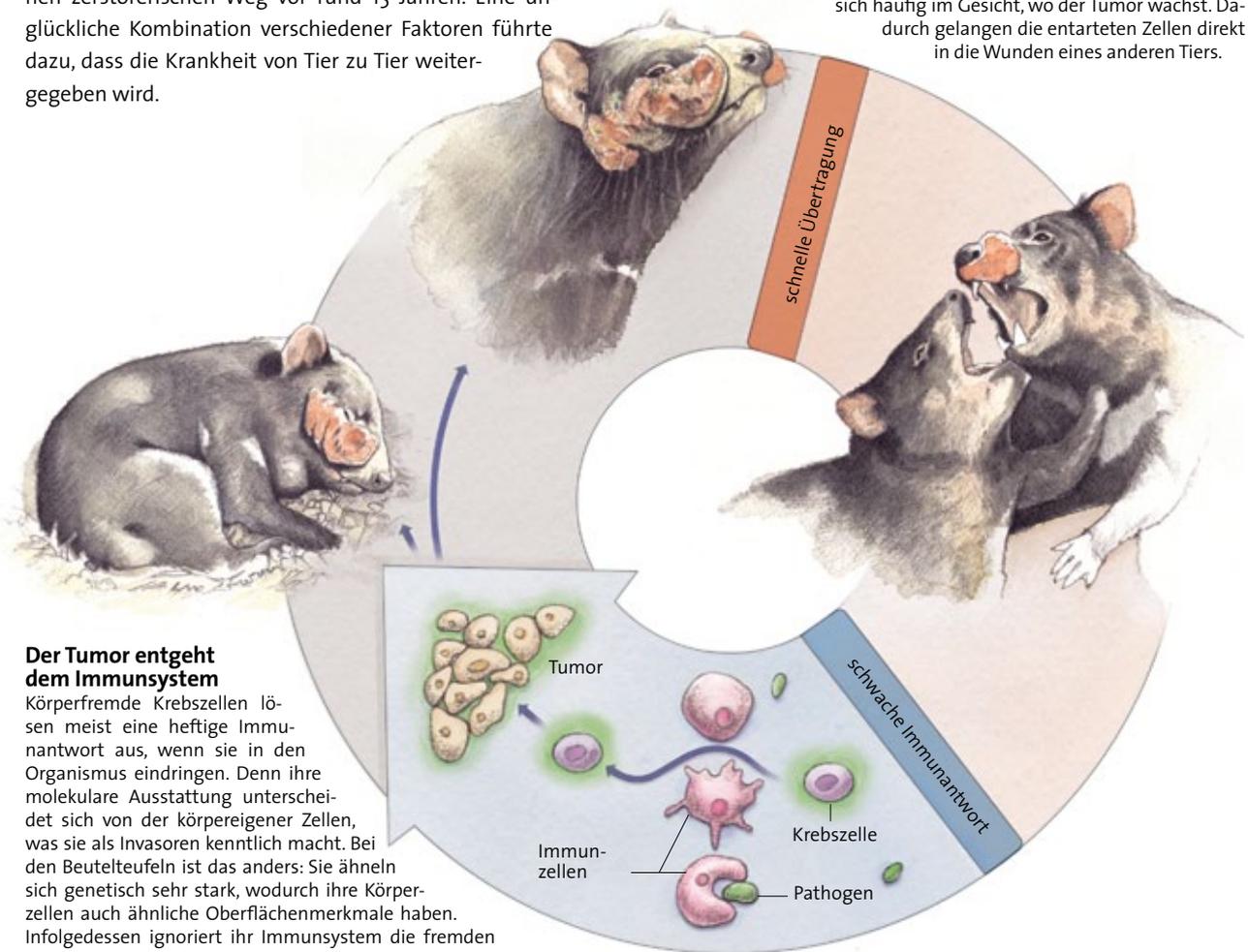
nem einzigen Tier entstanden sind. Allen Tumoren gemein ist nämlich der Verlust bestimmter Chromosomen und Chromosomenabschnitte, die in den gesunden Körperzellen der betroffenen Individuen vorhanden sind. Da das Tier, von dem der Tumor stammt, längst nicht mehr lebt, werden wir nie genau erfahren, was die ursprünglichen Mutationen verursacht hat und wie der Krebs übertragbar wurde. Er könnte durch genetische Veränderungen entstanden sein, die sich im Gesicht nach wiederholten Verletzungen und Entzündungen vollzogen, ein Phänomen, das als entzündungsassoziierte Karzinogenese bezeichnet wird. Elizabeth Murchinson vom englischen King's College (Cambridge) berichtete 2010 in der Fachzeitschrift »Science«, der Tumor der Beutelteufel stamme von den Schwann-Zellen ab, die im peripheren Nervensystem die Fortsätze von Neuronen umhüllen.

Wie Krebs ansteckend wird

Der Tumor, der sich heute unter den Beutelteufeln verbreitet, stammt von einem einzigen Tier und begann seinen zerstörerischen Weg vor rund 15 Jahren. Eine unglückliche Kombination verschiedener Faktoren führte dazu, dass die Krankheit von Tier zu Tier weitergegeben wird.

Die Krebszellen wechseln leicht auf andere Individuen über

An der Luft sterben Krebszellen schnell ab. Die Ansteckung kann deshalb nur durch rasches Übertragen von Körper zu Körper erfolgen. Bei den Beutelteufeln ist das gegeben: Die Tiere beißen sich häufig im Gesicht, wo der Tumor wächst. Dadurch gelangen die entarteten Zellen direkt in die Wunden eines anderen Tiers.



Der Tumor entgeht dem Immunsystem

Körperfremde Krebszellen lösen meist eine heftige Immunantwort aus, wenn sie in den Organismus eindringen. Denn ihre molekulare Ausstattung unterscheidet sich von der körpereigenen Zellen, was sie als Invasoren kenntlich macht. Bei den Beutelteufeln ist das anders: Sie ähneln sich genetisch sehr stark, wodurch ihre Körperzellen auch ähnliche Oberflächenmerkmale haben. Infolgedessen ignoriert ihr Immunsystem die fremden Tumorzellen, obwohl es eigentlich in der Lage ist, eindringende Pathogene zu bekämpfen. Am Ende erliegt das Tier der Krankheit, aber zuvor hat es den Krebs an Artgenossen weitergegeben.

Sowohl bei den Gesichtstumoren der Beutelteufel als auch beim Sticker-Sarkom der Hunde mussten also zwei Faktoren zusammenkommen, damit der Krebs ansteckend wurde: enger Körperkontakt, der eine Übertragung lebender Zellen ermöglicht, und geringe genetische Vielfalt. Vermutlich tritt diese Kombination in der Natur recht häufig auf. Sämtliche Vögel und Säugetiere kämpfen und kopulieren, und in vielen Populationen herrscht starke Inzucht. Es ist somit vorstellbar, dass übertragbare Tumoren relativ oft entstehen, aber meist nicht lange erhalten bleiben – etwa, weil die infizierten Populationen und damit auch die Krebszellen schnell aussterben.

Beim Sticker-Sarkom gelingt es den Tumoren zunächst, sich vor dem Immunsystem der Hunde zu »verstecken«. Später erkennt die Körperabwehr die bösartigen Zellen zwar

und zerstört sie, so dass die Tiere von nun an gegen weitere Infektionen geschützt sind, doch bis dahin können die Tumoren beim Kopulieren auf andere Individuen übergehen. Der infektiöse Krebs überlebt also dadurch, dass er seinen Wirt am Leben lässt. Möglicherweise sind noch andere ansteckende Krebserkrankungen im Umlauf, die auf diese Weise überdauern. Klarheit können hier im Einzelfall nur genetische Untersuchungen schaffen, wie man sie mit den Tumoren von Hunden und Tasmanischen Teufeln angestellt hat.

Wie wird es mit den Beutelteufeln weitergehen? Meist machen Wirte und Krankheitserreger in der Natur eine gemeinsame Evolution durch – beim Wirt entwickeln sich Anpassungen, durch die der Erreger besser unter Kontrolle gehalten wird, und Letzterer bildet wiederum Gegenmechanismen aus. Am Ende existieren beide nebeneinander. Gibt

es beim ansteckenden Krebs der Tasmanischen Teufel vielleicht auch Hinweise auf einen solchen Evolutionstanz, und erwächst daraus ein Hoffnungsschimmer für die Tiere? Tatsächlich, in den Jahren seit dem Auftauchen der Krebserkrankung hat sich bei den Wirtstieren bereits eine Reaktion eingestellt: Die Beutelteufel werden schon als »Teenager« sexuell aktiv. Früher begannen die Weibchen im Alter von ungefähr zwei Jahren mit der Fortpflanzung und zogen während ihrer fünf bis sechs Lebensjahre drei Würfe groß. Heute ziehen oft schon einjährige Weibchen ihren ersten Wurf auf, vorausgesetzt, sie wachsen in den Monaten nach der Entwöhnung schnell genug heran und sie bekommen ihre Jungen, bevor der Winter hereinbricht. Diese frühzeitige Fortpflanzung verschafft ihnen die Gelegenheit, wenigstens einmal und vielleicht sogar zweimal Junge zu werfen, bevor sie dem Krebs zum Opfer fallen. Über ausreichend lange Zeiträume hinweg kann dieses Verhalten dazu beitragen, die Spezies zu stabilisieren.

Haben die Beutelteufel doch noch eine Chance?

Zusammen mit unserem Doktoranden Rodrigo Hamede untersuchen wir Tiere im abgelegenen Nordwesten Tasmaniens. Sie unterscheiden sich in vielen genetischen Merkmalen von den weiter östlich nachzuweisenden Formen und haben offenbar auch eine höhere Widerstandskraft gegen den ansteckenden Krebs. Der Tumor tritt in der Region seltener auf, und die infizierten Beutelteufel überleben dort trotz ihrer Erkrankung viel länger als im Osten Tasmaniens. Mehrmals im Jahr begeben wir uns in den nordwestlichen Teil der Insel, um die Entwicklung der Seuche zu beobachten und Gewebe- und Blutproben zu sammeln. Diese analysieren wir zusammen mit Katherine Belov von der University of Sydney und Greg Woods vom Menzies Research Institute Tasmania. Belov beschäftigt sich mit den Genen und Woods mit den Immunantworten; gemeinsam wollen sie herausfinden, ob bestimmte Kombinationen genetischer Varianten das Immunsystem der Tiere in die Lage versetzen, den Krebs besonders gut zu bekämpfen. Wenn wir solche widerstandsfähigen Genotypen finden, können wir vielleicht dazu beitragen, dass die »guten« Gene sich in den Wildbeständen verbreiten, etwa durch Auswildern von resistenten Tieren in anderen Teilen Tasmaniens. Auf diese Weise ließe sich womöglich die Erholung der Spezies beschleunigen.

Auch am Tumor selbst sind evolutionsbedingte Veränderungen zu erkennen. Nach Befunden von Anne-Maree Pearse vom Save the Tasmanian Devil Program (einer Initiative zur Erhaltung des Beutelteufels, die von den Regierungen Australiens und Tasmaniens finanziert wird) sind eine Reihe neuer Stämme entstanden. Das ist möglicherweise eine gute, vielleicht aber auch eine schlechte Nachricht. Einige Stämme könnten sich so entwickeln, dass sie weniger bösartig sind; andere wiederum könnten Resistenzen überwinden, die sich bei den Beutelteufeln entwickeln.

Einen gewissen Anlass zum Optimismus gibt die Vergangenheit des Sticker-Sarkoms. Wahrscheinlich war es anfangs

sehr virulent, so wie heute die Beutelteufel-Krankheit, ließ aber während der gemeinsamen Evolution mit den Wirtstieren in seiner Gefährlichkeit nach. Das machte den Tumor insgesamt erfolgreicher, denn wegen der verminderten Virulenz konnten die Wirtstiere länger mit der Krankheit leben und sie auf mehr Artgenossen übertragen. Dieser Mechanismus macht plausibel, warum der Hundetumor zu dem wurde, was er heute ist: eine Krankheit, die in der Regel nicht tödlich verläuft.

Wir hoffen, dass die Tasmanischen Teufel, ausreichend guten Willen und Finanzmittel vorausgesetzt, vor dem Aussterben bewahrt werden können, damit sie ihre Rolle als Raubtiere an der Spitze der Nahrungskette in weiten Teilen ihres Verbreitungsgebiets weiter erfüllen. Ohne Beutelteufel würden sich die Ökosysteme dieser Regionen voraussichtlich dramatisch verändern. Beispielsweise könnten sich Räuber wie eingeschleppte Katzen und Füchse stärker vermehren, was wiederum mehrere andere Arten bedrohen würde. Ähnliche Vorgänge ließen früher schon mehrere kleine Beuteltierarten vom australischen Festland verschwinden; Tasmanien ist heute ihre letzte Zuflucht. ~

DIE AUTOREN



Menna E. Jones arbeitet als Future Fellow des Australian Research Council an der University of Tasmania. Mit ihren Forschungen über die Tasmanischen Teufel und deren ansteckenden Gesichtstumor unterstützt sie Naturschutzprogramme, die zum Ziel haben, den Bestand des Beutelteufels zu erhalten. **Hamish McCallum** erforscht seit vielen Jahren die Ökologie von Wildtieren. Er leitet die School of Environment an der Griffith University im australischen Bundesstaat Queensland. Zuvor war er als leitender Wissenschaftler an Maßnahmen zur Rettung des Beutelteufels beteiligt.

QUELLEN

- Jones, M. E. et al:** Conservation Management of Tasmanian Devils in the Context of an Emerging, Extinction-Threatening Disease: Devil Facial Tumor Disease. In: *EcoHealth* 4, S. 326–337, 2007
- Jones, M. E. et al:** Life-History Change in Disease-Ravaged Tasmanian Devil Populations. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105, S. 10023–10027, 2008
- Lachish, S. et al:** Evidence That Disease-Induced Population Decline Changes Genetic Structure and Alters Dispersal Patterns in the Tasmanian Devil. In: *Heredity* 106, S. 172–182, 2011
- McCallum, H. et al:** Transmission Dynamics of Tasmanian Devil Facial Tumor Disease May Lead to Induced Extinction. In: *Ecology* 90, S. 3379–3392, 2009
- McCallum, H., Jones, M. E.:** To Lose Both Would Look Like Carelessness: Tasmanian Devil Facial Tumour Disease. In: *PLoS Biology* 4, S. 1671–1674, 2006

WEBLINKS

- www.scientificamerican.com/jun2011/cancer
Eine Fotostrecke und Videos von Tasmanischen Teufeln
- www.tassiedevil.com.au/tasdevil.nsf
Informationen zum ansteckenden Gesichtstumor der Beutelteufel

Der Licht-Turbo – mehr Tempo für Datennetze

Licht breitet sich mit rund 300 000 Kilometer pro Sekunde aus – aber nur im Vakuum. Forscher können dieses Tempo mittlerweile fast beliebig reduzieren und in speziellen Materialien sogar Lichtpulse speichern. Doch ihre Fantasie reicht noch weiter: Neue optische Technologien könnten den weltweiten Datenverkehr deutlich beschleunigen.

Von Luc Thévenaz und Thomas Schneider

»» **E**s hat den Anschein, dass es sogar dem Licht schwerfällt, (das langsame Glas) zu durchdringen – so schwer, dass die Reise von eineinhalb Zentimetern durch dieses Material ungefähr eine Sekunde in Anspruch nimmt ... Sie haben die Welt gesehen, wie sie eine Sekunde vorher, in der Vergangenheit, existierte!«

Was in Bob Shaws Roman »Augen der Vergangenheit« von 1972 noch reine Sciencefiction war, haben Forscher 30 Jahre später in die Realität umgesetzt. Die Verlangsamung von Licht ist einer der erstaunlichsten Fortschritte der Optik.

AUF EINEN BLICK

LOB DER LANGSAMKEIT

1 1999 gelang es Forschern erstmals, **Licht abzubremsen** – auf eine Geschwindigkeit von gerade einmal 17 Meter pro Sekunde. Damit ist es im Prinzip möglich geworden, Lichtpulse zu speichern. Dies wird in Kommunikationsnetzen dringend benötigt.

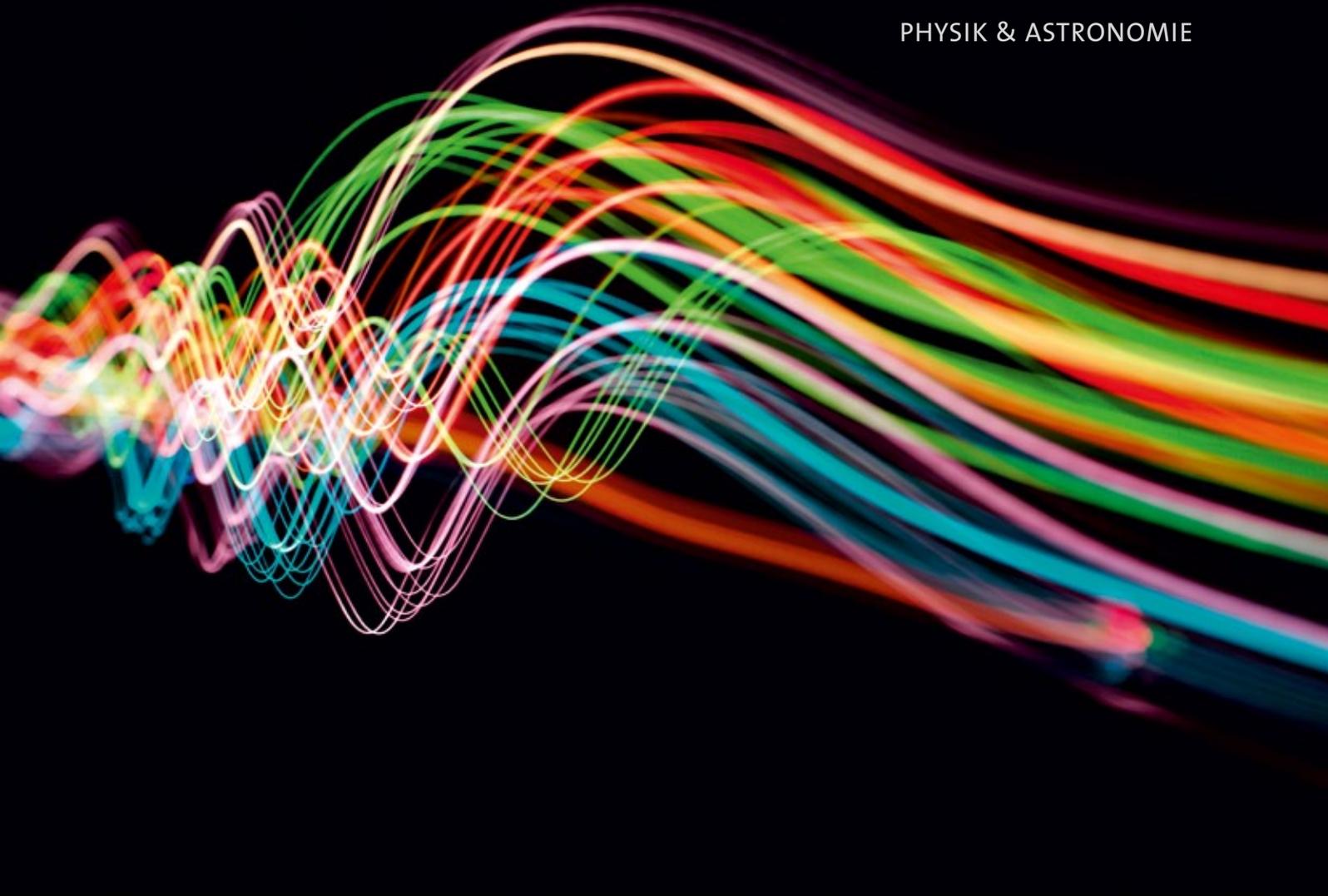
2 2004 schaffte es einer der Autoren dieses Beitrags erstmals, Licht auch in **Glasfaserkabeln** zu verzögern, dem Rückgrat der modernen Kommunikationsnetzwerke. Allerdings zeigte sich bald, dass der Anwendungsbereich der neuen Technik begrenzt ist.

3 Mittlerweile haben die Arbeiten über »langsameres Licht« aber weitere unerwartete Fortschritte initiiert. Schon in naher Zukunft könnte die **Speicherung von Lichtsignalen** möglicherweise tatsächlich zu höheren **Datenübertragungsraten** führen.

Dank neuer Verfahren, die sich von dieser völlig unerwartet verfügbar gewordenen Technik inspirieren ließen, können wir schon in naher Zukunft die Kommunikationsnetze erheblich optimieren und neuartige photonische, also auf Lichtsignalen basierende Bauelemente mit geringem Energieverbrauch herstellen.

Die Grundidee mag zwar paradox erscheinen. Schließlich haben wir mühsam gelernt, in einer einzelnen optischen Faser tausende Gigabit pro Sekunde an Daten zu übertragen – und nun wollen wir das Licht verlangsamen, das diese Daten transportiert? Tatsächlich heißt das: Wir haben nun auch die Kontrolle über eine zuvor unzugängliche Variable der Lichtwelle erlangt, nämlich die Zeit. Dies ist für zahlreiche Anwendungen von größter Bedeutung. Denn indem wir ein Lichtsignal verlangsamen, können wir die darin enthaltene Information auch speichern – im Prinzip beliebig lange.

Alles begann mit einem Artikel, den ein Team der Harvard University um die Dänin Lene Hau 1999 in der Fachzeitschrift »Nature« veröffentlichte und der eine wahre Schockwelle in der Gemeinde der Physiker auslöste. Die Forscher hatten ein Gas auf eine Temperatur von einigen milliardstel Kelvin herabgekühlt und einen hindurchlaufenden optischen Puls mittels elektromagnetisch induzierter Transparenz (EIT, siehe Kasten S. 50) auf eine Geschwindigkeit von 17 Meter pro Sekunde abgebremst. Das sind gerade ein-



1999 gelang es einem Team um die Dänin Lene Hau von der Harvard University erstmals, die Gruppengeschwindigkeit von Licht zu verlangsamen. Damals horchte auch die breite Öffentlichkeit auf: Licht schien gewissermaßen greifbar zu werden. Dies blieb zwar eine Illusion. Dennoch bahnte die Forschungsarbeit den Weg zu neuartigen optischen Netzwerken.

mal 61 Kilometer pro Stunde, das Tempo eines Radrennfahrers.

Den Forschern war es damit gelungen, die Ankunftszeit eines optischen Pulses kontrolliert zu verzögern, ihn gewissermaßen für eine kurze Zeit zu speichern. Zwar lässt sich die Ankunftszeit von Licht auch auf andere Weise variieren: Man sendet den Puls früher oder später aus, schickt ihn wahlweise durch längere oder kürzere optische Fasern oder lässt ihn auf einen Spiegel fallen, den man auf einem Schlitten verschieben kann, so dass sich der Lichtweg verkürzt oder verlängert. Für Telekommunikationssysteme kommen all diese Verfahren jedoch nicht in Frage. Indem Forscher nun aber erstmals die Geschwindigkeit des Lichts selbst manipulierten, eröffneten sich ihnen völlig neue Möglichkeiten.

Selbst außerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft stieß die Entdeckung auf großes Interesse. Schließlich suggerierte sie, man könne die Ausbreitung eines optischen Pulses mit eigenen Augen beobachten – auch wenn der Effekt zunächst auf einer Wegstrecke von lediglich 0,23 Millimetern

gemessen wurde und der Puls sich dabei um nur wenige Mikrosekunden verlangsamte.

Dass Licht gewissermaßen greifbar werden könnte, blieb allerdings aus vielerlei Gründen eine Illusion. Völlig klar war jedoch, dass seine zeitliche Steuerung zu wesentlich effizienterer Datenübertragung in optischen Netzwerken führen könnte. Weltweit begannen Forscher deshalb, sich dem Phänomen intensiv zu widmen.

Staus im Datenverkehr auflösen

Heute fließt der weitaus größte Teil des Daten- und Telefonverkehrs in Form optischer Signale durch Glasfasern. An Netzwerknoten werden die Signale von Routern in Empfang genommen. Diese lesen die Adressinformationen der Datenpakete aus und entscheiden, in welche Richtung sie weitergeleitet werden müssen. Stauen sich die Pakete, muss der Router einige von ihnen zwischenspeichern, bis wieder Übertragungskapazitäten frei werden. Bei Datenraten von typischerweise 10 bis 40 Gigabit (Milliarden Informationsein-

So lässt sich Licht abbremsen

Elektromagnetisch induzierte Transparenz (EIT)

Das Verfahren der elektromagnetisch induzierten Transparenz beruht auf einem speziellen Material, das zunächst undurchlässig für das Licht eines Lasers ist. Durch einen zweiten Laserstrahl kann es aber »gepumpt« und damit in einem bestimmten Frequenzbereich transparent gemacht werden. Bei diesem Vorgang bildet sich in dem Material ein Brechungsindex aus, der linear mit wachsender Frequenz stark steigt oder fällt. Ein Medium mit linear frequenzabhängigem Brechungsindex ist wiederum die Voraussetzung dafür, dass sich die Gruppengeschwindigkeit von Lichtpulsen in diesem Medium verändert.

Grundlage der EIT ist ein Quanteneffekt. Der Pumplaser sorgt dafür, dass bestimmte energetische Übergänge in dem Material quantenmechanisch nicht mehr »erlaubt« sind, weil die Wahrscheinlichkeiten für ihr Eintreten destruktiv interferieren. Die Frequenzen des ersten Strahls können die Übergänge nun nicht mehr anregen, er behält also seine Energie und durchquert das Material ungehindert. In genau diesem Frequenzbereich entsteht der gewünschte Verlauf des Brechungsindex.

Kohärente Besetzungszillation (CPO)

Normalerweise befinden sich die meisten Elektronen eines Festkörpers auf einem niedrigen Energieniveau und nur wenige auf einem höheren. Bei der kohärenten Besetzungszillation oder Coherent Population Oscillation (CPO) sorgt ein Pumplaser dafür, dass sich die Verhältnisse umkehren. Anschließend lassen die Forscher entlang des Mediums zwei Strahlen mit unterschiedlichen, aber nah beieinanderliegenden Frequenzen miteinander interferieren. Das entstehende Schwingungsmuster, eine Schwebung, sorgt dafür, dass die Elektronen periodisch

von einem Energieniveau auf das andere wechseln. Die mathematische Analyse des Vorgangs zeigt, dass dies zu einem sich linear mit der Frequenz verändernden Brechungsindex führt, der die Gruppengeschwindigkeit von durch das Medium laufenden Lichtpulsen beeinflusst.

Stimulierte Brillouin-Streuung (SBS)

Mit der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS) lassen sich sehr hohe Verzögerungen der Gruppengeschwindigkeit von Licht erzielen. Innerhalb eines Mediums treten dabei zwei optische Wellen miteinander in Wechselwirkung. Sie besitzen leicht unterschiedliche Frequenzen und breiten sich in entgegengesetzter Richtung aus. Normalerweise wird die Welle mit der höheren Frequenz als Pumpwelle bezeichnet, während die Welle mit der niedrigeren Frequenz das Signal bildet. Wie bei der CPO entsteht auch hier durch Interferenz eine Schwebung, die sich entlang des Mediums ausbreitet.

Unter bestimmten Umständen kann die Wechselwirkung der Schwebung mit dem Material dazu führen, dass darin eine Schallwelle entsteht – mit einer Frequenz, die eine Million Mal höher ist als die des höchsten Tons, den ein Mensch hören kann. Die Schallwelle ändert periodisch die Dichte des Mediums, die wieder auf die optischen Wellen zurückwirkt. Auf diese Weise wird ein Teil der Pumpleistung an das Signal transferiert, dessen Amplitude dadurch steigt. Die so genannten Kramers-Kronig-Beziehungen sagen nun aus, dass eine Amplitudenänderung (also Verstärkung oder Dämpfung) zu einer Phasenänderung und damit zu einer Änderung des Brechungsindex führt. Ist diese Änderung stark genug und verläuft sie linear mit der Frequenz, lässt sich so die Gruppengeschwindigkeit verändern.

heiten pro Sekunde) und Datenpaketen, die wie beim Internet typischerweise aus 1000 Bit und mehr bestehen, beträgt die Mindestverzögerung 25 bis 100 Nanosekunden. In dieser Zeit kann eines der Pakete vollständig gesendet werden und so den Weg für das nächste frei machen.

Bislang verwandeln die Router die ankommenden optischen Impulse stets in elektronische Signale. Nur so können sie die Adressdaten auslesen und die Pakete gegebenenfalls zwischenspeichern. Anschließend erfolgt deren Rückverwandlung in optische Signale. Der Vorgang ist aber langsam und erfordert zudem teure Hardware, die viel Energie verbraucht. Lässt er sich optimieren?

Ein Teil der Lösung besteht in Verfahren, mit denen sich optische Signale zwischenspeichern lassen, ohne sie umwandeln zu müssen. Viele Forscher setzten nach der epochalen »Nature«-Veröffentlichung ihre Hoffnungen auf langsames Licht. Tatsächlich gelangen damals sehr schnell erhebliche Fortschritte. Im Jahr 2003 veröffentlichten Matthew Bigelow, Nick Lepeshkin und Robert Boyd von der University of Rochester im US-Bundesstaat New York ihre Ergebnisse. Sie hat-

ten Licht in einem optischen Kristall mit Hilfe der kohärenten Besetzungszillation (CPO, siehe Kasten oben) stark verlangsamt – und das sogar schon bei Raumtemperatur.

Der entscheidende Schritt gelang kurz darauf, zunächst an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) unter Leitung eines der Autoren (Thévenaz) und – unabhängig davon – ein paar Monate später einer Forschergruppe in den USA um Robert Boyd, Daniel Gauthier und Alexander Gaeta. Mit Hilfe der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS, siehe Kasten oben) schafften wir es im September 2004 erstmals, langsames Licht direkt in einer optischen Faser zu erzeugen – also in genau dem Medium, welches das Rückgrat der modernen Telekommunikationsnetze bildet!

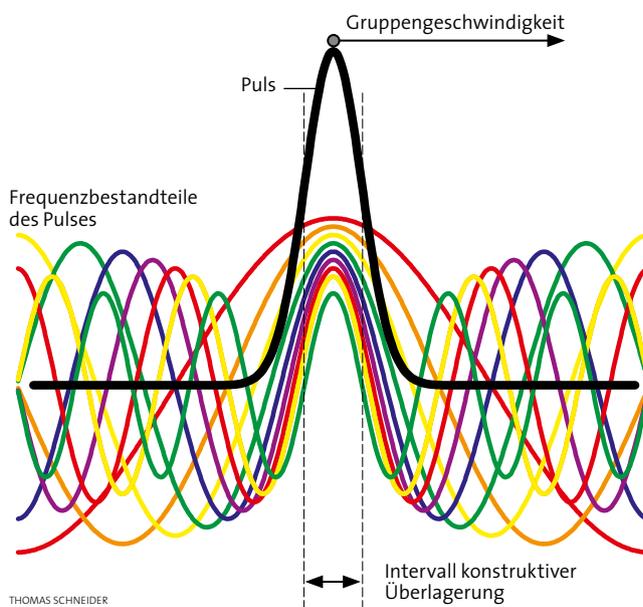
Die meisten Menschen verbinden das Wort Lichtgeschwindigkeit mit der speziellen Relativitätstheorie von Albert Einstein und mit dem konstanten Wert von rund $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde. Doch bereits um das Jahr 1910 herum diskutierten Forscher darüber, ob in einem Medium gegen Einsteins Postulat verstoßen werden kann, dem zufolge sich Signale nie schneller als mit Lichtgeschwindigkeit aus-

breiten dürfen. Denn bei theoretischen Überlegungen waren sie darauf gestoßen, dass in Medien Geschwindigkeiten auftreten könnten, die deutlich höher (oder auch niedriger) sind als die $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde, die Licht im Vakuum zurücklegt.

1914 zeigten dann Arnold Sommerfeld und Léon Brillouin in Beiträgen für die Leipziger »Annalen der Physik«, dass sich in einem Medium tatsächlich fünf verschiedene Lichtgeschwindigkeiten unterscheiden lassen: Phasen-, Gruppen- und Informationsgeschwindigkeit (die auch als Signalgeschwindigkeit bezeichnet wird) sowie Front- und Schlussgeschwindigkeit. Anders als im Vakuum treten die Lichtwellen in einem Medium nämlich in Wechselwirkung mit den Teilchen, aus denen dieses besteht. Dadurch verändern sich die Eigenschaften der Wellen. Die einzige der genannten Geschwindigkeiten, die nicht schneller als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum werden darf, ist die Informationsgeschwindigkeit: Denn würden Informationen schneller als mit Lichtgeschwindigkeit übertragen, könnte laut spezieller Relativitätstheorie der Absender einer Nachricht die Antwortsignale schon dann erhalten, wenn er die Nachricht noch gar nicht gesendet hat. Damit käme die Wirkung zeitlich vor die Ursache zu liegen, was dem Kausalprinzip widerspricht. Die übrigen Geschwindigkeiten sind jedoch überraschend variabel.

Wechselwirkung mit Elektronen bremst das Licht

Ein Lichtpuls besteht aus der Überlagerung langer Züge von Sinusschwingungen, die jeweils unterschiedliche Amplitude, Frequenz und Phase besitzen. Die Phase gibt dabei an, in welchem Abschnitt einer Schwingungsperiode sich die Welle an einem bestimmten Ort befindet, beispielsweise an einem Maximum oder im Nullpunkt. An einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit überlagern sich all diese Schwingungen konstruktiv – zum Beispiel fallen Maxima auf Maxima –, so dass innerhalb eines kleinen Intervalls in der Summe eine Pulsform entsteht (Grafik rechts oben). Außerhalb des Intervalls kommt es hingegen zu einer destruktiven Überlagerung. Dort sind die einzelnen Sinusschwingungen

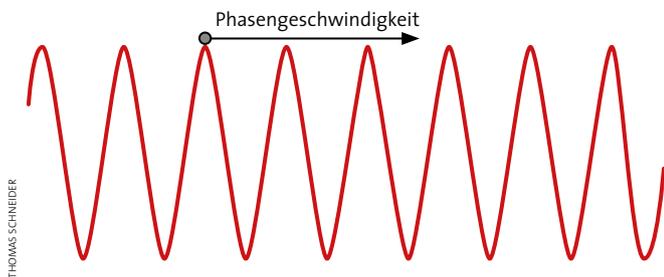


Ein Lichtpuls (schwarz) besteht aus einer Vielzahl von Wellenzügen mit unterschiedlichen Frequenzen (farbig), die einander überlagern. Nur in einem bestimmten Intervall (gestrichelt) geschieht dies so, dass sie in der Summe die beobachtete Pulsform annehmen (konstruktive Überlagerung). Außerhalb davon löschen sie sich gegenseitig aus (destruktive Überlagerung). Die Geschwindigkeit, mit der sich der Puls als Ganzes fortbewegt, ist die Gruppengeschwindigkeit. Im Fall einfacher Pulsformen ist sie identisch mit der Geschwindigkeit des Pulsmaximums.

gen im Prinzip zwar vorhanden, löschen sich aber gegenseitig aus.

Für einzelne Wellenzüge (Grafik links unten) lässt sich keine Ausbreitungsgeschwindigkeit definieren. Allerdings kann man die so genannte Phasengeschwindigkeit bestimmen, mit der sich eine bestimmte Phasenlage eines Wellenzugs wie zum Beispiel ein Maximum fortbewegt. In einem Medium bewegt sich Licht jedoch mit anderer Geschwindigkeit als im Vakuum, weil die Teilchen im Medium, vor allem die Elektronen, durch die Lichtwelle in Bewegung versetzt werden. Sie strahlen daraufhin ihrerseits Licht aus, das eine andere Phase als die Ursprungswelle besitzt. Sobald sich beide Wellen überlagern, entsteht eine Welle mit neuen Eigenschaften, insbesondere auch mit veränderter Phasengeschwindigkeit. Je nach Brechungsindex des Materials kann die Phasengeschwindigkeit in diesem Material sowohl schneller als auch langsamer sein als die Phasengeschwindigkeit im Vakuum.

Auch wenn man Licht nicht als Welle auffasst, sondern als Teilchenstrahlung, lässt sich die Veränderlichkeit der Phasengeschwindigkeit in einem Medium verstehen. Die Atome absorbieren die Photonen, werden dadurch angeregt und strahlen ihrerseits wieder Photonen aus, dies allerdings zeitversetzt, was einer Verzögerung entspricht. Die Lichtteilchen selbst werden dadurch nicht abgebremst; zwischen den Ato-



Bewegt sich Licht nicht im Vakuum, sondern durch ein Medium, lässt sich seine Geschwindigkeit auf unterschiedliche Weise definieren. Die so genannte Phasengeschwindigkeit des Lichts ist im Fall einer einzelnen Welle diejenige, mit der sich zum Beispiel die Maxima der Welle fortbewegen.

men bewegen sie sich stets mit rund $3 \cdot 10^8$ Meter pro Sekunde.

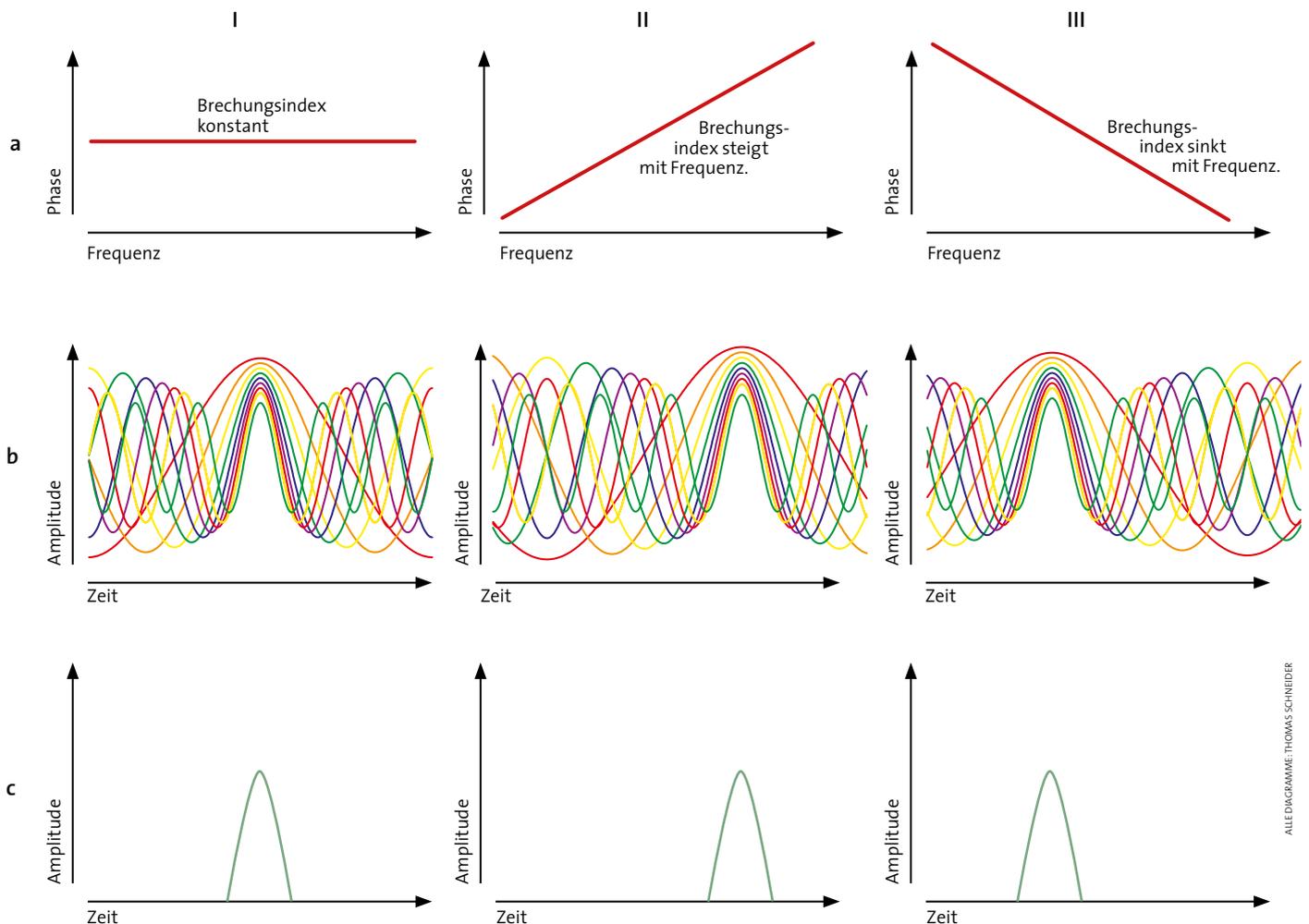
Für die Datenübertragung ist immer der Puls als Ganzes entscheidend. Er schreitet fort, weil sich der Ort, an dem sich die einzelnen Wellenzüge konstruktiv überlagern, mit der Zeit verändert. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der konstruktiven Überlagerung wird als Gruppengeschwindigkeit bezeichnet und ist bei einfachen Pulsformen identisch mit der Geschwindigkeit, mit der sich das Maximum des Pulses im Medium ausbreitet (siehe Grafik auf S. 51 oben). Auch die Gruppengeschwindigkeit kann größer oder kleiner als die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und sogar negativ werden – und es ist allein diese Geschwindigkeit, die von den in diesem Artikel beschriebenen Verfahren modifiziert wird.

Was geschieht nun, wenn ein Lichtpuls in ein Medium eintritt? Der Brechungsindex des Mediums unterscheidet

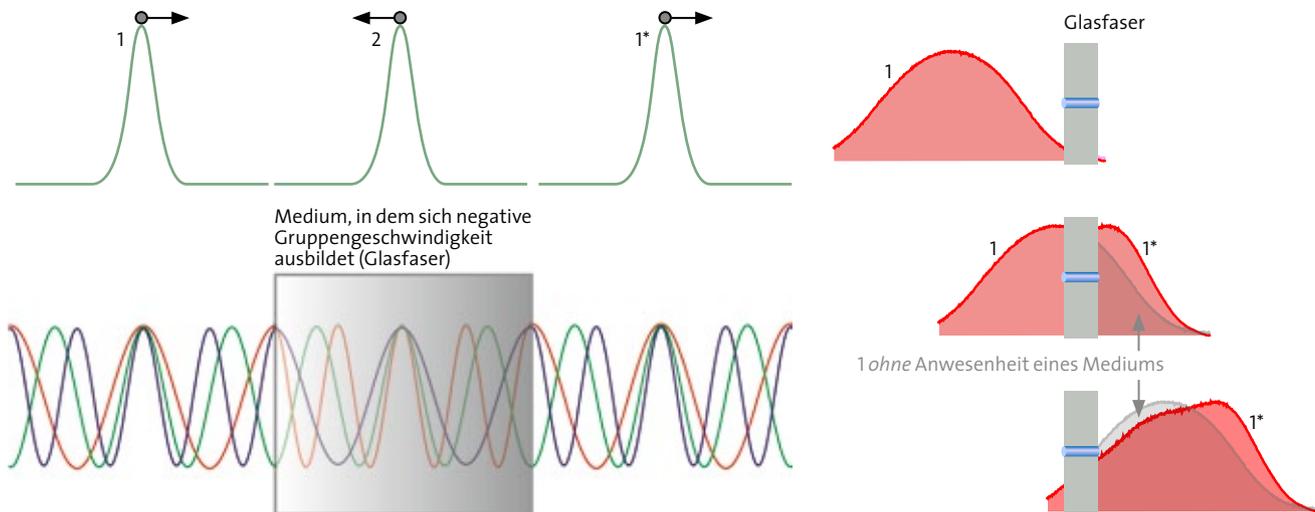
sich in der Regel für jede der eintreffenden Frequenzen, weshalb sich jede einzelne der Wellen, aus denen der Puls zusammengesetzt ist, mit einer anderen Phasengeschwindigkeit im Medium ausbreitet. Dies führt dazu, dass sich der Puls zeitlich verbreitert oder im Extremfall ganz auseinanderläuft. Doch unter besonderen Umständen – nämlich dann, wenn sich der Brechungsindex linear mit der Frequenz verändert – verschiebt sich lediglich das Intervall, in dem die Einzelwellen konstruktiv interferieren, in der Zeit. Der Puls selbst bleibt also erhalten, befindet sich nun aber an einem anderen Ort. Das heißt nichts anderes, als dass er sich infolge des veränderten Brechungsindex mit veränderter Geschwindigkeit bewegt.

Die Geschwindigkeitsdifferenz ist dabei umso größer, je stärker sich der Brechungsindex mit der Frequenz verändert. Steigt er mit der Frequenz, wird der Puls verzögert (Grafik

In einem Medium mit konstantem Brechungsindex bewegt sich ein Puls mit einer bestimmten Gruppengeschwindigkeit fort (Spalte I). Steigt jedoch der Brechungsindex mit der Frequenz, verschiebt dies die Phasen der einzelnen Frequenzen, aus denen der Puls besteht (II b, II c). Das Resultat ist ein in der Zeit nach hinten verschobener, also verzögerter Puls; seine Gruppengeschwindigkeit sinkt. Sinkt der Brechungsindex hingegen mit der Frequenz, wird der Puls in der Zeit nach vorne verschoben, also beschleunigt (III b, III c); seine Gruppengeschwindigkeit wächst.



ALLENDRUCK: THOMAS SCHNEIDER



Kann eine Wirkung ihrer Ursache vorausgehen? Die vereinfachende Grafik zeigt einen sehr speziellen Fall. Ein Lichtpuls 1 läuft auf ein Medium zu, in dem sich eine negative Gruppengeschwindigkeit ausbildet, weil die Frequenzabhängigkeit seines Brechungsindex extrem hoch ist. Puls 1 ist in genau dem Intervall zu beobachten, in dem sich lange Wellen unterschiedlicher Frequenzen (rot, grün, blau) konstruktiv überlagern. Der frequenzabhängige Brechungsindex lässt die grüne Welle unbeeinflusst, verkürzt aber die Länge der roten und verlängert die der blauen Welle. Dadurch tritt konstruktive Interferenz auch an anderen Orten auf. Neben Puls 1 sind nun – noch bevor er ganz in das

Medium eingetreten ist! – zwei weitere Pulse zu sehen: ein rückwärtslaufender Puls 2 innerhalb des Mediums sowie ein Puls 1*, der vom Ende des Mediums her nach rechts läuft. Die Grafik rechts zeigt Messdaten von einem der Autoren (Thévenaz). Noch bevor das Maximum von Puls 1 das Medium erreicht, tritt das Maximum von Puls 1* aus dem Medium aus. Puls 2 ist nicht dargestellt. Puls 1 wird also beim Durchgang durch das Medium, das im Experiment zwei Meter lang war, zu einem leicht deformierten und schnelleren Puls 1*. Grau ist dargestellt, wie Puls 1 zu diesem Zeitpunkt ohne Anwesenheit eines Mediums aussähe. Das Kausalitätsprinzip wird durch diese Phänomene nicht verletzt.

links, Spalte II); sinkt er mit der Frequenz, wird der Puls beschleunigt (Spalte III).

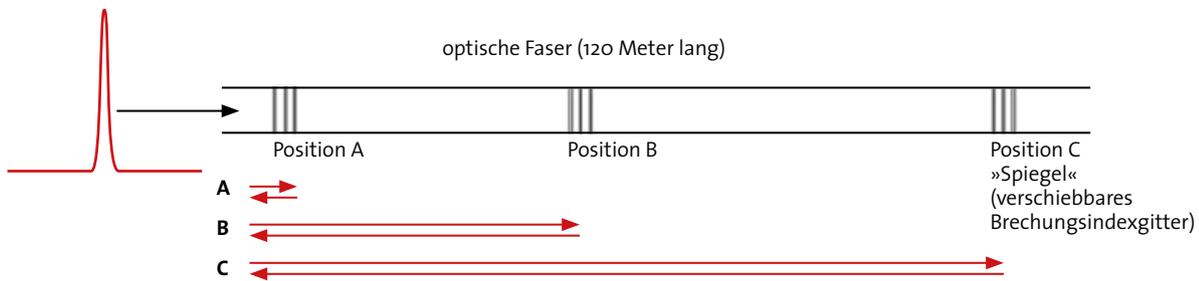
Ist die Veränderung des Brechungsindex groß genug, kann die Gruppengeschwindigkeit sogar negativ werden. Dieser Fall ist so faszinierend und scheint dem gesunden Menschenverstand so sehr zu widersprechen, dass wir ihn – auch wenn er keine Bedeutung für die Praxis spielt – hier vorstellen wollen. Dabei kommt es zu folgender Situation (Grafiken oben): Noch bevor das Maximum des Pulses den Anfang des Mediums erreicht hat, bilden sich am Ende des Kabels zwei Kopien. Die eine Kopie des Pulses bewegt sich von dort aus weiter in der Ausbreitungsrichtung des ursprünglichen Pulses, die andere Kopie läuft in entgegengesetzter Richtung zum Anfang des Mediums.

Dieses erstaunliche Verhalten scheint auf den ersten Blick das Kausalitätsprinzip zu verletzen: Noch bevor die Ursache am Anfang des Mediums zu sehen ist, sieht man bereits eine Wirkung am Ausgang. Doch natürlich wird das Kausalitätsprinzip auch in einem Medium mit negativer Gruppengeschwindigkeit nicht ausgehebelt. Diese sorgt nur dafür, dass sich das Intervall der konstruktiven Überlagerung verschiebt. Vielmehr sind die einzelnen Frequenzen schon vor dem Puls am Ausgang des Mediums präsent, löschen einander aber zunächst destruktiv aus.

Wie stark sich die Gruppengeschwindigkeit verändern lässt, die in einer typischen Glasfaser 205 000 Kilometer pro Sekunde beträgt, konnten wir bereits vor einigen Jahren zeigen. Im Dezember 2004 gelang es dem Team um einen der Autoren (Thévenaz), mit Hilfe der stimulierten Brillouin-Streuung die Gruppengeschwindigkeit in einer zwei Meter langen Faser zwischen rund 70 500 Kilometer pro Sekunde und einer negativen Geschwindigkeit von minus 428 000 Kilometer pro Sekunde zu variieren. Verglichen mit einem Puls unter »normalen« Umständen trat das Pulsmaximum dabei 18,6 Nanosekunden (milliardstel Sekunden) später beziehungsweise 14,4 Nanosekunden früher aus der Faser aus.

Mitgerissen vom Licht

Die meisten Methoden, um langsames Licht zu erzeugen, beruhen auf den so genannten Resonanzfrequenzen eines Mediums. Das ins Medium einfallende Licht kann die an einen Atomrumpf gebundenen Elektronen dazu anregen, gegen den Rumpf zu schwingen. In der Regel existieren dann Frequenzbereiche, so genannte Resonanzen, in denen sich das System leicht zu sehr starken Schwingungen anregen lässt. Liegt die Frequenz der einfallenden Lichtwelle im Bereich einer der Resonanzfrequenzen, werden die Teilchen besonders stark von ihr »mitgerissen«. Dabei entziehen sie der Welle



Forscher können Lichtpulse auch ganz einfach dadurch verzögern, dass sie ihre Laufzeit verlängern. Die Grafik zeigt das Grundprinzip eines Experiments an der EPFL in Lausanne. Ein Puls tritt von links in eine optische Faser ein und wird dort an einem verschiebbaren »Spiegel« reflektiert. Er lässt sich also während genau der Zeit »speichern«, die er benötigt, um wieder aus der Faser auszutreten. Als Spiegel fungiert ein so genanntes Brechungsindexgitter, das an einem frei wählbaren Ort innerhalb der Faser durch die Überlagerung zweier von außen eingestrahelter Lichtwellen entsteht.

viel Energie, so dass das Licht stark gedämpft wird. Diese starke Dämpfung der Welle sorgt gemäß den so genannten Kramers-Kronig-Beziehungen für die lineare Veränderung des Brechungsindex und damit für die Beschleunigung des Pulses.

Der Puls lässt sich aber auch verzögern, indem man die Welle wie im Fall der stimulierten Brillouin-Streuung in einer optischen Faser verstärkt. Auch hier führt eine Amplitudenänderung (also Verstärkung oder Dämpfung) zu einer Phasenänderung und damit zu einer Änderung des Brechungsindex, die wiederum die Gruppengeschwindigkeit beeinflusst.

Für all diese Verfahren gilt: Je stärker sie die Signalamplitude verändern, desto stärker beeinflussen sie die Gruppengeschwindigkeit. Dabei führen Amplitudenverstärkungen zu einer Signalverzögerung, umgekehrt beschleunigt eine Dämpfung das Signal. Die Amplitudenänderung lässt sich in der Regel einfach dadurch variieren, dass man die Leistung des Pumpasers, der das Medium »aktiviert«, erhöht oder erniedrigt.

Im Extremfall bleibt das Licht stehen

Neben den oben erwähnten Resonanzen kann man die Bandlücke eines Mediums nutzen, um die Gruppengeschwindigkeit eines optischen Pulses zu verändern. Diese Lücke ist ein Energiebereich, in dem sich aus quantenmechanischen Gründen weder bewegliche noch gebundene Elektronen aufhalten können. Durch periodische Strukturen wie Bragg-Gitter, gekoppelte Resonatoren oder photonische Kristalle lässt sich ein derartiger »verbotener« Frequenzbereich auch für Photonen künstlich schaffen. Liegen die Frequenzen und damit die Energien eines elektromagnetischen Pulses im Bereich der Grenzen der Bandlücke, verändert sich die Gruppengeschwindigkeit stark und im Extremfall sogar zu null.

Diese Art des langsamen Lichts, bei der das Medium mit künstlichen makroskopischen Strukturen ausgestattet wird, bezeichnen Wissenschaftler als »strukturell«. Hingegen be ruht »materielles« langsames Licht auf dem mikroskopi-

schen Verhalten des Materials. Die strukturellen Systeme haben den Vorteil, dass sie Licht verzögern können, ohne dass man ihnen Energie zuführen müsste. Das Maß der Verzögerung lässt sich jedoch nicht mehr nachträglich variieren, da es in die Struktur eingefroren ist.

Darüber hinaus ist die Technik weiteren Grenzen unterworfen. So hängt beim materiellen langsamen Licht das Maß der Verlangsamung von der Resonanzbreite ab. Diese Größe beschreibt das Maß, in dem eine Resonanz nicht nur bei einer ganz bestimmten Frequenz, sondern auch bei Nachbarfrequenzen auftritt. Es gilt: Je schmaler die Resonanzbreite, desto größer ist die Verlangsamung. Das ist allerdings auch die Achillesferse der Technik. Denn eine schmale Resonanz bedeutet zugleich, dass Signalanteile mit hoher Frequenz verloren gehen. Das Signal wird also umso stärker verzerrt, je stärker man es verzögert.

Eine wichtige Kenngröße der Kommunikationstechnik ist das Produkt aus Verzögerung und Bandbreite. Man stelle sich eine Glasfaser vor, die eine Million Bits pro Sekunde transportiert. In der Faser verzögern bestimmte Effekte die Signale um jeweils 50 Millisekunden. Das Produkt aus den beiden Zahlen beträgt 50 000 Bit. Genau diese Datenmenge ist also in der Glasfaser »gespeichert« – dadurch, dass an ihrem Eingang stets Daten nachgeliefert, aber erst mit Verzögerung wieder am Ausgang weitergereicht werden.

Mittlerweile wissen wir jedoch, dass bei materiellem langsamem Licht, das nur einen einzelnen schmalen Frequenzbereich für Verstärkung oder Dämpfung nutzt, das Verzögerung-Bandbreite-Produkt aus prinzipiellen Gründen immer etwa eins beträgt. Ein Signal lässt sich also maximal um ein Bit verzögern. Beim strukturellen langsamen Licht wiederum erzielt man zwar an der Grenze der Bandlücke hohe Verzögerungen, doch wird das Signal dort gleichzeitig stark gedämpft. Auch hier erreicht man etwa ein Bit, dann aber dominiert die Dämpfung, und das Signal geht im Rauschen unter.

Im Jahr 2007 konnte ein Team um einen der Autoren (Schneider) am Institut für Hochfrequenztechnik (IfH) der Hochschule für Telekommunikation in Leipzig nachweisen,

dass man diese Grenze beim materiellen langsamen Licht auf immerhin vier Bit erhöhen kann. Und ein Jahr später zeigte Andrea Melloni vom Politecnico di Milano, wie sich mit strukturellem langsamem Licht in einem System aus acht gekoppelten Ringresonatoren acht Bit erreichen lassen.

Aus Anwendungssicht sind allerdings auch diese Grenzen viel zu niedrig. Moderne elektronische Router besitzen eine Speicherkapazität von zum Beispiel 10 Gigabit bei Datenraten von 40 Gigabit pro Sekunde. Von solchen Werten sind optische Router auf Basis von langsamem Licht weit entfernt.

Die Forscher begannen darum umzudenken und nach anderen Anwendungen zu suchen. So stellte sich schnell heraus, dass langsames Licht eine wichtige Rolle in der Mikrowellenphotonik spielen kann. Dabei wird eine optische Trägerwelle mit einer Frequenz in der Größenordnung von 10^{14} Hertz verwendet, die durch ein Mikrowellensignal mit einer Frequenz von einigen 10^9 Hertz moduliert ist, aber ganz normal in einer Glasfaser übertragen werden kann. Für die Verarbeitung eines solchen analogen Signals ist es normalerweise nicht nötig, Zeitverzögerungen zu erzeugen, die größer sind als eine Periode der Trägerwelle. Das entspricht aber genau dem Verzögerung-Bandbreite-Produkt, das sich mit langsamem Licht erzielen lässt. Das europäische Projekt GOSPEL (»Governing the speed of light«), dem einer der Autoren (Thévenaz) angehört, hat mit dieser Technik komplexe Filter und Mikrowellengeneratoren hoher Stabilität entwickelt, die über weite Frequenzbereiche abstimmbare sind und beispielsweise in Radarsystemen oder Mobilfunknetzen zum Einsatz kommen können.

Gestautes Licht verstärkt nichtlineare Effekte

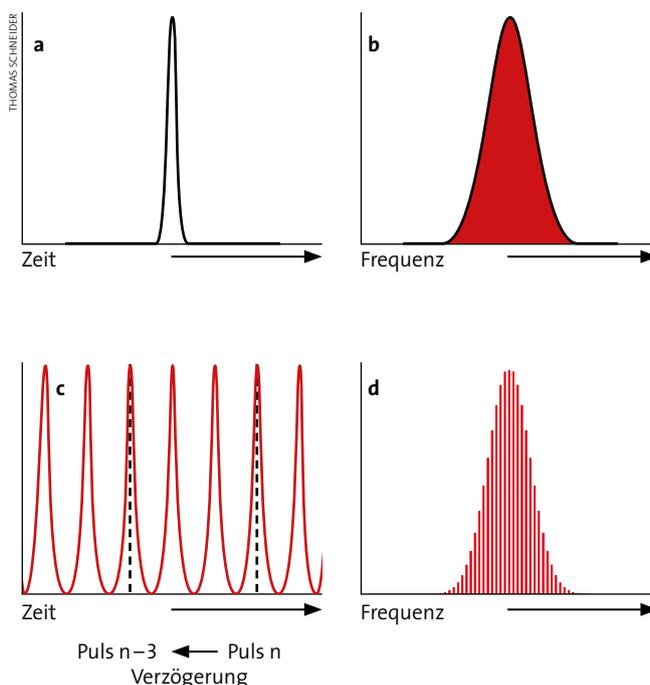
Weitere unerwartete Anwendungen resultieren aus der höheren Energiedichte von langsamem Licht. In einem durchsichtigen Medium ist die Geschwindigkeit, mit der die Energie der Lichtwelle übertragen wird, identisch mit der Gruppengeschwindigkeit. Senkt man in einem Medium für strukturelles langsames Licht also die Gruppengeschwindigkeit, sinkt auch die Geschwindigkeit, mit der die Energie des Lichts übertragen wird. Folglich steigt aber, weil sich das Licht gewissermaßen staut, die Dichte der optischen Energie. Davon wiederum profitieren eine Reihe nichtlinearer optischer Effekte im Medium, die umso stärker sind, je höher die Energiedichte ist.

Systeme, die auf solchen Effekten basieren – wie optische Schalter oder Geräte, welche die Frequenz einer Trägerwelle in eine andere Frequenz umwandeln –, lassen sich dank dieses Effekts nun viel kleiner bauen oder benötigen deutlich weniger Energie. Auch elektrooptische Modulatoren, welche die Phase von Lichtwellen verändern, und optische Schalter auf Basis des strukturellen langsamen Lichts haben Forscher bereits entwickelt.

Die Arbeit mit langsamem Licht hat aber auch gänzlich neue Ideen für die Optimierung digitaler Kommunikationsnetze hervorgebracht. Sie besitzen großes Potenzial, so dass

wir die ursprünglich gesetzten Ziele vielleicht doch noch verwirklichen könnten. So gelang es, Verzögerungen von mehr als 1000 Bit bei Datenraten von zehn Gigabit pro Sekunde zu erreichen. Der genaue Wert ließ sich dabei ohne elektronische Umwege allein mittels optischer Verfahren einstellen. Das Prinzip beruht darauf, dass die Gruppengeschwindigkeit in einer Glasfaser von der Wellenlänge der Trägerwelle abhängt. Pulse mit einer Trägerwellenlänge von 1550 Nanometern bewegen sich schneller durch die Faser, als wenn ihre Trägerwellenlänge beispielsweise 1560 Nanometer beträgt. Indem man also die Wellenlänge der Trägerwelle verändert – etwa durch den nichtlinearen optischen Effekt der Vierwellenmischung –, lässt sich die gewünschte Verzögerung variabel einstellen. Am Ende muss dann wieder die ursprüngliche Trägerwelle erzeugt werden.

Prinzipiell könnten solche Verfahren in digitalen Kommunikationsnetzen zum Einsatz kommen, der technische Aufwand wäre allerdings enorm. Zum einen bedarf es für aus-



So funktioniert die am Leipziger Institut für Hochfrequenztechnik entwickelte Quasilichtspeicherung: Ein einzelner Puls (Grafik a) setzt sich aus Einzelwellen verschiedener Frequenzen zusammen. In seinem Spektrum (b) ist zu sehen, dass diese Frequenzen kontinuierlich verteilt sind. Eine Folge identischer Pulse (c) besitzt hingegen ein Spektrum aus diskreten Frequenzen, die durch identische Abstände voneinander getrennt sind (d). Das bedeutet im Umkehrschluss: Entnimmt man einem Puls einzelne Frequenzbereiche, erzeugt man eine Folge zahlreicher identischer Kopien. Eine dieser Kopien des Ursprungspulses wählt man nun aus. Je weiter hinten sie auf der Zeitachse liegt, desto größer ist die erreichte Verzögerung. In Grafik c ist ein Beispiel angedeutet: Die Auswahl von Puls n-3 statt von Puls n entspricht einer zeitlichen Verzögerung von drei Pulsbreiten.

reichende Verzögerungen sehr langer Medien – meist Glasfasern mit einer Länge von mehreren Dutzend Kilometern. Zum anderen wird das Signal dabei stark verzerrt, und die Techniken zu seiner Wiederherstellung stoßen an die Grenzen des heute Möglichen.

Vor Kurzem erzielten wir sowohl an der EPFL als auch am IfH aber weitere Fortschritte bei der optischen Verzögerung beziehungsweise Speicherung. Das System der EPFL arbeitet nach dem Prinzip einer konventionellen Verzögerungsstrecke: Der optische Puls wird einfach an einem verschiebbaren Spiegel reflektiert. Die Verzögerung ist dabei stufenlos von null bis zu der Zeit einstellbar, die der Puls zum Spiegel und zurück benötigt, wenn sich Letzterer am Ende der Verschiebungsstrecke befindet. Den Spiegel selbst erzeugen wir im Inneren der Glasfaser, die der Puls durchläuft, indem wir von den Enden zwei Lichtwellen in entgegengesetzter Richtung in die Glasfaser einstrahlen. Dadurch entsteht in der Faser ein Reflexionsgitter, an dem der Puls reflektiert wird. Mit diesem System konnten wir bei einer Faserlänge von gerade einmal 120 Metern einen Puls mit einer Dauer von 600 Piko-sekunden ohne nennenswerte Verzerrungen um mehr als eine Mikrosekunde und damit um rund 1700 Bit verzögern.

Lange Speicherzeiten dank Pulskopien

Am Institut für Hochfrequenztechnik entwickelten wir unterdessen das Verfahren der Quasilichtspeicherung (QLS). Jeder Lichtpuls lässt sich wie in der Grafik auf S. 55 darstellen: Die Frequenzen, aus denen er sich zusammensetzt, sind kontinuierlich unter einer Einhüllenden verteilt. Handelt es sich hingegen um einen periodisch wiederkehrenden Puls, bleibt die Einhüllende dieselbe, das Spektrum ist jedoch diskret. Es enthält jetzt also nur noch einzelne Frequenzen mit einem festen Abstand zueinander. Dabei entspricht der Abstand zwischen den Frequenzen dem Kehrwert des Zeitabstands zwischen den Pulsen – ein Zusammenhang, der sogar für ganze Datenpakete aus vielen Pulsen gilt.

Die Idee hinter dem System des IfH besteht nun einfach darin, aus dem kontinuierlichen Spektrum des ankommenden Datenpakets einzelne äquidistante Frequenzen zu entnehmen. Diese setzen sich daraufhin zu einem Paket zusammen, das stetig wiederkehrt. Anders gesagt: Von dem Paket liegen nun etliche Kopien vor, die einander in bestimmten zeitlichen Abständen folgen. Die gewünschte Speicherzeit lässt sich grob dadurch justieren, dass man spätere oder frühere Pakete herausgreift. Indem wir den Abstand zwischen den entnommenen Frequenzen verändern, lässt sie sich fein einstellen. Dabei treten, solange man bestimmte Bedingungen einhält, nicht einmal Verzerrungen auf.

Derzeit erreichen wir am IfH eine Speicherzeit von bis zu 120 Nanosekunden. So konnten wir Datenpakete mit einer Länge von acht Bit bei einer Datenrate von einem Gigabit pro Sekunde um 120 Bit verzögern. Da die Methode unabhängig von der Datenrate ist, ergibt sich für ein Signal bei einer Datenrate von 40 Gigabit pro Sekunde eine Speicherzeit von 4800 Bit, für ein Signal bei 100 Gigabit pro Sekunde eine von

12 000 Bit und so weiter. Das reicht für Anwendungen bereits aus. Gemeinsam mit Kollegen von der Technischen Universität Berlin haben wir mittlerweile Siliziumchips entwickelt, die genau dieses Verfahren beherrschen. Damit ist die Massenproduktion preiswerter und kompakter optischer Speicher in Reichweite.

Das langsame Licht mag die ursprünglichen Erwartungen nicht ganz erfüllt haben. Doch es hat den Wissenschaftlern die Augen dafür geöffnet, dass sich bei der Ausbreitung optischer Signale auch die Variable Zeit kontrollieren lässt. So erschlossen sie in wenigen Jahren völlig neue Forschungsgebiete. Die optischen Systeme mit höherer Leistung und geringerem Energieverbrauch, die nun möglich geworden sind, werden Antworten auf manche Herausforderung der Zukunft geben.

Doch das ist nicht alles. Inspiriert vom langsamen Licht entwickelten die Forscher völlig neue Methoden, um optische Signale zeitlich zu kontrollieren. Mit ihrer Hilfe könnten wir die Datenraten in unseren Kommunikationssystemen künftig möglicherweise drastisch erhöhen. ~

DIE AUTOREN



Luc Thévenaz (links) forscht seit 1988 an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Dort leitet er derzeit die Arbeitsgruppe Faseroptik. Die Forschungsinteressen des Physikers umfassen faseroptische Sensoren, die nichtlineare Optik in Fasern,

langsameres und schnelleres Licht und die Laserspektroskopie in Gasen. Einladungen zu Forschungsaufenthalten führten ihn an die Stanford University, USA, nach Südkorea und nach Australien. Er gründete die Firma Omnisens im schweizerischen Morges. **Thomas Schneider** ist seit 2000 Professor an der Hochschule für Telekommunikation Leipzig (HfT) und leitet das dortige Institut für Hochfrequenztechnik. Seine Forschungsinteressen liegen auf nichtlinearen optischen Effekten in Wellenleitern und Festkörpern, der ultrahochoptischen Spektroskopie, der Speicherung und Verlangsamung von Licht sowie der Erzeugung und Nutzung von Wellen im Terahertzbereich für die Kommunikation.

QUELLEN

- Bigelow, M. S. et al.:** Superluminal and Slow Light Propagation in a Room-Temperature Solid. In: *Science* 301, S. 200–202, 2003
- González-Herráez, M. et al.:** Optically Controlled Slow and Fast Light in Optical Fibers Using Stimulated Brillouin Scattering. In: *Applied Physics Letters* 87, S. 081113, 2005
- Jamshidi, K. et al.:** A Review to the All-Optical Quasi-Light Storage. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 99, S. 1–7, 2011
- Schneider, T. et al.:** Quasi-Light Storage: A Method for the Tunable Storage of Optical Packets With a Potential Delay-Bandwidth Product of Several Thousand Bits. In: *Journal of Lightwave Technology* 28, S. 2586–2592, 2010
- Thévenaz, L.:** Slow and Fast Light in Optical Fibres. In: *Nature Photonics* 2, S. 474–481, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135751

WISSENSCHAFTSTHEORIE

Die Physik – ein auffälliger Turm von Babel

Physiker versprechen immer wieder, ein Theoriegebäude zu errichten, das die gesamte Welt erklärt. Dabei müsste jeder wissen, der die Disziplin zu seinem Beruf gemacht hat, dass sogar in längst errichteten Stockwerken teils gewaltige Risse klaffen.

Von Tony Rothman

» Ich will wissen, warum die Dinge sind, wie sie sind. Und ich will die fundamentalen Gesetze verstehen, die unser Universum zu dem machen, was es ist.« So oder ähnlich würden wohl viele angehende Physiker erklären, was sie bewegt, diese Wissenschaftsdisziplin zu ihrem Beruf zu machen. Wir Physiker wollen schlicht und einfach lernen, wie die Welt funktioniert.

Physik ist die fundamentalste der Naturwissenschaften – so sehen es die Physiker selbst, und diese Sichtweise prägt auch die Art und Weise, wie Physik gelehrt wird. Demzufolge ist das gedankliche Gebäude der Naturbeschreibung, das die Disziplin zu errichten versucht, allumfassend, frei von inneren Widersprüchen, konzeptionell zwingend und über all das hinaus auch noch überwältigend schön. Das Feld der von der

Physik erklärten und erklärten Phänomene ist weit, und es bildet nichts weniger als die Grundlage der gesamten modernen Zivilisation.

Doch in dem Gebäude zeigen sich Risse. Je weiter ein Physiker auf seinem Berufsweg voranschreitet, desto auffälliger wird er sie empfinden. Er wird den Schmutz entdecken, der unter den Teppich gekehrt worden ist, und all die Schummeleien und Betrügereien, die auch der Physik nicht fremd sind. Das vermeintlich stabile Bauwerk, so stellt er beunruhigt fest, sieht eher aus wie eine moderne Version von Pieter Bruegels Turm zu Babel – eine heruntergekommene Struktur aus isolierten Modellen, die durch schiefe Erklärungen notdürftig miteinander verbunden sind, kurz eine Monstrosität, die himmelwärts taumelt.



Als sie mit dem Bau des Turms von Babel den Himmel zu erreichen trachteten, zogen die Menschen den Zorn Gottes auf sich. Er strafte sie, indem er ihre Sprache verwirrte, so dass sie sich nicht mehr miteinander verständigen konnten, das Vorhaben aufgaben und sich in alle Welt verstreuten. Die Physiker der Gegenwart bauen hingegen weiter an ihrem Weltgebäude – und tun, als würden sie die Risse und notdürftig miteinander verbundenen Strukturen in den unteren Etagen nicht bemerken. Abgebildet ist »Der Turmbau zu Babel« von Pieter Bruegel dem Älteren aus dem Jahr 1563.

Uns allen ist klar, dass noch immer viele grundlegende Fragen unbeantwortet sind. Welcher physikalische Mechanismus steckt hinter der Trägheit der Masse? Besitzt der Raum mehr als drei Dimensionen? Existiert eine Theorie von allem, die die Grundkräfte der Natur in einem gemeinsamen Rahmen beschreibt? Doch schon weit diesseits der Forschungsfront, auf dem Niveau von Vordiplom und Bachelorarbeit, klaffen große Lücken oder gar Abgründe.

Das hindert die Lehrenden allerdings nicht daran, die Themen als vollständig verstanden zu präsentieren. Denn auch sie fürchten die Gefahren, die darin lauern. Diese Vorgehensweise ist intellektuell unredlich und untergräbt genau jene Tugenden, die unabdingbar zur Wissenschaft gehören, nämlich die Dinge zu hinterfragen und Antworten mit einem angemessenen Grad an Skepsis zu betrachten.

In jeder Anfängervorlesung über Physik müssen sich die Studenten schon in den ersten Wochen mit dem Phänomen der Reibung auseinandersetzen. Sie lernen, dass Reibung die Bewegung von Objekten hemmt und durch die mikroskopische Wechselwirkung zweier aneinander entlanggleitender Oberflächen zu Stande kommt. Diese Erklärung erscheint ihnen ziemlich plausibel, ja sogar offensichtlich. Doch unabhängig von den Modellen, die man ihnen präsentiert und die hochtrabend von molekularen Bergen sprechen, die sich gegenseitig den Weg versperren, oder von Laufschuhen, die an der Bahn kleben, erzeugt Reibung Wärme und damit eine Zunahme von Entropie. Damit schafft sie aber auch einen Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft.

Die zwangsläufige Zunahme der Entropie bei irreversiblen Prozessen, der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, ist das einzige Naturgesetz, das diese grundlegende Unterscheidung trifft. Hingegen sind die newtonschen Gesetze, die Gesetze der Elektrodynamik und die der Relativität alle reversibel – für keines spielt es eine Rolle, ob die Uhr des Universums vorwärts- oder rückwärtsläuft. Doch wenn die newtonschen Gesetze tatsächlich das Fundament bilden, dann sollte sich der zweite Hauptsatz der Thermodynamik aus der newtonschen Mechanik herleiten lassen. Das ist aber niemals befriedigend gelungen. Die Unvereinbarkeit des zwei-

ten Hauptsatzes mit den anderen grundlegenden Theorien der Physik bleibt das vielleicht größte Paradoxon der gesamten Disziplin. In den Anfängerkursen lassen es die Dozenten jedoch einfach aus, und die Autoren der Lehrbücher widmen ihm kein einziges Wort.

Der große Schwindel der Einführungsvorlesungen

Und es gibt weitere Probleme. Für einen Physiker besteht die Welt aus Billardkugeln und Schraubenfedern. Eine ideale Feder beispielsweise schwingt bis in alle Ewigkeit. Jeder, der schon einmal eine reale Feder beobachtet hat, weiß indessen, dass diese Ewigkeit in Wirklichkeit nur einige Sekunden andauert. Mathematisch ist das kein Problem: Wir führen einfach einen Reibungsterm in die Federgleichung ein und bringen auf diese Weise Theorie und Beobachtung in Übereinstimmung. Doch der Term wird ad hoc eingeführt, von Hand justiert und nicht näher begründet, quasi aus dem Ärmel geschüttelt. Erklärt er auf irgendeine Weise das Verhalten von Federn? Nicht im Geringsten.

Vielleicht hat unsere Selbstgefälligkeit einfach damit zu tun, dass wir eine plausible Gleichung zu Papier gebracht haben. Tatsächlich glaubten die Physiker lange, die Mathematik sei der Stein von Rosette zur Entschlüsselung der Geheimnisse der Natur. Seit der ungarisch-amerikanische Nobelpreisträger Eugene Wigner (1902–1995) im Jahr 1960 sein berühmtes Essay »The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences« (etwa: »Die unbegreifliche Effizienz der Mathematik in den Naturwissenschaften«) veröffentlicht hat, ist diese Ansicht regelrecht zu einem Glaubenssatz geworden.

Doch der Glaube, dass Gott ein Mathematiker ist, dürfte eher das Ergebnis selektiver Wahrnehmung sein. Der große Schwindel der physikalischen Anfängerkurse besteht ja gerade in der Behauptung, dass jedes Problem eine exakte Lösung besäße. Mehr noch: Man erwartet von den Studierenden sogar, dass sie diese Lösung finden, und impft sie dadurch regelrecht mit einer Erwartungshaltung, die kaum etwas mit der Realität zu tun hat. Denn nur verschwindend wenige physikalische Probleme besitzen exakte Lösungen, verglichen mit dem großen Rest. Ein Physiker muss im Verlauf seiner Karriere daher vor allem Näherungslösungen finden – und hoffen, dass sie einigermaßen stimmen.

Unverzichtbarer Bestandteil der ersten Physikvorlesungen ist auch das Pendel. Seine einfachste Variante besteht gerade einmal aus einer Masse, die am Ende eines Fadens hin- und herschwingt. Wendet man die newtonschen Gesetze auf das Pendel an, gelangt man zu einer Gleichung, die sich nur sehr schwer lösen lässt. Wir sagen den Studierenden daher, sie sollen davon ausgehen, dass das Pendel nur kleine Oszillationen ausführt. Mit dieser Vereinfachung lässt sich die Aufgabe leicht erledigen.

Tatsächlich ist das ursprüngliche Problem aber nicht nur für Anfänger zu schwierig. Es besitzt gar keine exakte Lösung, jedenfalls nicht in Form »elementarer Funktionen« wie Sinus und Kosinus. In Lehrbüchern für Fortgeschrittene

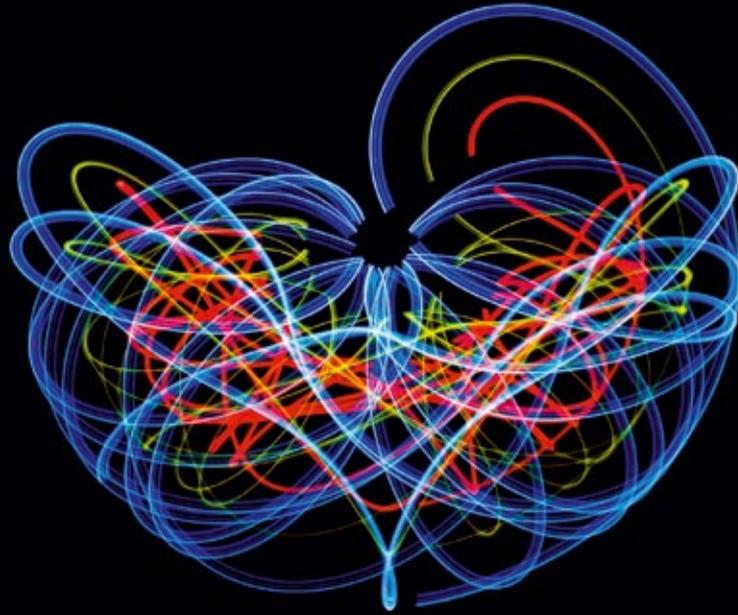
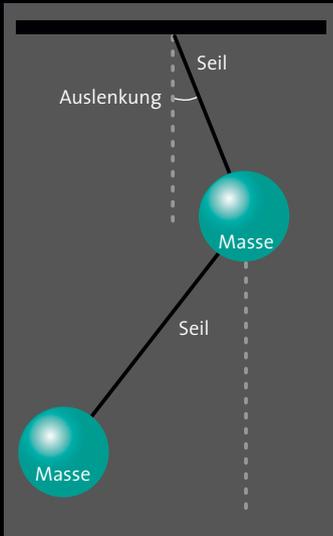
AUF EINEN BLICK

RISSE IM WELTGEBÄUDE

1 Die Physik ist bei der Beschreibung der Natur weiter vorangekommen als andere Disziplinen. Allzu selbstgewiss darf sie dennoch nicht sein. Selbst auf altbekannten Forschungsgebieten hat sie manche **fundamentale Frage** unbeantwortet gelassen.

2 Schon auf dem Niveau von Bachelorstudium und Vordiplom begegnen angehenden Physikern **unendlich große Kräfte**, **unlösbar Gleichungen** und die **Paradoxien der Quantenwelt**.

3 Auch wenn mancher von der **Weltformel** träumt, liegen auf vielen Gebieten endgültige Antworten noch außer Reichweite. Die Physik bleibt vorerst eine Sammlung theoretischer Modelle und kann nicht den Anspruch erheben, die »Wahrheit« gefunden zu haben.



Hängt man an die Kugel eines Pendels ein weiteres Pendel (kleines Bild), erweist sich der zeitliche Verlauf der Bewegungen als chaotisch: Schon kleinste Änderungen der Anfangsbedingungen führen zu unvorhersehbaren Ergebnissen. Diese lassen sich leicht veranschaulichen. Befestigt man Leuchtdioden an den Kugeln eines solchen Doppelpendels (rechts, Langzeitaufnahme), entstehen faszinierende Bilder.

heißt es zwar, es gäbe doch eine. Indessen kann man lange darüber diskutieren, ob das Wort »exakt« für diese Ungeheuer von mathematischen Termen wirklich zutrifft. Spätestens wenn man den Faden durch eine Feder ersetzt, vergeht Physikern die Freude an dem Problem gänzlich.

Es führt kein Weg daran vorbei, dass wir die reale Welt von ihrer mathematischen Beschreibung unterscheiden müssen. Einstein drückte das im Widerspruch zu Wigner so aus: »Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und insofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit.«

Unendlich große Kräfte gibt es nicht – zumindest hoffen wir das

Diese Maxime sollten sich Dozenten vielleicht zu Herzen nehmen, wenn sie mit ihren Studierenden dann auch über das berühmte newtonsche Gravitationsgesetz sprechen. Eine seltsame Eigenheit bleibt nämlich oft unerwähnt. Gemäß der Gleichung wird die Anziehungskraft zwischen zwei Körpern unendlich groß, wenn sie sich unendlich nahe kommen. Unendlich große Kräfte kommen in der Natur jedoch nicht vor – zumindest hoffen wir das –, weshalb wir diese unerwünschte Singularität mit dem Argument beseitigen, dass reale Objekte eine endliche Größe besitzen. Dann können

sich ihre Mittelpunkte einander nie so stark annähern, dass es zu einem Problem käme.

In der Einführungsvorlesung zum Elektromagnetismus lernen die Studenten jedoch auch das coulombsche Gesetz kennen. Es beschreibt die Anziehung zwischen elektrischen Ladungen, und seine Form ist identisch mit der des newtonschen Gesetzes. In der modernen Physik, in der viel von punktförmigen Teilchen wie Elektronen und Positronen die Rede ist, müssen wir uns nun aber wirklich Sorgen über unendliche Kräfte machen. Und es war genau diese Schwierigkeit, die zu den modernen Feldtheorien wie der Quantenelektrodynamik führte.

Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus bergen weitere Mysterien. Einer der Höhepunkte einer Anfängerveranstaltung, zumindest für uns Professoren, ist die Einführung der Maxwell-Gleichungen, in denen diese Phänomene zum Elektromagnetismus vereinigt werden. Einige Vorlesungen später erklären wir den Studenten, dass Licht aus elektrischen und magnetischen Feldern besteht, die senkrecht zueinander schwingen und sich durch den Raum ausbreiten. Und als Nächstes behaupten wir, dass Licht Druck auf Materie ausübt. Dieser Strahlungsdruck ermöglicht beispielsweise die Detonation einer Wasserstoffbombe, erlaubt aber auch, Raumsonden durch Sonnensegel anzutreiben.

Einführende Lehrbücher erklären den Strahlungsdruck üblicherweise so, dass das elektrische Feld einer Lichtwelle Elektronen in eine Richtung beschleunigt und das magnetische Feld sie dann weiter vorantreibt. Diese Erklärung, die sich manchmal noch in der fünften Auflage eines Lehrbuchs findet, ist aber völlig falsch. Will man das Phänomen korrekt erklären, muss man stattdessen auf eine berühmte Ad-hoc-Idee zurückgreifen, nämlich auf das Abraham-Lorentz-Modell.

Beschrieben mit den Mitteln der klassischen Physik liefert das Modell allerdings paradoxe Ergebnisse. Der Versuch, es auf eine solide Grundlage zu stellen, führte wiederum zur Entwicklung der Quantenelektrodynamik. In dieser schließlich finden sich an jeder Ecke Unendlichkeiten, mit denen kein Physiker irgendetwas anfangen kann. Will man sie beseitigen, benötigt man eine weitere Ad-hoc-Prozedur, die so genannte Renormierung. Paul Dirac empfand sie als so abstoßend, dass er die Physik gleich komplett an den Nagel hängte. Zwar hat sich die Theorie seither weiterentwickelt, doch viele Physiker würden wohl Richard Feynman zustimmen, der die Renormierung – als einer ihrer Erfinder – schlicht als Hokuspokus bezeichnete. Hat die Physik also tatsächlich ein adäquates Fundament für all die Weisheit zu bieten, die in Anfängervorlesungen so unbekümmert ausgebreitet wird?

Einer der großen Augenblicke im Leben eines jeden jungen Physikers ist die erste Begegnung mit dem Lagrange-Formalismus. In ihm enthüllt Gott die Wahrheit über die Welt. Seine Wurzeln liegen im alten Griechenland sowie in der im 17. Jahrhundert von Pierre de Fermat geäußerten Idee, dass Licht zwischen zwei Punkten den Weg wählt, der die geringste Zeit in Anspruch nimmt. Dieses fermatsche Prinzip erlaubt unter anderem, das berühmte snelliussche Gesetz der Lichtbrechung herzuleiten. Die Idee, dass die Natur bestimmte Größen zu minimieren versucht, führte schließlich zum »Prinzip der kleinsten Wirkung«. Es besagt, dass man nur eine Größe namens »Wirkung« minimieren muss, um – Simalabim – wie durch ein Wunder die newtonsche Gleichung für ein System zu erhalten. (In klassischen Systemen ist die Wirkung im Wesentlichen definiert als die kinetische Energie minus der potenziellen Energie, was als Lagrange-Funktion bezeichnet wird, multipliziert mit der Zeit. Mit der umgangssprachlichen Bedeutung von Wirkung hat der Begriff nichts zu tun.)

Man weiß oft nicht einmal, ob die Lösung korrekt ist

Die Erkenntnis, dass die newtonschen Gesetze aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung folgen, ist Ehrfurcht erregend. Junge Physiker lassen sich sofort davon überzeugen, dass die Wirkung – in logischer Hinsicht, wenn auch nicht in historischer – den newtonschen Gesetzen vorausgeht. Wenn sie sich an die Anfängerübung erinnern, in der sie für ärgerlich komplizierte Systeme aus Seilen und Hebeln die newtonschen Gleichungen formulieren sollten, dann erscheint ihnen dieselbe Übung im Lagrange-Formalismus nun erstaunlich einfach.

Der große Schwindel der Einführungsvorlesungen besteht aber weiterhin in der Unterstellung, dass Probleme exakte Lösungen besitzen. In meinem zweiten Studienjahr sollten wir die Gleichungen für ein Doppelpendel herleiten – für

ein Pendel also, das an einem zweiten Pendel aufgehängt ist (siehe Bild S. 63). Mit dem Lagrange-Formalismus hat man diese Aufgabe schnell erledigt. Was uns damals allerdings nicht gesagt wurde oder vielleicht auch noch gar nicht bekannt war: Das Doppelpendel ist ein chaotisches System. Es ist daher prinzipiell unmöglich, die hergeleiteten Gleichungen auch zu lösen. Was also haben wir bei dieser Aufgabe eigentlich gelernt?

Nichtsdestoweniger funktioniert der Formalismus sehr gut, wenn man ihn auf Standardsysteme anwendet. In solchen Systemen sind die Hebel durch ideale Seile verbunden, die sich nicht dehnen. Unglücklicherweise ist die Lagrange-Methode aber alles andere als simpel, wenn sich die Länge der Seile mit der Zeit verändert. Dann werden die nötigen Korrekturterme so aufwändig, dass sich nahezu jeder Lehrbuchautor erhebliche Fehler leistet – oder diese Szenarien

gleich vollständig weglässt. Tatsächlich ist die Situation dermaßen heikel, dass man häufig nicht einmal weiß, ob die gefundene Lösung korrekt ist.

Dies ist keineswegs ein rein akademisches Problem.

Einstein betrachtete seine Theorie der Gravitation, die allgemeine Relativitätstheorie, als unvollständig, solange er seine Feldgleichungen nicht aus einer Wirkung herleiten konnte (eine Leistung, die der Mathematiker David Hilbert schließlich fünf Tage vor ihm vollbrachte).

Aus der Relativitätstheorie lassen sich zahlreiche Modelle des Kosmos ableiten, von denen die meisten allerdings in keiner Weise dem realen Universum ähneln. Wie wir aber heute wissen, erhält man für einige dieser Modelle ein falsches Ergebnis, wenn man die zugehörigen Feldgleichungen aus einer Wirkung herleitet. Warum das Verfahren dort versagt und wie es sich korrigieren lässt, ist Gegenstand einer beachtlichen Zahl eher esoterischer Forschungsarbeiten. Soweit ich weiß, erfordern all diese Korrekturen jedoch eine Kenntnis der korrekten Antwort, also der einsteinschen Feldgleichungen.

Moderne Physiker nehmen den Vorrang der Lagrange-Mechanik ernst. Zeitgenössische Praktiker, ob Kosmologen oder Stringtheoretiker, beginnen unvermeidlich damit, für ihre Lieblingstheorie eine Wirkung zu postulieren, aus der sie dann die Gleichungen herleiten. Doch wie können sie sicher sein, die korrekte Lösung gefunden zu haben, wenn sie nicht bereits einen Satz akzeptierter Feldgleichungen besitzen? Diese Frage stellt sich insbesondere dann, wenn sich die Theorie weit von den Experimenten entfernt hat, wie es heute der Fall ist.

Es wäre wenig überraschend, wenn nicht auch die Welt der subatomaren Teilchen und die Quantenphysik Mysterien hervorbringen würde. Und tatsächlich werden wir nicht enttäuscht. So enthält beispielsweise das Standardmodell der Teilchenphysik nicht weniger als 19 frei justierbare Parameter. Das ist eine ganze Menge. »Mit vier Parametern kann ich

einen Elefanten anpassen!«, soll John von Neumann gesagt haben. An dieser Stelle könnte man auch erwähnen, dass »Schönheit« nicht gerade zu den bevorzugten Begriffen gehört, wenn man über das Standardmodell spricht.

Doch so weit muss man in der Quantenphysik gar nicht gehen, wenn man sich verwirren lassen will. Das Konzept des Spins eines Elektrons spielt in jeder Einführungsvorlesung über Quantenmechanik eine grundlegende Rolle. Spin ist der Fachausdruck für den Eigendrehimpuls des Teilchens. Doch was genau sich hier dreht, wird nie zum Thema gemacht. Einer der Erfinder dieses Konzepts, Wolfgang Pauli, hatte es zunächst sogar wieder verworfen. Denn wenn das Elektron einen endlichen Radius besitzt, worauf einige Experimente hindeuteten, dann müsste es an seiner Peripherie mit Überlichtgeschwindigkeit rotieren. Betrachten wir es hingegen als punktförmig, müssen wir uns ein rotierendes Teilchen mit Radius null vorstellen. Keine leichte Aufgabe, ganz abgesehen von dem Ärger, den uns die damit einhergehenden unendlichen Kräfte bereiten.

Schwierigkeiten unter den Teppich kehren

Für gewöhnlich ignorieren Lehrbücher der Quantentheorie selbst jene Schwierigkeiten, die mitten im Zentrum der Disziplin lauern. Die grundlegendste von ihnen ist das berühmte Messproblem. Die Schrödinger-Gleichung, die das Verhalten von Quantensystemen beschreibt, ist ebenso deterministisch wie die newtonsche Gravitation. Doch die Quantenmechanik sagt nur die Wahrscheinlichkeit voraus, mit der ein Experiment ein bestimmtes Ergebnis liefert. Wie ein deterministisches System, in dem das Ergebnis vorherbestimmt ist, just im Augenblick der Messung abrupt zu einem probabilistischen werden kann, ist das große ungelöste Mysterium der Quantentheorie. Doch keines der vielen mir bekannten Lehrbücher über Quantenmechanik erwähnt dieses Problem überhaupt. Ein weit verbreitetes unter ihnen treibt die Ironie gar auf die Spitze: Es enthält ein Kapitel »Messungen«, ohne darin das Messproblem zu behandeln.

Gerade die Verfasser von Lehrbüchern über Quantenmechanik sind geschickt darin, konzeptionelle Schwierigkeiten unter den Teppich zu kehren. Vielleicht hängt dies mit ihrem Thema zusammen, das dem gesunden Menschenverstand so sehr widerspricht. Beim berühmten Doppelspalt-Versuch wird dies besonders deutlich. Das Experiment dient im Allgemeinen dazu, den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts zu illustrieren, und konfrontiert uns direkt mit der Unergründlichkeit der Natur.

Im Grunde ist es ganz einfach: Man lässt einen Lichtstrahl durch ein Paar schmaler Schlitze auf einen Schirm fallen, beobachtet, was passiert, und stellt fest, dass sich Licht einerseits wie eine Welle, andererseits wie ein Teilchen verhalten kann, aber nicht beides gleichzeitig. Dieses große Paradoxon soll uns hier aber nicht interessieren, sondern vielmehr die Tatsache, dass bei der Erklärung des Experiments in Lehrbüchern üblicherweise sowohl klassische Lichtwellen als auch Lichtteilchen – Photonen – eine Rolle spielen. Gewöhnlich ka-

pitulieren die Autoren nämlich bei der Analyse des Experiments. Unweigerlich fangen sie an, über die Intensität des einfallenden Lichts zu schreiben, die ein Maß für die Stärke der elektrischen und magnetischen Felder ist. Dann – nach einem völlig unlogischen Gedankensprung – schreiben sie plötzlich über Photonen und tun so, als besäßen diese quantenmechanischen Objekte elektrische und magnetische Felder. Das ist aber nicht der Fall. Will man das berühmte Experiment tatsächlich akkurat beschreiben, ist ein so genannter kohärenter Zustand erforderlich. Näher als mit dieser raffinierten quantenmechanischen Konstruktion kann man der Beschreibung einer klassischen Lichtwelle nicht kommen.

Tatsächlich verzichten die Lehrbuchautoren sogar völlig auf eine Erklärung des Experiments. »Erklärung« bedeutet in der Physik im Allgemeinen, einen Mechanismus zu finden, der den beobachteten Vorgang kausal in Gang setzt. Zu einem solchen Mechanismus gehören Kräfte. Statt also zu beschreiben, wie das Licht mit den Spalten wechselwirkt, und damit zu erklären, warum es sich wie beobachtet verhält, sagen sie lediglich, dass die Lichtwelle an den Rändern der beiden Spalte bestimmte Bedingungen erfüllen muss, und lassen die dabei auftretenden Kräfte unter den Tisch fallen. Die Ergebnisse stimmen zwar gut mit den Beobachtungen überein. Doch das in diesem Zusammenhang am häufigsten benutzte Verfahren vermeidet nicht nur den Kern des Problems, sondern ist auch noch mathematisch inkonsistent. Ganz zu schweigen davon, dass sich hier ebenfalls in vollem Ausmaß das Messproblem stellt.

Solche Beispiele gibt es in der Physik zuhauf. Statt so zu tun, als ob es sie nicht gäbe, sollten Physiker daher ehrlich bleiben und es gegenüber ihren Studierenden zugeben, wenn sie mit ihren Erklärungen die Abgründe vermeiden. Noch gegen Ende des 20. Jahrhunderts galt Physik als empfangene Wahrheit – in ihr enthüllte Gott sein Antlitz. Einige Physiker mögen diese Vorstellung weiterhin bewahren. Ich selbst sehe die Physik lieber als eine Sammlung von theoretischen Modellen. Sie beschreiben die Landschaft, sind aber nie die Landschaft selbst. Endgültige Antworten liegen darum schlicht außerhalb unserer Reichweite. Sicher sind die Physiker bei der Beschreibung der Natur weiter vorangekommen als die Vertreter anderer Wissenschaften. Mit Verständnis sollten sie dies aber nicht verwechseln. ∞

DER AUTOR



Tony Rothman ist theoretischer Physiker an der Princeton University. Sein Forschungsinteresse gilt dem frühen Universum, der allgemeinen Relativitätstheorie und fundamentalen Fragen der Physik.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124688

Kunst in der Physik

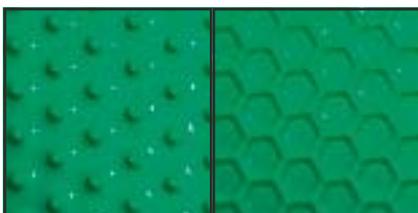
Es braucht nicht viel, damit eine glatte Flüssigkeitsoberfläche schöne Muster hervorbringt.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Ein stiller Bergsee zeigt es ganz anschaulich: Lässt man Flüssigkeiten in Ruhe, zeichnen sie sich durch ebene, spiegelnd glatte Oberflächen aus. Doch schon kleinste mechanische Einwirkungen – wie etwa Luft, die darüber streicht – können sie kräuseln oder Wellen entstehen lassen. Dabei kommt es keineswegs nur zu einem ungeordneten Durcheinander. Vielmehr kann man die Oberflächen zur Ausbildung erstaunlich vielfältiger Muster anregen.

Die einfachste Möglichkeit, dies systematisch und reproduzierbar zu tun, besteht darin, eine Flüssigkeit in Schwingung zu versetzen. Besorgen wir uns also eine ebene Platte, richten sie horizontal aus und überziehen sie mit einer Flüssigkeitsschicht. Dann bedarf es nur noch eines Lautsprechers, dessen Amplitude und Frequenz sich regeln lassen, und die Experimente können beginnen. Auf diese Weise sind die Oberflächenstrukturen auf den hier gezeigten Fotos entstanden.

Je nach Dichte, Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit, außerdem abhängig von Frequenz und Amplitude der Anregung, entstehen



Während der Aufwärtsbewegung von verdünnter Abtönfarbe bilden sich Wellenberge (links). In der Abwärtsbewegung stülpen sie sich um und zeigen hexagonale Strukturen (rechts).

dabei ganz unterschiedliche Muster. Startet man mit fester Tonhöhe (Frequenz) und kleiner Lautstärke (Amplitude), so bleibt die Flüssigkeitsoberfläche zunächst glatt und eben. Sie wird erst ab einem kritischen Wert der Amplitude instabil und bildet dann eine charakteristische Struktur aus. Diese kann aus einfachen Formen wie etwa Linien, Quadraten, Dreiecken, Sechsecken oder Spiralen bestehen, aber auch aus komplexen Mustern. Interessant ist dabei nicht nur, dass sich überhaupt derartige Strukturen bilden. Der Physiker staunt vor allem auch darüber, dass das System die Schwingungsenergie derart kreativ umsetzen kann. Schließlich wird sie ihm relativ unspezifisch in Form einer simplen Auf-und-ab-Bewegung zugeführt.

Wie bei einem bremsenden Bus

Hier also die Erklärung: Bewegt sich die schwingende Platte nach oben, beschleunigt sie die Flüssigkeit in dieselbe Richtung. Auf Grund ihrer Trägheit behält diese bei der anschließenden Abwärtsbewegung der Platte ihre Aufwärtsbewegung aber zunächst bei. Das kennt man vom Busfahren. Bremsst der Bus plötzlich, müssen stehende Fahrgäste einen Halt suchen, um sich nicht weiter in Fahrtrichtung zu bewegen.

Ein fester Körper würde das Auf und Ab mitmachen, ohne sich zu verformen. Hier ist das anders. Denn eine Flüssigkeitsschicht ist niemals ganz eben, sondern verfügt über dickere und dünnere Bereiche. Erstere steigen auf Grund ihrer größeren Masse und damit größeren Trägheit ein Stück höher als

die dünneren Bereiche – so verstärken sich die Unregelmäßigkeiten.

Hat die Platte anschließend den tiefsten Punkt durchlaufen und bewegt sich wieder nach oben, kommt ihr die Flüssigkeit umso heftiger entgegen, je dicker und damit träger die Flüssigkeitsschicht an der jeweiligen Stelle ist. Auf diese Weise stülpen sich die Erhöhungen in Vertiefungen um.

Die Muster werden dem System also nicht von außen aufgeprägt. Vielmehr wachsen sich die Unregelmäßigkeiten in einem Akt der Selbstorganisation zu ausgeprägten Wellenbergen und -tälern aus, die ständig wechselseitig ineinander übergehen. Kurz: Es bildet sich innerhalb weniger Schwingungsperioden ein System stehender Wellen.

Nun wechselt die ganze Flüssigkeitsschicht mit der halben Frequenz der anregenden Schwingung zwischen zwei komplementären Mustern. Je nachdem, wie viele verschiedene stehende Oberflächenwellen entstehen, kommt es dabei zu mehr oder weniger komplexen Überlagerungen. Sind zwei Wellen beispielsweise senkrecht zueinander orientiert, zeigen sich Muster mit quadratischer Symmetrie. Bei drei Wellen, zwischen denen ein Winkel von 60 Grad liegt, entstehen hexagonale Muster.

... dass trotz der Flüssigkeit in der Substanz eine Solidität in der Form erreicht wird.

Italo Calvino (1923–1985)



MEHR WISSEN
BEI **Spektrum.de**



Die hier gezeigten
Experimente als Video auf

www.spektrum.de/tanzendekleckse



ALLE FOTOS: LAURA KOCHHAMMER / INSTITUT FÜR DIDAKTIK DER PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNSTER

Versetzt man horizontale Flüssigkeitsschichten in Schwingung, nehmen sie je nach Beschaffenheit sowie Frequenz und Amplitude der anregenden Schwingung komplexe Muster an. Zu sehen sind (von links nach rechts) Muster in verdünnter Abtönfarbe, Kakaopaste, gefärbtem Kleister, Shampoo und nochmals in gefärbtem Kleister.

Die Flüssigkeiten bringen aber nicht nur reguläre Strukturen hervor. Steigert man die Amplitude des Lautsprechers weiter, erreicht man einen zweiten kritischen Punkt. Diesmal bildet sich kein einfaches, eindeutiges Muster mehr heraus, vielmehr wechselt das System von da an völlig unregelmäßig zwischen immer neuen Mustern. Sie verschwinden so schnell wieder, dass ihnen meist nicht einmal die Zeit bleibt, sich vollständig auszubilden. Man spricht von chaotischem Verhalten: Das System reagiert in diesem Bereich empfindlich auf kleinste Störungen und bringt das in einem ständigen irregulären Wechsel der Struktur zum Ausdruck.

Es lohnt sich, mit unterschiedlichen Flüssigkeiten zu experimentieren. Dann findet man unter anderem so genannte lokalisierte Zustände, die durch ihre Form wie ihre Dynamik faszinieren. Zum Beispiel können sich wurmartige

Gebilde wie belebt durch den Klecks hindurchwinden (oben rechts). Andere Flüssigkeiten tendieren zu spiral- oder sternförmigen Mustern (oben Mitte). Die Vielfalt der Formen lässt sich durch gezieltes Verdünnen oder veränderte Mischungen noch erhöhen.

Insbesondere wenn man die dynamischen Strukturen live erlebt, kann man sich ihrer ästhetischen Wirkung kaum entziehen. Auf der Grundlage solcher strukturbildender Prozesse konnten Künstler wie Hans Jenny (1904–1972) und Alexander Lauterwasser (* 1951) eindrucksvolle Phänomene hervorbringen. Einer der Ersten, der mit vibrierenden Flüssigkeiten experimentierte und sie physikalisch zu beschreiben versuchte, war indessen Michael Faraday (1791–1861). Damit war er seiner Zeit jedoch so weit voraus, dass seine Arbeiten in Vergessenheit gerieten. Erst in den letzten Jahrzehnten wurden sie wiederentdeckt und im Rahmen der nichtlinearen Physik weiterentwickelt.

Heute beschreibt man die schwingenden Flüssigkeitsschichten nach Ilya Prigogine (1917–2003), dem Träger des Chemienobelpreises 1977, als so genannte dissipative Strukturen (vergleiche SdW 12/2011, S. 40, über Kerzenflammen). Durch Dissipation von Energie, also Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärme, vermögen sie einen stationären Zustand fernab des thermodynamischen Gleichgewichts aufrechtzuerhalten und die dabei angenommenen Formen gegen äußere Störungen zu stabilisieren. Nichtlineare Prozesse spielen dabei eine wichtige Rolle.

Die charakteristischen Formen der Systeme, in unserem Fall die Flüssig-

keitsmuster, sind jedoch nur Ausdruck meist unsichtbarer zyklischer Bewegungen von Flüssigkeitsportionen. So wie die Bewegung zum Erliegen kommt, verschwindet die Form. In dieser Feststellung kann man ein sehr allgemeines Prinzip sehen, das noch über dissipative Systeme hinausgeht. Der Dichter Luigi Pirandello (1867–1936) hat es so umschrieben: »Das Sein muss sich in einer Form verfangen, eine Zeit lang in ihr erscheinen, hier oder dort, so oder so. Jedes Ding ist, solange es dauert, zu seiner Form verurteilt, dazu, so zu sein, wie es ist, nicht mehr anders sein zu können.« ∞



Bei diesem Experiment mit verdünnter Abtönfarbe überschritt die Amplitude der anregenden Schwingung einen bestimmten Wert. Dadurch gelangte das System in einen so genannten chaotischen Zustand. Darin wechseln sich ständig verschiedene Muster ab – so schnell, dass sie sich meist nicht vollständig ausprägen können.

DER AUTOR



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

QUELLEN

Faraday, M.: On Forms and States Assumed by Fluids in Contact with Vibrating Elastic Surfaces. In: Philosophical Transactions of the Royal Society 121, S. 319–340, 1831

Pirandello, L.: Mattia Pascal / Einer, keiner, hunderttausend. Coron, Zürich o. J., S. 332

LITERATURTIPP

Ucke, C., Schlichting, H.J.: Spiel, Physik und Spaß. Physik zum Mitdenken und Nachmachen. Wiley-VCH, Weinheim 2011
Zwei Experten für Physikspielzeug laden zum Mitmachen ein.

GEOMETRIE

Kollektive Verklemmung und das gehörnte Oktaeder

Untersuchungen von Materialforschern ergeben unversehens neue Raumfüllungen durch regelmäßige Körper.

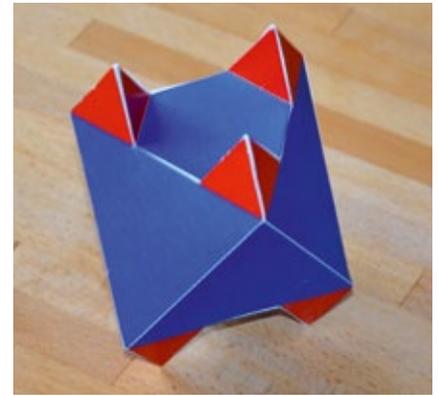
VON CHRISTOPH PÖPPE

Meine Kaffeevorratsdose fasst angeblich 250 Gramm. Aber wenn ich den Inhalt einer frisch eingekauften 250-Gramm-Vakuumpackung hineinschütte, ragt der Berg über den oberen Rand der Dose hinaus. Kein Problem: Ich stoße die Dose ein paar Mal auf die Tischplatte auf, und die Kaffeekörnchen bequemen sich zu einer etwas dichteren Lagerung, was das unmittelbare Problem löst. Aber so eng, wie der Hersteller sie in die Verpackung gepresst hat, sitzen sie nicht aufeinander. Den Behälter der Espressomaschine kann ich gehäuft füllen, ohne dass beim Einsetzen etwas überquillt. Und selbst dann ist zwischen den einzelnen Par-

tikeln noch reichlich Platz für den Dampf, der das Koffein und andere Köstlichkeiten aus ihnen herauslöst.

Man kann sicher noch weitaus mehr Kraft zum Zusammenpressen aufwenden als die Espressomaschine. Aber irgendwann muss doch Schluss sein. Schließlich ist Kaffeemehl ja nicht beliebig kompressibel wie ein Gas. Also gibt es eine dichteste Packung der Kaffeekörnchen, in der sie ohne nennenswerte Zwischenräume den verfügbaren Raum füllen. Oder?

Das ist keineswegs selbstverständlich. Kaffeemehl ist dabei sogar noch ein vergleichsweise gutartiges Material, weil seine Körnchen zwar nicht kom-



FOTOS: DIESEER/DOPPELSEITE; MIT FELD; GEN. VON: EPREIDE/WOHLGEMÜTH

pressibel, aber immerhin deformierbar sind. Aber bei »harten« Teilchen, sprich solchen, die sich weder verformen noch einander durchdringen können, stellt sich das Problem in seiner ganzen Schärfe. Diese finden nämlich im Allgemeinen nicht von selbst die platzsparendste Anordnung. Bevor es so weit kommt, verklemmen sich die einzelnen Partikel gegenseitig derart, dass keines von ihnen sich noch rühren kann, wenn die anderen sich nicht ebenfalls bewegen. Das geschieht vorzugsweise beim Schütten, wenn also die einzelnen Teilchen vollkommen zufällig und in rascher Folge in den Behälter prasseln. Und die Ursache ist nicht



etwa die Reibung oder eine sperrige Form: Im mathematischen Modell leiden unter der Verklebung auch Ensembles aus lauter gleich großen, unendlich glitschigen Kugeln.

Das ist bemerkenswert, denn gerade Kugeln sollte es im Prinzip nicht schwerfallen, sich in der dichtesten Packung zusammenzufinden. Eine erste Schicht verteilt sich auf dem Boden des Behälters in der bekannten Bienenwabenanordnung, in der jede Kugel sechs andere berührt. Je drei Kugeln, die alle miteinander in Kontakt sind, lassen zwischen sich einen Zwickel. In ihm findet bequem eine weitere Kugel Platz; sie und ihresgleichen bilden eine zweite Schicht, die genauso aussieht wie die erste und deswegen auch einer dritten Schicht Platz gibt, und so weiter.

Das ist die dichteste Kugelpackung, die – neben unzähligen namenlosen Obsthändlern und Kanonenkugelstaplern – schon Johannes Kepler (1571–1630) kannte. Seine Vermutung, es gebe keine dichtere Packung, blieb mehr als drei Jahrhunderte unbewiesen. Der mittlerweile vorliegende Beweis erregte erhebliches Aufsehen, weil wegen seiner Kompliziertheit niemand bereit ist,

sich einen kompletten Überblick darüber zu verschaffen – nicht einmal sein Autor Thomas Hales (Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 13). Immerhin wissen wir damit etwas sicherer, dass die Packungsdichte – der von den Körpern eingenommene Anteil am Gesamtvolumen – bei einer Packung gleicher Kugeln den Wert $\pi/\sqrt{18} \approx 74,048$ Prozent nicht übersteigen kann.

Aber zu dieser schönen Regelmäßigkeit finden selbst die symmetrischesten aller räumlichen Gebilde nur, wenn sie ausreichend Zeit haben. Wenn es schnell geht, bleiben Löcher. Theoretisch dürfen der keplerschen Kugelpackung sogar beliebig viele Kugeln entlang einer geraden Linie fehlen, ohne dass dieser »Tunnel« einstürzt.

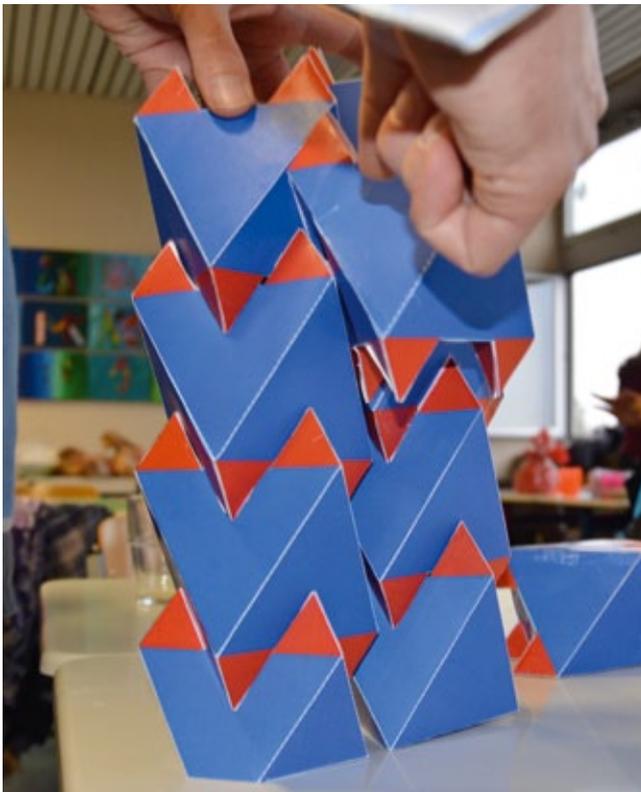
Atome als Schüttgut: Kristalle und Gläser

Mit solchen Fragen befasst sich eine ganze Forschungsgruppe an der Princeton University, und zwar bezeichnenderweise im Fachbereich Chemie. Denn mehr als für Kaffee, Kies und andere Streugüter interessieren sich die Wissenschaftler für Atome. Wenn die aus der flüssigen oder der Gasphase zu ei-

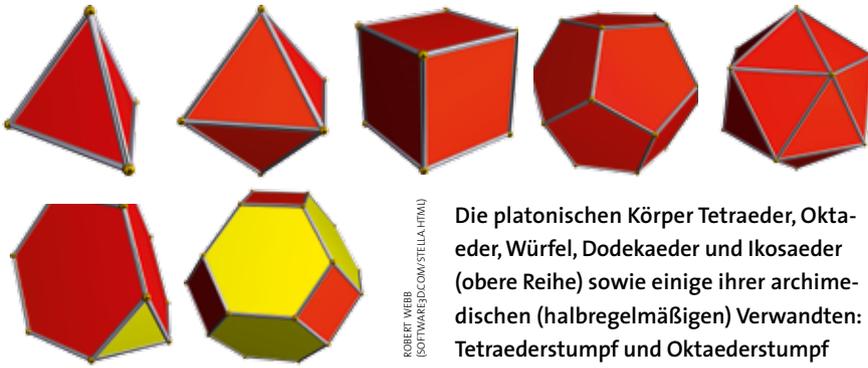
nem Festkörper kondensieren, ist das so ähnlich, wie wenn Kugeln in einen Behälter fallen. Wenn sie Zeit haben, sortieren sie sich zu den regelmäßigen Anordnungen, die als Kristallstrukturen bekannt sind. Bei schockartiger Abkühlung jedoch wird die Packung weniger dicht und viel unordentlicher – Materialforscher nennen das ein Glas. Die Gravitation spielt bei solchen Prozessen keine nennenswerte Rolle, und die Reibung schon gar nicht; stattdessen kommen chemische Bindungen zwischen den Atomen ins Spiel. Einerlei, welcher Art die Kräfte sind: Die Kühlung wirkt so rasch, dass den Atomen sehr bald die nötige Bewegungsenergie fehlt, um ihre Nachbarn beiseitezudrücken. Nur wenig später ist die Packung »kollektiv verklemt« (collectively jammed): Sie würde sich selbst dann nicht rühren, wenn man mehrere Atome zugleich bewegen könnte.

Auf den ersten Blick ist ein solches Material ein Fall für die statistische Physik. Einen einzelnen Zustand präzise beschreiben zu wollen, ist nicht nur praktisch unmöglich, sondern auch sinnlos: Schon das nächste Stück Glas sieht im Kleinen völlig anders aus. Interessant sind nur Mittelwerte über große Ensembles von Zuständen, und zwar über die unordentlichsten; denn die sind die wahrscheinlichsten. Also suchten die Forscher nach Zuständen maximaler Entropie – und kamen in diesem speziellen Fall nicht weit. Der Versuch, ein Zustandsensemble namens »zufällige geschlossene Packung« (random closed packing, RCP) theoretisch sauber zu definieren, scheint gescheitert. Zu allem Überfluss nehmen die echten Gläser je nach den Einzelheiten des Herstellungsprozesses deutlich verschiedene Dichten an.

Angesichts dieser Situation entschieden sich Salvatore Torquato, der Chef der erwähnten Arbeitsgruppe aus Princeton, und sein Kollege Yang Jiao, das Problem von einer anderen Seite aus anzugehen: An Stelle von Mittelwerten großer Ensembles aus gleichen Teilchen studieren sie deren mögliche Anordnungen in der unmittelbaren Nachbarschaft eines einzelnen Parti-



In Salvatore Torquatos Raumfüllung kommen auf jedes Oktaeder sechs Tetraeder mit einem Drittel der Kantenlänge, was zusammen ein gehörntes Oktaeder ergibt (links oben). Die Klasse 7a des Mannheimer Moll-Gymnasiums hat einen ganzen Turm gehörnter Oktaeder hergestellt (links unten). Mehrere solcher Türme, in der Höhe gegeneinander versetzt, ergeben die Raumfüllung (rechts).



ROBERT WEBER
(SOFTWARE.COM/STELLA/HTM)

Die platonischen Körper Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Dodekaeder und Iksaeder (obere Reihe) sowie einige ihrer archimedischen (halbregelmäßigen) Verwandten: Tetraederstumpf und Oktaederstumpf

kels. Was dabei zu finden ist, muss in seinen Auswirkungen nicht auf einen derart mikroskopischen Bereich beschränkt bleiben. Interessant sind lokale Anordnungen, an die man Kopien ihrer selbst ansetzen kann, an die Kopie wieder eine Kopie und so weiter. So ergibt sich aus lauter Exemplaren einer gewissen Grundstruktur ein periodisches Muster. Wenn es sich in drei voneinander unabhängigen Raumrichtungen wiederholt, ist es ein Kristall – oder eben ein ausgedünnter Kristall, wenn die Packung Löcher oder gar Tunnel hat. Die ist zwar überaus ordentlich, aber vielleicht kann man von ihr etwas über ihre unordentlichen Artgenossen lernen.

In den letzten Jahren hat Torquato seine Untersuchungen von runden auf eckige »Atome« erweitert. Das ist nicht so albern, wie es zunächst klingt; denn so rund, wie man sie sich normalerweise vorstellt, sind Atome gar nicht. So legen die vier Elektronen in der äußersten Hülle eines Kohlenstoffatoms den größten Wert auf Distanz voneinander.

Aus diesem Grund halten sie sich am liebsten an den Ecken eines Tetraeders auf; das ist der Körper, der von vier gleichseitigen Dreiecken begrenzt wird. In der Tat darf man sich die Kohlenstoffatome in einem Diamantkristall als Tetraeder mit leicht abgestumpften Spitzen vorstellen (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 36).

Damit landete Torquato unversehens bei der Frage, wie man lauter gleiche eckige Körper möglichst dicht in den Raum packen kann. Und weil man immer am besten mit dem einfachsten Fall anfängt, konzentrierte er seine Untersuchung auf die fünf regelmäßigs-ten: die platonischen Körper Tetraeder, Oktaeder, Würfel, Dodekaeder und Iksaeder (Bilderreihe ganz oben).

Beim Würfel ist das Problem schnell erledigt: Klotz an Klotz zu stapeln ist keine Kunst. Man kann sogar ganze Ebenen einer Würfelpackung gegeneinander verschieben, ohne die perfekte Raumfüllung von 100 Prozent zu beeinträchtigen.

Allgemein nutzen Polyeder, also von ebenen Flächen begrenzte Körper, den verfügbaren Raum besser aus als Kugeln. Zwischen bündig aufeinandergelegten Grenzflächen bleibt eben überhaupt keine Luft, während krummflächig begrenzte Körper unvermeidlich gewisse Zwickel zwischen sich lassen.

Alle anderen platonischen Körper sind keine Raumfüller. Gleichwohl kann man versuchen, auf sie das Rezept anzuwenden, das beim Würfel so erfolgreich war. Das heißt: Man definiert drei Verschiebungsvektoren und füllt den Raum mit lauter Exemplaren des Körpers, die gegeneinander mit diesen

Vektoren parallelverschoben sind. Anders ausgedrückt, man konstruiert einen Kristall, dessen Fundamentalzelle nichts weiter enthält als ein Exemplar des Polyeders selbst. Unter allen denkbaren Tripeln von Verschiebungsvektoren sucht man dann dasjenige, das die größte Packungsdichte erzeugt.

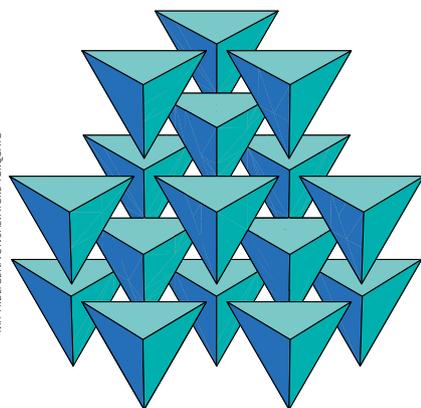
Das wäre ein Maximierungsproblem für eine Funktion (die Packungsdichte) von neun reellen Variablen (den Koordinaten der drei Verschiebungsvektoren) und damit eine Standard-Übungsaufgabe in numerischer Mathematik – wenn nicht die Nebenbedingung hinzukäme, dass die verschobenen Exemplare des Körpers einander nicht durchdringen dürfen. Wegen der eckigen Gestalt der Polyeder ist diese Bedingung nicht nur mühsam zu formulieren; sie erschwert auch das Problem so, dass Torquato und seine Kollegen eigens dafür einen Algorithmus entwickeln mussten.

Optimale Tetrapacks

Für das Tetraeder ist das Ergebnis der Optimierung enttäuschend. Der dichteste Kristall aus parallelverschobenen Tetraedern kommt auf eine Packungsdichte von mickrigen $18/49 \approx 36,73$ Prozent. Ein Blick auf das Ergebnis (Bild links unten) lässt den Grund erahnen: Als einziger platonischer Körper verfügt das Tetraeder nicht über Paare paralleler Flächen. Deswegen können Flächen zweier benachbarter Körper nie bündig aneinanderliegen, nicht einmal teilweise. Vielmehr piekst an jede Fläche eines Tetraeders eine Ecke vom Nachbarn, und dazwischen bleibt jede Menge Luft.

Die naheliegende Abhilfe besteht darin, zwei Tetraeder Fläche an Fläche aneinandersetzen. Das so entstehende »Dimer«, ein von sechs gleichseitigen Dreiecken begrenzter, aber nicht platonischer Körper (nicht alle Ecken sind gleich), hat zwar immer noch keine parallelen Grenzflächen, ist aber immerhin punktsymmetrisch, was erfahrungsgemäß günstig für eine dichte Packung ist.

Das Verfahren lässt sich verallgemeinern. Fünf Tetraeder passen an eine gemeinsame Kante. Fast bilden sie zusammen eine fünfseitige Doppelpyra-



MIT FROL GEN VON SALVATORE TORQUATO

Das optimale Gitter aus parallelverschobenen regulären Tetraedern

mid; zur geschlossenen Figur fehlt nur noch ein sehr schmaler Keil (Bild rechts, linke Seite). Da kann man getrost eine Packung mit solchen Doppelpyramiden suchen und jede von ihnen hinterher durch fünf Tetraeder ersetzen. Dabei verliert man zwar das Keilvolumen, und die einzelnen Tetraeder klappern ein bisschen; aber es ergeben sich auf diese Weise schon sehr dichte Packungen. In manchen so errechneten Fundamentalzellen sind zahlreiche »Wagenräder« – so Torquatos fantasievolle Bezeichnung für die Doppelpyramiden – auf die abenteuerlichste Weise zusammengestopft (Bild unten).

Ein anderes Beispiel: 20 Tetraeder, die einen Eckpunkt gemeinsam haben, fügen sich fast zu einem Ikosaeder zusammen (Bild rechts, rechte Seite). Wieder ergibt sich daraus ein Rezept zur Erzeugung dichter, wenn auch klappriger Packungen.

In den letzten fünf Jahren gab es einen regelrechten Wettlauf um die dichteste Tetraederpackung. Ein Rekord jagte den anderen, vor allem weil sich ein Kollege vom mathematischen Fachbereich der Princeton University maßgeblich an dem Rennen beteiligte: John Horton Conway, dem die Unterhaltungsmathematik eine Fülle von Ideen verdankt, allen voran den zellulären Automaten namens »Game of Life«. Derzeitiger Rekordhalter ist eine Fundamentalzelle aus zwei Dimeren mit einer stolzen Packungsdichte von $4000/4671 \approx 85,63$ Prozent.

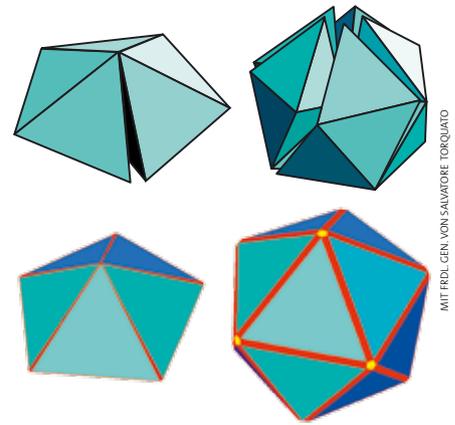
Für die restlichen platonischen Körper verläuft die Suche weniger dramatisch. Allem Anschein muss man hier für die optimale Packung nicht vom einfachsten Weg – die Fundamentalzelle enthält nur einen Körper – abgehen.

Eine Überraschung gibt es trotzdem, und zwar beim Oktaeder. Übli-

cherweise findet man diesen Körper aus acht gleichseitigen Dreiecken – vier um jede Ecke – auf der Spitze stehend dargestellt, so als ob die Pyramiden von Giseh einen ebenfalls pyramidenförmigen Unterbau hätten, dessen Spitze tief in die Erde hineinragt. So kommen seine Symmetrieeigenschaften am schönsten zur Geltung, und der Querschnitt des Körpers auf Bodenniveau ist ein Quadrat. Da kann man in Gedanken derartige Doppelpyramiden Kante an Kante aneinandersetzen, so dass ihre Querschnitte die Ebene füllen wie die üblichen Badezimmerkacheln. Nur gibt das keine besonders gute Raumfüllung. In die Lücken zwischen den Oktaedern passen nicht etwa Oktaeder, sondern Tetraeder mit gleicher Kantenlänge. Das gibt eine bekannte Raumfüllung mit zweierlei verschiedenen platonischen Körpern. Die Stangenkonstruktionen an den Decken mancher Messehallen und Flughafenempfangsgebäude folgen diesem Muster.

Oktaedertürme mit Variationen

Wenn die möglichst dichte Packung aber nur Oktaeder enthalten soll, legt man den Achtlächner besser mit einem seiner Dreiecke auf den Boden. Die dazu parallele Deckfläche ist gegenüber der Bodenfläche um 60 Grad verdreht. Setzt man noch ein Oktaeder verdreht darauf, so dass die Flächen genau aufeinander zu liegen kommen, entsteht ein Dimer, dessen Boden- und Deckfläche durch schlichte Parallelverschiebung auseinander hervorgehen. Durch periodische Fortsetzung in dieser Richtung wird daraus ein massiver Turm mit abwechselnd auswärts- und einwärtsgekippten, dreieckigen Wänden. Jetzt müsste man nur noch lauter derartige Türme, geeignet in der Höhe verschoben, nebeneinanderstellen ...

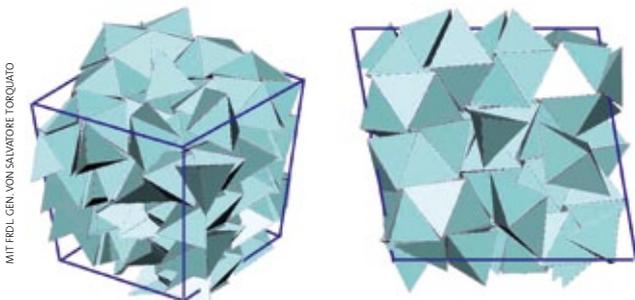


MIT FREIL. GEN. VON SALVATORE TORQUATO

Fünf Tetraeder um eine gemeinsame Kante herum ergeben fast eine fünfseitige Doppelpyramide (links oben), 20 mit einer gemeinsamen Ecke fast ein Ikosaeder (rechts oben). Das ganze Ensemble wirkt ansehnlicher, wenn der Winkelfehler gleichmäßig verteilt wird (untere Bilder).

Es stellt sich heraus: Das Ergebnis ist nicht optimal. Besser funktioniert, was auf den ersten Blick viel ungeschickter aussieht, nämlich Oktaeder einfach parallelverschoben aufeinanderzustapeln. Dann liegt die Bodenfläche des oberen Oktaeders zwar platt auf der Deckfläche des unteren, aber verdreht. Die gemeinsame Fläche ist ein regelmäßiges Sechseck, und von jeder Fläche liegen drei kleine Dreiecke mit einem Drittel der Kantenlänge an der Luft.

Das bleibt auch in der fertigen Packung so. Aber das gesamte Luftvolumen hält sich in engen Grenzen. Ein Oktaederturm hat zwar auf jedem Stockwerk merkwürdige erkerartige Vorsprünge; aber die ebenso stachligen Nachbartürme schmiegen sich so eng an den ersten Turm an, dass die Hohlräume klein bleiben. Die an der Luft liegenden kleinen Dreiecke fügen sich zu Tetraedern zusammen. Die so definierte Packung mit Oktaedern kommt auf



MIT FREIL. GEN. VON SALVATORE TORQUATO

Noch vor zwei Jahren bestand die dichteste bekannte Tetraederpackung aus ziemlich wild platzierten derangierten »Wagenrädern«. Ihre Fundamentalzelle mit 314 Tetraedern (links von der Seite, rechts von oben gesehen) kommt auf eine Packungsdichte von 82,26 Prozent.

die Dichte von $18/19 \approx 94,737$ Prozent (Bilder S. 68/69).

Quasi nebenbei haben Conway, Jiao und Torquato eine neue Raumfüllung mit zweierlei platonischen Körpern entdeckt. Auf jedes Oktaeder kommen sechs Tetraeder mit einem Drittel der Kantenlänge. Die kann man zum Beispiel an die Ecken von Boden- und Deckfläche des Oktaeders setzen. Das so entstandene gehörnte Oktaeder ist ein Raumfüller.

Obendrein gibt es einen stetigen Übergang von der altbekannten Raumfüllung mit Oktaedern und Tetraedern gleicher Kantenlänge zur neuen. Man kann die Oktaeder der konventionellen Füllung auf eine sehr spezielle Weise gegeneinander verschieben. Dabei schrumpfen die bereits vorhandenen Tetraeder, und neue Löcher tun sich auf. In ihnen wachsen kleine Tetraeder

heran. Am Ende erreichen die schrumpfenden und die wachsenden Tetraeder die gemeinsame Kantenlänge von einem Drittel der Oktaederkantenlänge.

Diese Zerlegung des Raums hätten schon die Griechen der Antike finden können; mehr als die klassische Geometrie des Raums braucht man nicht dafür. Merkwürdig, dass weder sie noch die Generationen nachfolgender Mathematiker darauf gekommen sind, bis ihnen jüngst die Materialforscher den Anstoß gaben. Und selbst die haben ein bisschen lang für ihre Entdeckung gebraucht, meinen Torquato und Kollegen, weil sie zu sehr auf ihre Kugeln fixiert waren.

Inzwischen sind sie von den platonischen zu den etwas weniger regelmäßigen archimedischen Körpern übergegangen. Diese sind zwar immer noch von regelmäßigen Vielecken begrenzt, aber die dürfen voneinander verschieden sein, solange um jede Ecke herum dieselben Flächen in derselben Reihenfolge liegen.

Raumwunder Tetraederstumpf

Unter den insgesamt 13 archimedischen Körpern gibt es wieder einen, bei dem man nach der dichtesten Packung nicht lange suchen muss: Der Oktaederstumpf aus acht Sechsecken und sechs Quadraten ist ein bekannter Raumfüller. Sein schwierigster Kollege scheint dagegen der Tetraederstumpf aus vier Sechsecken und vier Dreiecken zu sein. Er entsteht, indem man dem Tetraeder seine vier Ecken abschneidet, und zwar so, dass zusätzlich zur Ecke ein Drittel jeder dort endenden Kante dem Messer zum Opfer fällt. Von den ursprünglichen Dreiecken des Tetraeders bleiben Sechsecke übrig, die Schnittflächen selbst sind Dreiecke, und punktsymmetrisch ist der Stumpf ebenso wenig wie das intakte Tetraeder (Bild S. 70 oben, untere Reihe).

Umso überraschender ist es, dass man mit diesem sperrigen Körper eine fast perfekte Packung erzielen kann. Setzt man zwei Tetraederstümpfe mit Sechsecksflächen derart aufeinander, dass ein Dreieck des einen Körpers an ein Sechseck des anderen angrenzt,

dann liegen diese beide Flächen in einer Ebene. So entsteht ein Rhomboeder (ein Würfel mit zu Rhomben verzerrten Flächen), dem die beiden spitzen Ecken samt einem Drittel der angrenzenden Kanten abgeschnitten sind. Diese abgestumpften Rhomboeder schmiegen sich so glatt aneinander, dass abermals nur tetraederförmige Löcher mit einem Drittel der Kantenlänge übrig bleiben. Insgesamt erreicht die Packungsdichte den traumhaften Wert von 99,5 Prozent (Bild links). \approx



Der gehörnte doppelte Tetraederstumpf: Zwei Tetraederstümpfe (grün und blau) sitzen mit Sechseckflächen bündig aufeinander. Türme aus solchen Dimeren passen so gut aneinander, dass nur sehr kleine tetraederförmige Löcher bleiben. In dem abgebildeten Modell sind diese wie beim gehörnten Oktaeder dem eigentlichen Körper aufgesetzt. Sie nehmen zusammen nur ein halbes Prozent vom Gesamtvolumen ein.

DER AUTOR



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

QUELLEN

- Conway, J. H., Torquato, S.:** Packing, Tiling and Covering with Tetrahedra. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 103, S. 10612–10617, 2006
- Conway, J. H. et al.:** A New Family of Tilings of Three-Dimensional Euclidean Space by Tetrahedra and Octahedra. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 108, S. 11009–11012, 2011
- Jiao, Y., Torquato, S.:** A Packing of Truncated Tetrahedra that Nearly Fills All of Space. September 2011. <http://arxiv.org/abs/1107.2300>
- Torquato, S., Jiao, Y.:** Dense Packings of the Platonic and Archimedean Solids. In: Nature 460, S. 876–879, 2009
- Torquato, S., Stillinger, F. H.:** Jammed Hard-Particle Packings: From Kepler to Bernal and Beyond. In: Reviews of Modern Physics 82, S. 2633–2672, 2010

WEBLINKS

- <http://cherrypit.princeton.edu/papers.html>
Große Literaturliste von Torquatos Gruppe; darin auch Links zu den oben genannten und weiteren Arbeiten
- www.spektrum.de/page/fe_seiten?article_id=587205
Christoph Pöppe zur Raumfüllung aus Tetraedern und Oktaedern
- Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135752
Dort finden Sie auch Bastelvorlagen für gehörnte Oktaeder und deren abgeschnittene Bodenstücke zur Herstellung lückenloser Raumfüllungen.

Anzeige



SERIE ENERGIE | TEIL 3

Die unerschöpfliche Kraft des Wassers

Die Wasserkraft ist weltweit der größte erneuerbare Stromerzeuger. Dabei nutzen wir bislang erst ein Viertel des Potenzials. Neben konventionellen Wasserkraftwerken, etwa Pumpspeichieranlagen, wird zunehmend ein riesiges, noch unerschlossenes Reservoir attraktiv: die Energie der Weltmeere.

Von Robert Gast

ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher I: Batterien	April 2012
Teil 6	Energiespeicher II: Wasserstoff	Mai 2012

BEIDE FOTOS: PELAMIS WAVE POWER LTD.



»Pelamis« heißt diese 180 Meter lange Pilotanlage aus Metall. Vor Portugals Atlantikküste erzeugen Kolbenpumpen in den Gelenken Energie.

Die Geschichte der Meeresenergie beginnt mit einer Plastikente. Sie sollte auf dem Atlantik schwimmen, im Auf und Ab der Wellen wippen und die Bewegung in Strom umwandeln. Stephen Salter hatte das Konzept 1974 als Reaktion auf die Ölkrise entworfen. Entlang der Küstenlinie aufgereiht, sollten Dutzende der Geräte die Stromversorgung der Zukunft sichern. »Einige hundert Kilometer könnten den Energiebedarf Großbritanniens decken«, schrieb der schottische Ingenieur seinerzeit im Wissenschaftsmagazin »Nature«. Es war ein kühnes Vorhaben zu Beginn des Zeitalters der erneuerbaren Energien. Aber Salters Ente blieb eine Vision. 1983 war die Ölkrise überwunden, und das britische Abgeordnetenhaus entzog dem Projekt die Gelder.

In den folgenden Jahrzehnten verschwand die Idee, Ozeane zur Stromerzeugung zu nutzen, aus der öffentlichen Wahrnehmung. Daher stammt der Beitrag des Wassers zur Energieversorgung heute ausschließlich aus Flüssen und Stauseen. Wasserkraftwerke decken etwa 16 Prozent des weltweiten Strombedarfs, was mit Abstand der größte Beitrag regenerativer Energiequellen zur Elektrizitätserzeugung ist. Die meisten Wasserkraftwerke stehen in China, Brasilien, den USA, Kanada und Russland. Und manche Nation vertraut fast vollständig auf die Kraft des Wassers: Norwegen bezieht seinen kompletten Strom daraus, die Schweiz und Österreich immerhin mehr als die Hälfte. In Deutschland stammen gerade einmal 3,4 Prozent der Elektrizität aus Wasserkraft.

Kraftwerke gibt es in verschiedensten Größen. An Talsperren oder Staudämmen nutzen sie die potenzielle Energie von Wasser, das viele Meter fällt und dabei gewaltige Turbinen antreibt. In Flüssen arbeiten oft kleinere Laufwasserkraftwerke, die den Flusslauf stauen, um eine Fallhöhe von wenigen Metern zu erzeugen. Für schmalere Flüsse eignen sich unter anderem so genannte Wirbelwasserkraftwerke, bei denen Wasser über eine Rampe abgezweigt wird und beim Rückfluss einen speziell geformten Wirbelrotor antreibt.

Unter den erneuerbaren Energiequellen ist Wasserkraft die effizienteste: Über 90 Prozent der von Turbinen aufgenommenen Bewegungsenergie des Wassers lassen sich mittels Generatoren in Strom umwandeln. Der Weltklimarat der Vereinten Nationen IPCC schätzt in einer im Mai 2011 erschienenen Studie (»Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation«), dass sich die derzeit durch diese Energiequelle erzeugte Strommenge theoretisch vervierfachen ließe. Das Potenzial steckt zum einen in den 45 000 größeren Dämmen, die rund um die Welt Flussläufe stauen. Lediglich ein Viertel von ihnen wird momentan zur Stromproduktion genutzt, der Rest dient anderen Zwecken: der Flutkontrolle, der Landwirtschaft oder der Wasserversorgung. Die meisten von ihnen könnten laut der Einschätzung des Weltenergierats zu Wasserkraftwerken erweitert werden. Vor allem in Afrika, Lateinamerika und Asien gibt es darüber hinaus noch etliche Landstriche, die sich für Dammprojekte eignen, wo es bisher jedoch an Investoren fehlt.

STÜRMISCHE ZEITEN

1 Die Wasserkraft ist mit Abstand die am weitesten ausgebaute **erneuerbare Energieform**, sie deckt aktuell 16 Prozent des weltweiten Elektrizitätsbedarfs. Vor allem in Teilen Asiens und Afrikas kann sie noch massiv ausgebaut werden.

2 Ein völlig unerschlossenes Reservoir an Wasserkraft bieten die Weltmeere. Sowohl **Wellen-** als auch **Gezeitenkraftwerke** könnten über zehn Prozent des weltweiten Strombedarfs decken.

3 Die dafür nötigen Technologien stecken noch in den Kinderschuhen, auch wenn seit einigen Jahren Dutzende **Prototypen** erprobt werden. Welche von ihnen sich durchsetzen werden, muss sich zeigen.

Allerdings greifen derartige Großprojekte in der Regel erheblich in bestehende Ökosysteme ein, außerdem müssen oft tausende Menschen umgesiedelt werden. Und so CO₂-neutral, wie man einst dachte, sind sie auch nicht: Stauseen setzen unter anderem erhebliche Mengen Methan frei, da Bakterien organisches Material auf dem Meeresgrund vergären und das Treibhausgas anschließend nach oben steigt. Auch beim Sturz des Wassers durch die Turbinen gelangt Methan in die Atmosphäre. Allerdings ist umstritten, wie viel klimaschädliche Gase tatsächlich aus Stauseen stammen. Jüngst legten Forscher in einer in »Nature Geoscience« erschienenen Studie nahe, dass ihr Beitrag kleiner ist als bisher angenommen. Von dem Effekt betroffen seien vor allem Seen in tropischen Gefilden nahe dem Äquator.

Die kühleren Stauseen Europas sind von dieser Diskussion aber auch deswegen kaum berührt, weil hier so gut wie alle Standorte für Talsperren bereits erschlossen sind. Ein Ausbau auf dem europäischen Kontinent ist daher hauptsächlich noch durch die Aufrüstung und Erneuerung bestehender Anlagen möglich. Laut Angaben der Europäischen Kommission beläuft sich das Potenzial auf 54 Milliarden Ki-

lowattstunden pro Jahr, der Großteil davon schlummert in Osteuropa. Zum Vergleich: Jährlich verbraucht Deutschland rund 600 Milliarden Kilowattstunden Strom. Hier zu Lande könnte eine Erneuerung bestehender Klein- und Großanlagen immerhin 3,5 Milliarden Kilowattstunden pro Jahr bringen, schätzte das Bundesumweltministerium (BMU) in einer 2010 veröffentlichten Studie – genug Strom für über 200 000 Haushalte. Zubauten sind in vielen der 7500 Kleinwasserkraftwerke mit einer Kapazität von unter einem Megawatt möglich, aber auch in manchen der 354 größeren Anlagen an Talsperren. Die Bundesregierung hat in den letzten Jahren vor allem Anreize für den Ausbau kleiner Wasserkraftanlagen geschaffen: 2009 hob sie die Einspeisepauschale für solche Installationen auf bis zu 12,67 Cent pro Kilowattstunde an.

Bei der Erneuerung spielt die Verbesserung der Technik eine wesentliche Rolle. Mittels Computersimulationen optimierte Turbinen zeigen einen bis zu fünf Prozent höheren Wirkungsgrad als ältere Exemplare bei Betriebsbeginn. Gegenüber 60 Jahre alten Turbinen, die in vielen Wasserkraftwerken aus den 1950er Jahren heute noch laufen, ergibt sich sogar ein Effizienzzuwachs von bis zu elf Prozentpunkten. Aber bei der Technologieentwicklung geht es nicht nur um maximale Leistung. So werden Turbinen entwickelt, die hier einige Prozent weniger erbringen, dafür aber den Großteil der Fische überleben lassen, die durch die Anlage schwimmen. Auch das ist inzwischen ein ökonomisches Kriterium: In Deutschland dürfen seit einer Gesetzesnovelle aus dem vergangenen Jahr nur noch Wasserkraftanlagen gebaut werden, die geeignete Maßnahmen zum Schutz der Flussbewohner treffen und stets einen Mindestwasserstand gewährleisten.

Erneuerungen wird es vor allem im Voralpenland geben. In Bayern, das mit über 4000 Anlagen mit Abstand die meisten aufweist, will die Landesregierung den Ertrag des Wassers bis 2021 um 15 Prozent steigern, womit Wasserkraft fast ein Fünftel des Strombedarfs decken würde. Aber auch zu DDR-

Beim »Wave Dragon«, hier ein Prototyp vor der dänischen Westküste, schwappt Wasser über die rote Rampe in ein Becken und erzeugt im Rückfluss über eine Turbine Elektrizität.

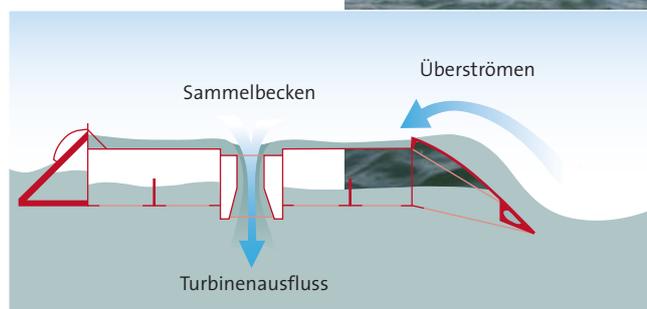


FOTO: WAVE DRAGON/ARIS; GRAFIK: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BLS/SE-GRATIK, NACH: WAVE DRAGON



Dieser Unterwasserrotor steht vor Südkoreas Südküste. Gebaut wird er von der Firma Voith Hydro in Heidenheim (kleines Bild).



Zeiten stillgelegte Flusskraftwerke in Ostdeutschland könnten saniert werden.

Auf Bundesebene soll dagegen vor allem der Wind die Energiewende vorantreiben. Im Konzept vom Juni 2011, das den Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2050 skizziert, taucht Wasserkraft nur an einer Stelle auf: Mittelfristig sollen alle deutschen Standorte für Pumpspeicherkraftwerke erschlossen werden (siehe dazu auch den Artikel ab S. 84). Sie werden gebraucht, um in Zukunft überschüssigen Strom aus Solar- und Windenergie zu speichern. 34 solche Speicherkraftwerke gibt es derzeit in Deutschland. Sie können 40 Millionen Kilowattstunden speichern. Ihr zusätzliches Ausbaupotenzial ist eher gering, schätzte der von der Bundesregierung eingesetzte Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU 2010. Denn es gibt nur noch wenige geeignete Flächen, und diese müssen oft unter erheblichen Eingriffen in die Natur erschlossen werden. In der Bevölkerung schürt das massive Proteste – etwa in Atdorf im Schwarzwald, wo bis Ende des Jahrzehnts das größte Pumpspeicherkraftwerk der Republik entstehen soll. Umfangreiche Möglichkeiten für zusätzliche Anlagen sieht der Sachverständigenrat dagegen in Skandinavien: Etwa 120 Milliarden Kilowattstunden ließen sich in norwegischen und schwedischen Bergseen speichern, wenn sie mit Pumpen und Steigleitungen zu Wasserspeichern ausgebaut werden. In den Bergseen Österreichs und der Schweiz schlummert zusätzlich noch einmal ein Viertel der Kapazität der skandinavischen Länder.

Nationen ohne Gebirge können Wasserkraft dagegen bislang so gut wie nicht nutzen. Doch vielleicht ändert sich das bald, denn Salters Ente ist wieder im Gespräch – oder zumindest ihre Nachkommen. Vor den Küsten Europas versuchen derzeit über 100 Projekte, Strom aus dem Meer zu gewinnen. Vor allem die Strömungen der Gezeiten und das Auf und Ab

der Wellen sollen Quellen fast unerschöpflicher Energie werden – so die Vision der Ingenieure.

Die Wellen der Weltmeere tragen pro Meter Küstenlinie Dutzende Kilowatt in sich. Zum Vergleich: Die Sonneneinstrahlung auf einen Quadratmeter Boden erbringt an einem wolkenlosen Tag eine Leistung von gerade einmal einem Kilowatt. Allerdings stammt auch die Energie der Wellen eigentlich von der Sonne. Diese heizt die Atmosphäre an verschiedenen Stellen unterschiedlich stark auf, was Winde hervorruft, die die Oberfläche des Ozeans aufrauen. Es entstehen hunderte Meter lange Meeresdünen, die in tiefen Gewässern praktisch keine Energie verlieren. Dadurch können sie ungestört weiterlaufen, bis sie eine Küstenlinie treffen – auch wenn der Wind längst aufgehört hat zu wehen. Besonders mächtige Wellen finden sich zwischen dem 30. und 60. Breitengrad. Zwar eignet sich nur ein Teil dieses Reservoirs zur Stromerzeugung, da sich Wellenkraftwerke nur in Küstenregionen mit ausreichendem Wellengang betreiben lassen und nur ein Teil der Wellenenergie in Strom umgewandelt werden kann. Aber selbst mit diesen Einschränkungen kommen Schätzungen auf ein technisch nutzbares Potenzial, das zehn Prozent des weltweiten Strombedarfs entspricht.

Es war die Vision, dieses Reservoir anzuzapfen, die Frank Neumann Anfang des Jahrtausends nach Portugal brachte. »Das war damals das Mekka der Meeresenergien«, sagt der deutsche Ingenieur. 2003 trat er eine Stelle am Wave Energy Centre (WavEC) in Lissabon an, das als Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Industrie »alles dafür tun soll, damit die Wellenenergie so bald wie möglich Realität wird«. Der Ausbau der Meeresenergie sei jedoch Jahrzehnte hinter Fotovoltaik und Biomasse zurück, meint Neumann. »Hier wird noch die technische Machbarkeit überprüft.«

Schwingende Wassersäule treibt Turbine mit Luftstrom

Was das bedeutet, hat Frank Neumann hautnah miterlebt. Vor sechs Jahren übernahm das WavEC eines der ersten Wellenkraftwerke – und Neumann war dafür verantwortlich, die Anlage zum Laufen zu bringen. Im Fall von »Pico« war das ein Knochenjob. Auf dem Azorenarchipel mit dem 2351 Meter hohen Vulkan diesen Namens hatte eine Gruppe der Technischen Universität aus Lissabon bereits 1995 mit dem Bau einer am Ufer installierten Anlage begonnen. Sie sollte nach dem Prinzip der *Oscillating Water Column* funktionieren – zu Deutsch schwingende Wassersäule. Dabei wird eine Turbine nicht direkt vom Wasser angetrieben, sondern von einem Luftstrom, der entsteht, wenn Wellen in eine zum Meer hin offene Kammer einlaufen und die darin eingeschlossene Luft komprimieren.

Die kleine Betonkammer an der Inselküste hatte jedoch mit konstruktionsbedingten Geburtsfehlern zu kämpfen: Das Stahlfundament war wackelig, die Druckkammer löchrig. »Da waren Wissenschaftler und keine Ingenieure am Werk«, sagt Frank Neumann. Er und einer seiner Mitarbeiter brauchten Jahre, um die Mängel zu beseitigen. In den letzten drei Monaten des Jahres 2010 zahlte sich die Arbeit dann



INTERVIEW

»Noch ist Meeresenergie ein Abenteuer«

Interview mit **Kai-Uwe Graw**, Professor für Technische Hydromechanik an der TU Dresden. Seit 20 Jahren erforscht er Möglichkeiten, die Wellenenergie der Weltmeere nutzbar zu machen.

Spektrum: Herr Graw, ist es wirklich plausibel, dass allein die Energie aus den Meereswellen ein Zehntel des weltweiten Strombedarf decken könnte?

PROFESSOR DR. KAI-UWE GRAW: Das ist durchaus plausibel. Allerdings versuchen wir seit über 20 Jahren, dieses Reservoir überhaupt nutzbar zu machen. Wie viel wir davon letztendlich erschließen können, muss man erst sehen. Theoretisch könnte man vor der Küste der Antarktis überall Wellenenergiekonverter aufstellen. Aber dann braucht es auch eine Möglichkeit, den Strom zum Nutzer zu bringen. Vielleicht haben wir irgendwann eine Speichertechnologie, etwa basierend auf Wasserstoff, mit der das gelingt. Doch das ist Zukunftsmusik. Im Nordatlantik hingegen befinden sich die Nutzer relativ nah an der Energiequelle. Aber auch da ist noch offen, wie viel Wellenenergie man in den nächsten Jahrzehnten in die Netze in Norwegen, Irland, Großbritannien, Portugal, Frankreich und Spanien einspeisen kann.

Wird die Meeresenergie – trotz der rauen Umgebung, in denen Anlagen betrieben werden müssen – in den kommenden Jahrzehnten preislich mit anderen erneuerbaren Energieformen konkurrieren können?

GRAW: Wenn Wellenenergieanlagen eine Vergütung für die Stromeinspeisung erhalten würden wie die Solarenergie in Deutschland, dann hätten wir heute schon viele davon. Aber überall in Europa liegen die Vergütungen mindestens eine Größenordnung unterhalb der für Sonnenenergie. Auch wenn man die Geldmengen, die in den 1980er Jahren in die Kernenergie gesteckt worden sind, in die Ozeane investiert hätte, gäbe es heute schon Meeresenergiekraftwerke. Die würden vielleicht nicht lange halten und noch keinen ausreichenden Wirkungsgrad haben. Mit einer hohen Einspeisepauschale hätten Investoren das Risiko akzeptiert, denn nach ein paar Jahren hätten sich die Anlagen amortisiert. So aber muss eine Anlage 20 Jahre halten, damit sie sich rechnet. Solche Investitionen

lohnen sich für ein Unternehmen nur, wenn es irgendwann Marktführer wird. Das aber lässt sich nicht planen.

Ist die Technik denn wirklich schon ausgereift?

GRAW: Nein, alle laufenden Projekte haben noch Macken und Schwächen. Das ist wie beim Autobau: Da können Sie ein kleineres Modellauto gebaut haben, das gut funktioniert, und dann hat das große Auto am Ende doch seine Probleme – obwohl davor schon so viele Autos gebaut wurden! Bei der Meeresenergie gab es vorher gar nichts. Das ist also noch ein technologisches Abenteuer. Die Vorstellung, die auch Politiker oft haben, ist: Man stellt Geld bereit, und übermorgen gibt es ein funktionierendes System. Das klappt auf keinem Gebiet.

Was ist besser: Wellen- oder Gezeitenenergie?

GRAW: Die Wellenkraft hat zweifellos das größere Potenzial. Mit der Gezeitenkraft gibt es zwar schon mehr Erfahrungen, doch sie hat das Problem, dass das Gezeitenhubkraftwerk in Saint-Malo das Image dieser Technologie stark negativ beeinflusst hat. Bei der Energiegewinnung aus Gezeitenströmungen, bei der man keinen riesigen Damm baut, sondern unter Wasser Rotoren installiert, werden die Auswirkungen auf die Umwelt wesentlich geringer sein. Allerdings gilt auch da: Stellt man viele Rotoren auf den Meeresgrund, gibt es auch da Umweltfolgen.

Gibt es potenzielle Standorte für die Meeresenergie in Deutschland?

GRAW: Vor Hörnum auf Sylt zum Beispiel wären die Strömungsgeschwindigkeiten groß genug für ein Gezeitenkraftwerk. Das wäre sogar aus Sicht des Küstenschutzes sinnvoll, denn die Insel wird dort nach und nach von der Meeresströmung abgetragen. Wenn man in der Meerenge Rotoren installiert, entzieht man der Strömung Energie, und das Land verschwindet weniger schnell. Aber davon abgesehen gibt es für einen eigenen Industriezweig nicht genügend Standorte an der Nordseeküste. ~

Die Fragen stellte **Robert Gast**.

aber aus: Während dieser Zeit habe Pico fast kontinuierlich Strom ins Netz eingespeist, erzählt Neumann nicht ohne Stolz. Die Leistung habe zwar nur bei etwa 50 der 400 Kilowatt gelegen, für die die Anlage ausgelegt ist. »Doch es hat gezeigt, wie lösbar die Probleme der Wellenergie sind, wenn man Geld und Mühe investiert.« An Geld fehlt es nun allerdings wieder bei Pico. Denn vor einigen Monaten ist die Steuerungselektronik der Anlage kaputt gegangen, seit 2008 aber kommt niemand mehr für Sanierungen auf. »Sowohl Baufirmen als auch Stromerzeuger schrecken vor Investitionen in die Branche zurück«, sagt Neumann.

Seeschlangen in Seenot

In Portugal mag das an überzogenen und dann enttäuschten Erwartungen der Vergangenheit liegen. Eigentlich wollte das Land Weltmarktführer in Sachen Meeresenergie werden. Noch vor vier Jahren gab die portugiesische Regierung die Devise aus, innerhalb weniger Jahre diese Form der Energiegewinnung so weit auszubauen, dass sie maßgeblich dabei helfen kann, insgesamt 45 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Energien zu gewinnen. Eine Einspeisepauschale von 32 Cent pro Kilowattstunde sollte den nötigen Anreiz liefern.

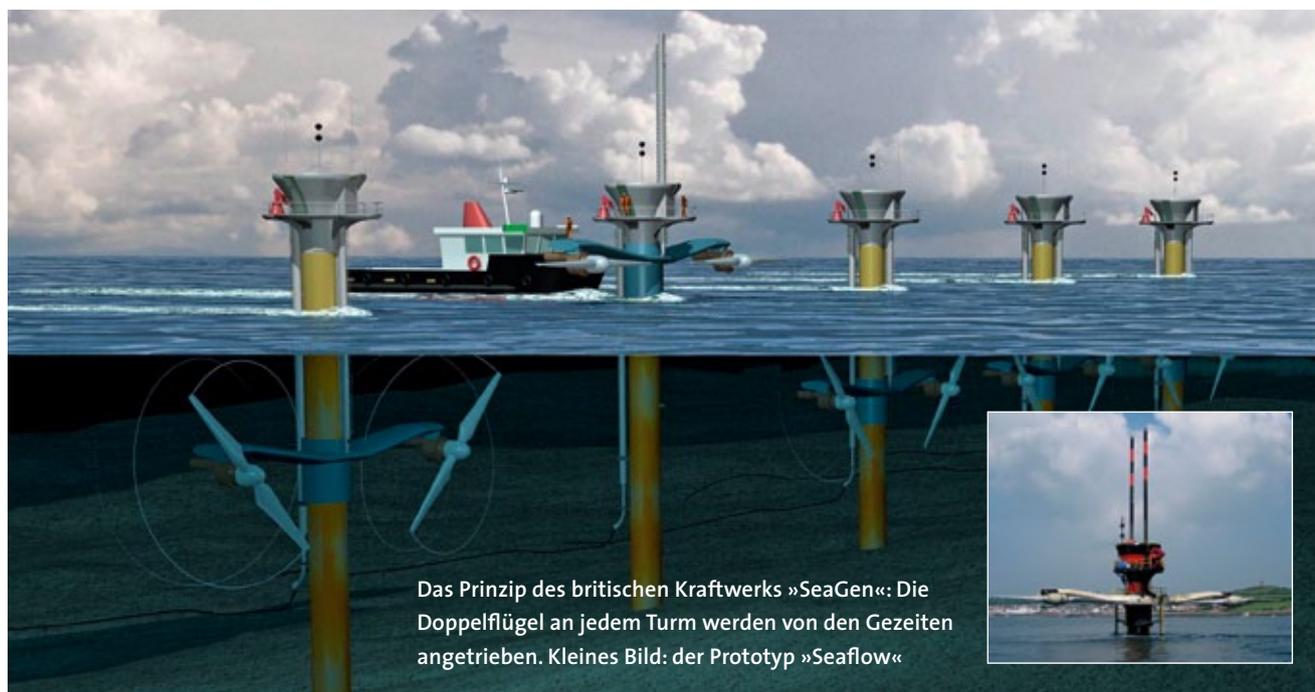
Das Vorzeigeprojekt der Meeresenergie in Portugal glich einer Seeschlange. Es sollte die Kraft der Wellen mit einer anderen Methode als Pico nutzen: Die 180 Meter lange »Pelamis« bestand aus fünf Segmenten, deren Gelenke geknickt wurden, wenn die zum Wellenkamm hin ausgestreckte Schlange von einer Welle erfasst wurde (Foto S. 75). In den Gelenken installierte Kolbenpumpen sollten über ein Hydrauliksystem eine Leistung von 750 Kilowatt erzeugen. Aber die 8,5 Millionen teure Wellenfarm mit drei knallroten Seeschlangen scheiterte 2009 fünf Kilometer vor der Atlantikküste bei Póvoa de Varzim. Die Geräte gingen wiederholt

kaputt, und schließlich meldete der australische Hauptinvestor Babcock & Brown Konkurs an. Zuvor hatte es schon massive Verzögerungen gegeben, unter anderem beim Anschluss der schwimmenden Anlagen an ein Unterseekabel.

»Die Wellenfirmen haben das Blaue vom Himmel versprochen, um Investoren an Land zu ziehen – und die Entscheidungsträger haben ihnen geglaubt«, erinnert sich Neumann. Heute gebe sich die portugiesische Regierung weniger euphorisch, zumal das hoch verschuldete Land zurzeit ganz andere Probleme habe. Neumann: »Die Meeresenergie ist auf deren Agenda weit nach hinten gerutscht.«

Anders sieht das in Großbritannien aus. Hier hat der Staat 2009 über 80 Millionen Pfund in die Entwicklung von Meeresenergietechnologien investiert. Bis 2020 sollen sie zusammen 2000 Megawatt bereitstellen – immerhin so viel wie zwei Atomkraftwerke. 2050 könnte bis zu einem Fünftel des britischen Stroms aus dem Meer kommen, schätzt eine Studie des Carbon Trust Funds.

Auf den Britischen Inseln hat auch die Seeschlange ein neues Zuhause gefunden. Im Gegensatz zu dem Seemonster von Loch Ness kann die »Pelamis« vor den Orkneyinseln an Schottlands Nordküste jeder sehen. Dort entstand in den letzten Jahren der weltweit größte Testpark für Meeresenergien. Etwa ein Dutzend Projekte in verschiedenen Entwicklungsstadien werden derzeit rund um die Inselkette aufgebaut. Gleich zwei Prototypen der »Pelamis«-Anlage wurden dort in den letzten zwei Jahren zu See gelassen, bis Ende des Jahrzehnts sollen bis zu 66 weitere folgen. 50 Megawatt könnten die Seeschlangen dann insgesamt ins Netz speisen. Es ist bisher eines der wenigen Meeresenergieprojekte, das ein großer Energiekonzern für sich gewinnen konnte: Unter der Schirmherrschaft von E.ON und der britischen Firma ScottishPower Renewables sollen die zwei Prototypen bewei-



Das Prinzip des britischen Kraftwerks »SeaGen«: Die Doppelflügel an jedem Turm werden von den Gezeiten angetrieben. Kleines Bild: der Prototyp »Seaflow«

ILLUSTRATION UND FOTO: MARINE CURRENT TURBINES LTD.

sen, dass sie auch Monsterwellen überstehen, die in den Wintermonaten vor der schottischen Küste toben und bisher als Haupthindernis für den Einsatz der Seeschlange gelten.

Auch sonst mangelt es bei den Orkneyinseln nicht an originellen Ideen, wie man sich das Meer untertan machen könnte. So soll eine riesige muschelartige Konstruktion auf dem Meeresgrund die Klappbewegung eines Schwimmkörpers in hydraulische Energie umwandeln – als Investor ist der Schweizer Elektronikgigant ABB mit an Bord. Eine finnische Firma will einen pinguinförmigen, 1600 Tonnen schweren Schiffsrumpf verankern, der wegen seiner speziellen Form von den Wellen im Kreis gedreht wird und die Rotationsenergie in eine Leistung von bis zu einem Megawatt umwandelt. Und ein weiteres Unternehmen will ab 2012 mehrere Bojen installieren, deren Wippbewegung Pumpen auf dem Meeresgrund antreibt. Aus dem derart ans Ufer gepumpten Wasser könnte neben Strom auch Trinkwasser gewonnen werden, wirbt der Betreiber – vorausgesetzt man installiere zusätzlich eine Entsalzungsanlage.

In Norwegen experimentiert ein kleiner Prototyp derweil mit einem Verfahren, das nach dem umgekehrten Prinzip funktioniert: In einem Osmosekraftwerk soll der Druck, den Trinkwasser durch eine Membran auf Salzwasser ausübt, zum Antrieb einer Turbine genutzt werden. Und in Äquatornähe sollen seit geraumer Zeit die Temperaturunterschiede zwischen dem Wasser an der Oberfläche und kühlem Tiefenwasser zum Antrieb einer Wärmekraftmaschine verwendet werden. Der Konzern Lockheed Martin will in den kommenden Jahren auf Hawaii eine Versuchsanlage errichten.

Ein noch spektakuläreres Vorhaben könnte dagegen bald vor der Westküste von Wales realisiert werden. Dort soll ein 300 Meter breiter und 33000 Tonnen schwerer »Wave Dragon« die Wellen des Meeres bändigen und so 3000 Haushalte mit Strom versorgen. Ein um den Faktor 4,5 kleinerer, von privaten Investoren bezahlter »Wellendrache« wurde bereits von 2003 bis 2009 in der dänischen Bucht von Nissum Bredning getestet. Der für 20 Kilowatt ausgelegte Prototyp war so konstruiert, dass Wasser über eine Rampe in sein Inneres schwappen konnte, wo es beim Rückfluss ins Meer Turbinen

antrieb. Probleme blieben nicht aus, obwohl das Meer in der fast komplett von Wasser umschlossenen Bucht von Nissum Bredning als ausgesprochen zahm gilt. 2005 riss sich der Testdrache von der Ankerkette los und driftete ans Ufer. Auch lösten sich bei stärkerem Wellengang häufiger die »Flügel« (*Wave Reflector*) des Drachen. Daneben hatten die Turbinen ständig mit Algen und Korrosion zu kämpfen. Insgesamt habe man jedoch alle technischen Probleme lösen können und so die Seetauglichkeit des Drachens bewiesen, urteilen die beteiligten Ingenieure in ihrem Abschlussbericht. Dennoch fand sich auch hier bislang kein Investor, der den Monsterdrachen vor Wales zu Wasser lassen möchte.

»Es wird spektakuläre Fehlschläge geben«

Allgemein schätzen Experten, dass nur wenige der Wellenenergieprototypen den Sprung zur Marktreife schaffen werden. »Von den verschiedenen Projekten werden viele unwirtschaftlich bleiben oder nicht zuverlässig arbeiten«, schreibt Tom Thorpe in einem 2010 erschienenen Bericht für den Weltenergieerat. Das gelte auch für einige der Projekte, die bereits Investoren gefunden haben. »In den nächsten Jahren wird es einige spektakuläre Fehlschläge geben«, prognostiziert der britische Meeresenergieexperte.

Schuld könnte der unberechenbare Ozean sein. So steigt die Energie der Wellen quadratisch mit ihrer Höhe. Wird also eine Anlage in einem Gebiet betrieben, wo die Wellen in der Regel einen Meter hoch sind, aber einmal im Jahr zehn Meter hohe Sturmwellen über das Meer ziehen, muss das Gerät das 100-Fache seiner Normalbelastung aushalten. Anders als Schiffe, die in den Hafen fahren können, und Bohrinseln, die 30 Meter über der Meeresoberfläche gebaut sind, bekommen Wellenkraftwerke die volle Wucht der Naturgewalten ab.

Dessen war man sich auch beim deutschen Wasserkraftspezialisten Voith Hydro bewusst, als man vor Jahren einen Einstieg in die Wellenenergiebranche diskutierte. »Wir haben eine Technologie gesucht, die wirklich risikoarm ist«, sagt Jochen Weilepp, Leiter des Bereichs Ocean Energies des Heidesheimer Unternehmens. Fündig wurden Weilepp und seine Kollegen schließlich am Strand der Insel Islay vor der Westküste Schottlands. Dort betrieb das schottische Start-up-Unternehmen Wavegen seit 2001 ein kleines Kraftwerk nach dem Prinzip der oszillierenden Wassersäule, wie jenes auf der Azoreninsel Pico. Bis Voith Hydro einstieg, sah es auf Islay nicht viel besser aus: »Limpet« – englisch für Napfschnecke – machte seinem Namen alle Ehre. Das Kraftwerk war für 500 Kilowatt ausgelegt, lieferte jedoch durchschnittlich weniger als fünf Prozent dieser Leistung. Der Grund: Der Meeresboden vor der Küste war deutlich flacher als erwartet, weswegen weniger Wellen die Anlage erreichten als vorgesehen.

Voith Hydro wandelte »Limpet« kurzerhand in einen Teststand um. In über 70 000 Betriebsstunden wurden dort seitdem mehrere Turbinentypen getestet und optimiert. Sie sind in die Planung eines Wellenkraftwerks im spanischen Mutriku eingeflossen, das im Sommer 2011 in Betrieb ging. In die neue Hafenmauer des baskischen Fischerdorfs wurden



Auf der britischen Insel Islay treiben Wellen die Turbinen der Testanlage »Limpet« (Napfschnecke) an.



16 besonders kleine, wenig stör anfällige Turbinen integriert, die auch in dem gemäßigten Wellenklima in der Bucht von Mutriku gut ausgelastet werden – und so bessere Leistung erbringen dürften als alle Kraftwerke mit der oszillierenden Wassersäule zuvor. Die 300-Kilowatt-Anlage, die 2,3 Millionen Euro gekostet haben soll, wird 600 der 5000 Einwohner Mutrikus mit Elektrizität versorgen.

Das Nachfolgeprojekt könnte dann mit größeren Turbinen und in rauerem Meeresklima vor der Isle of Lewis an der Westküste Schottlands entstehen. »Siadar« soll mitten im Meer stehen und nur durch einen 200 Meter langen Steg mit dem Ufer verbunden sein. Vier Megawatt ließen sich damit bereitstellen. Vor einem halben Jahr sah es noch gut aus für das 35-Millionen-Euro-Projekt und damit für die oszillierende Wassersäule: Eine Tochterfirma des Energiekonzerns RWE wollte den Löwenanteil der Gelder aufbringen. Aber im August 2011 bekam der Essener Stromgigant kalte Füße und zog sich aus dem Projekt zurück. Dabei stand »Siadar« eigentlich nichts mehr im Weg: »Als erstes Großprojekt dieser Art hat das »Siadar«-Projekt die Genehmigung der schottischen Behörden erhalten«, erläutert Weilepp.

Aber die Tochter des Essener Konzerns investiert künftig lieber in eine andere Form der Meeresenergie: in die der Gezeiten. Die Anziehung von Mond und Sonne im Zusammenspiel mit den Fliehkräften der sich drehenden Erde zerren beständig am Wasser der Weltmeere. Besonders starke Tidenströme durch Meeresengen und in Buchten im Nordatlantik und vor der Westküste Kanadas. In Europa soll es 106 mögliche Standorte geben.

Eine Großanlage steht bereits seit den 1960er Jahren im bretonischen Saint-Malo. Dort drücken die Gezeiten täglich über 700 Milliarden Liter Wasser in die Mündungsbucht der Rance. Ein 75 Meter breiter Damm lässt die Wassermassen nur dann ins Meer zurückfließen, wenn sie dabei 24 Turbinen antreiben. Der erzeugte Strom versorgt knapp 40000 Haushalte. Das Potenzial der Tidenenergie in Europa entspricht zwar nur einem Zehntel der erschließbaren Wellenenergie. Aber die Gezeitenkraft hat einen entscheidenden Vorteil: »Die Tidenströme sind sehr regelmäßig, und man kann sie exakt prognostizieren«, sagt Jochen Bard, Meeres-



Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf
Monaten haben sich über
20.000 Bürger für Strom
aus 100 % Wasserkraft von
NaturEnergiePlus entschieden.
Wann wechseln Sie zum
Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!



energieexperte vom Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel. Selbst bei einer Springflut steige die Flussgeschwindigkeit im Wasser nur geringfügig an, und wenn es doch einmal zu viel würde, ließe sich eine Anlage jederzeit abschalten. Das senke das Investitionsrisiko erheblich: »Die Überlebenschancen einer Gezeitenanlage sind viel höher als die eines Wellenkraftwerks«, meint Bard. Zudem erlaube die Vorhersagbarkeit der Gezeiten, Ausfälle einer Anlage durch Anlagen an anderen Standorten aufzufangen.

Nähern sich Robben, schaltet sich die Anlage ab

Bard war an dem Pilotprojekt »SeaGen« beteiligt, das seit 2008 in der Meeresenge zwischen dem Atlantik und dem irischen Inlandsee Stranford Lough betrieben wird. Anders als in Saint-Malo werden hier Meeresströmungen genutzt, die von den Gezeiten in Gang gesetzt werden. An einem 40 Meter hohen Turm sind unter der Wasseroberfläche zwei 16 Meter große Rotoren befestigt, die bis zu 1,2 Megawatt Leistung erbringen können, wenn Ebbe und Flut das Wasser in Bewegung setzen. Auch bei SeaGen gab es zunächst technische Probleme, etwa defekte Rotorblätter. »Seit diese Kinderkrankheiten überwunden sind, arbeitet SeaGen aber sehr zuverlässig«, sagt Bard. Wenn etwas nicht so läuft, wie es soll, wird der Aufwand jedoch gleich sehr hoch. Dann müssen die Zwillingrotoren am Turm über die Wasseroberfläche gefahren und Reparaturen vor Ort durchgeführt werden. Diesen Kostenfaktor will ein ähnliches Projekt vor Südkoreas Südküste minimieren: Dort soll in den nächsten Jahren eine Farm verhältnismäßig einfacher, aber robuster Unterwasserrotoren installiert werden, die 100 000 Haushalte mit Strom versorgen können.

Die Betreiber haben in Südkorea wohl mit weniger strengen Umweltauflagen zu kämpfen als beim britischen Gezeitenkraftwerk SeaGen. Dort wurde extra ein Sonargerät angebracht, das nach Robben Ausschau hält – kommt eines der Tiere den Rotoren zu nahe, schaltet sich die Anlage ab. Daneben wurden Studien zum Einfluss der Anlage auf die Flora und Fauna des Meeresgrundes durchgeführt.

Bei zukünftigen Gezeitenkraftwerken wollen Betreiber auf jeden Fall vermeiden, dass sie – wie der Damm von Saint-Malo – das Ökosystem im Meer auf den Kopf stellen. Der Umweltschutz dominierte auch die Debatte um die Pläne, ein riesiges Gezeitenkraftwerk in der Bucht des Severn bei Bristol zu bauen. Dazu wäre ein 16 Kilometer langer Damm nötig, in dem 216 gewaltige Turbinen den 14 Meter messenden Tidenhub nutzen. Fünf Prozent des englischen Elektrizitätsbedarfs würde das Projekt decken. Aber da der »Severn Barrage« die natürliche Umgebung von Fischen und Vögeln gestört hätte und zudem eine Machbarkeitsstudie überraschend hohe Kosten von mindestens 34 Milliarden Pfund errechnete, legte die Regierung das Projekt vergangenes Jahr auf Eis – vorerst.

Auch sonst scheint die Zukunft der Meeresenergie vor allem eine Frage des Geldes zu sein. Denn ob das Meer auf lange Sicht preislich mit dem Strom aus Wind oder Biomasse



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Energie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/energie

konkurrieren kann, muss sich erst noch zeigen. Momentan sind die Investitionskosten sehr hoch: zehn Millionen Euro für jedes installierte Megawatt Leistung. In zehn Jahren, so erwartet Bard, könnten die Investitionskosten für größere Projekte auf ein Drittel sinken. Damit läge man dann im Bereich der Offshore-Windenergie.

Die Konkurrenz der verschiedenen Projekte um Fördergelder wird womöglich dazu beitragen, dass sich jene Konzepte durchsetzen, die am billigsten Strom produzieren können. Das werden mehrere sein, prognostiziert Jochen Bard: »Bei der Meeresenergie wird es nicht so sein wie beim Wind, wo der Dreiblattrotor alle anderen Ansätze verdrängt hat.« Bis zur Marktreife muss die Meeresenergie aber noch einige Hürden nehmen, meint Frank Neumann: »Erst mal müssen ein oder zwei Technologien einen ganzen Winter ohne Schäden betrieben werden.« ~

DER AUTOR



Robert Gast ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

QUELLEN

- Barros, N. et al.:** World Energy Council: Survey of Energy Resources. 2010
- Barros, N. et al.:** Carbon Emission from Hydroelectric Reservoirs Linked to Reservoir Age and Latitude. In: Nature Geoscience 4, S. 593–596, 2011
- Intergovernmental Panel on Climate Change:** Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Mai 2011
- Sachverständigenrat für Umweltfragen:** 100 Prozent erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar. Mai 2010

WEBLINKS

- www.erneuerbare-energien.de
Informationen des BMU zu erneuerbaren Energien
- http://ec.europa.eu/research/energy/eu/research/hydropower/index_en.htm
Forschungsprogramm der EU zur Energie aus Wasser
- www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/ausgaben/ep200302/bilder/0203_wavedragon2_dia.html
Bilder des »Wave Dragon«

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135754

Anzeige

Ringwallspeicher für die Energiewende

Traditionelle Pumpspeicherkraftwerke eignen sich ideal zum Ausgleich von zeitweise auftretenden Überschüssen und Defiziten bei der Stromerzeugung. Allerdings gibt es nur wenige Standorte, die dafür in Frage kommen und sich konfliktarm erschließen lassen. Eine flexiblere, wirtschaftliche Alternative bilden so genannte Ringwallspeicher.

Von Matthias Popp

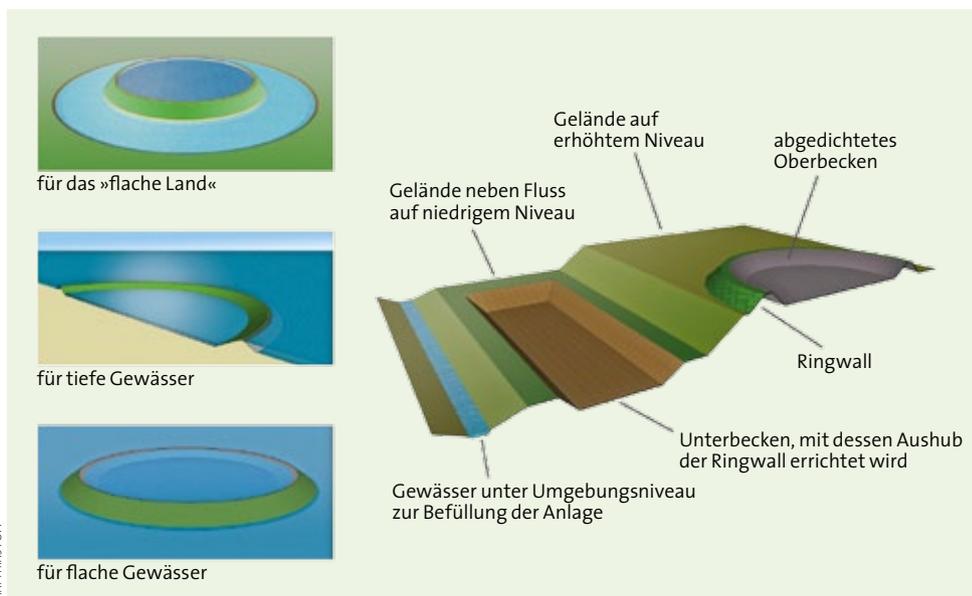
Prinzipiell ließe sich der Energieverbrauch aller Menschen auf der Erde problemlos durch Sonne und Wind decken (siehe die ersten beiden Beiträge der Serie in SdW 12/2011, S. 68, und 1/2012, S. 78). Das Problem: Beide Energiequellen sind »volatil«, stehen also wetterabhängig in zeitlich sehr schwankendem Umfang zur Verfügung. Erzeugung und Nachfrage weichen daher dauernd voneinander ab.

Eine stabile Stromversorgung funktioniert aber nur bei einem präzise ausbalancierten Gleichgewicht von Produktion und Verbrauch. Um Beschädigungen oder Ausfälle im Stromnetz zu vermeiden, müssen demnach zeitweilig auftretende Überschüsse zwischengespeichert werden, so dass Mangelphasen überbrückt werden können.

Der benötigte Speicher, um in Deutschland jederzeit, auch über die größten zu erwartenden Flauten hinweg, die Nachfrage befriedigen zu können, wird in so genannten Tagesladungen angegeben (siehe Grafik S. 86). Eine Tagesla-

dung reicht aus, um allein per Speicher die Vollversorgung für einen Tag mit der im Langzeitdurchschnitt zu erwartenden Stromnachfrage zu gewährleisten. Berechnet man Szenarien technisch realisierbarer, zu 100 Prozent regenerativer Stromversorgungssysteme auf Basis von Wind und Sonne, zeigt sich, dass der Speicherbedarf erheblich davon abhängt, wie sich der Erzeugungspark zusammensetzt, mit dem die Energie aus natürlichen Kreisläufen in Elektrizität umgewandelt wird.

Den größten Vorratsbedarf hätte mit über 100 Tagesladungen eine reine Versorgung mit Solarenergie. Denn im Winter scheint die Sonne geringer, zugleich wird in der kalten Jahreszeit mehr Strom verbraucht. Bei Windrädern hängt der Speicherbedarf zum Ausgleich der Volatilität wesentlich von der technischen Auslegung ab. Starkwindphasen und Sturmböen erreichen gewaltige Leistungsspitzen, daher werden die Rotoren bei höheren Windgeschwindigkeiten zunehmend in den Wind gedreht, um die Anlagen nicht zu überlas-



Was braucht es, um einen Ringwallspeicher zu bauen? Die Grafik zeigt, wie solche Bauwerke in der Ebene (links oben), im tiefen oder flachen Wasser (links, Mitte und unten) oder in der Nähe eines Flusses (rechts) entstehen können.



LINKS: MATTHIAS POPP / GRAFIC; STEFAN SCHISSL; UNTEN: MATTHIAS POPP / WOLFGANG SCHWARZ

Visionen für eine Zukunft, die verstärkt auf Wasser- und Windkraft setzt: ein Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk, 6,6 Kilometer im Durchmesser und 215 Meter hoch. Es lässt sich wie hier dargestellt in einen See einbetten, der als Unterbecken dient, und mit Windanlagen kombinieren. Der Flächenverbrauch solcher Anlagen entspricht in etwa dem großer Braunkohletagebauegebiete wie hier im tschechischen Sokolov (kleines Bild).



ten. Über die Windgeschwindigkeit, ab der diese Reduzierung der abgenommenen Leistung einsetzt, wird die Nennleistung einer Windenergieanlage festgelegt. Je höher diese Abregelungswindgeschwindigkeit gewählt wird, desto seltener wird die Nennleistung erreicht, desto weniger Volllaststunden werden erzielt und desto mehr sinkt auch der Nutzungsgrad der Anlagen. Alle Windenergieanlagen Deutschlands zusammen erreichten 2011 einen mittleren Nutzungsgrad von rund 20 Prozent, entsprechend etwa 1750 Volllaststunden bei 8760 Jahresstunden.

Dadurch müssten bei einem wachsenden Anteil der Windenergie zur Übernahme einer wesentlichen Versorgungslast das Übertragungsnetz und die Speicher in Starkwindphasen fünfmal mehr Leistung transportieren und aufnehmen können als für die Versorgung der Verbraucher nötig. In den von mir am Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der Technischen Universität Braunschweig berechneten Szenarien

wurde deshalb auch analysiert, wie sich ein wesentlich höherer Nutzungsgrad auf den weiteren Ausbau der Windenergie auswirken würde. Bei einer Vollversorgung mit Windenergieanlagen mit ungefähr 50 Prozent Nutzungsgrad würde der Speicherbedarf etwa 40 Tagesladungen erfordern. Da der Wind besonders stark während des Winterhalbjahres bläst, könnten die Speicher Erzeugungsüberschüsse aus dem Winter in den Sommer übertragen – also gerade umgekehrt wie bei der Solarenergie. Entsprechend liegt es nahe, diese beiden Erzeugungsformen zu kombinieren.

Werden regional Solarenergie und Windenergie aufeinander abgestimmt, lässt sich der Speicherbedarf in Deutschland auf rund 14 Tagesladungen reduzieren. Der Erzeugungsanteil der Windenergie müsste dabei zirka 80 Prozent, der von Solarenergie 20 Prozent betragen. Bei dieser optimierten kombinierten Erzeugung aus Wind und Sonne würden die Speicher selten und hauptsächlich im Winter in größerem

Umfang in Anspruch genommen. In der übrigen Zeit wären die Speicher gut gefüllt und würden mit nur einem kleinen Teil ihrer Kapazität die kurzzeitigen Differenzen zwischen Erzeugung und Nachfrage ausgleichen. Starken Einfluss auf den Speicherbedarf hat die Erzeugungsreserve. Je mehr Leistung oberhalb des Durchschnittsverbrauchs vorgehalten wird, desto weniger werden die Speicher in Anspruch genommen und desto schneller werden sie nach einer Entnahme wieder gefüllt. 80 Prozent Erzeugungsreserve würden in Deutschland bei vorteilhafter Kombination von Wind und Sonne einen Speicherbedarf von deutlich unter zehn Tagesladungen erfordern.

Flexiblere Standortsuche für die Wasserspeicher

Besonders günstig ist es, wenn man über Speicher mit möglichst hohem Wirkungsgrad verfügt. Damit ließe sich die Erzeugungsreserve, also die Anzahl der erforderlichen Wind- und Solarenergieanlagen, die über den realen Verbrauch hinaus vorgehalten werden müssen, um Verluste auszugleichen, deutlich senken. Wirkungsgrade von 80 Prozent und Kapazitäten in der schon erwähnten Größenordnung lassen sich grundsätzlich mit Pumpspeichern erzielen. Doch liegt der Speicherbedarf für Deutschland selbst unter günstigsten Annahmen über dem Mehrhundertfachen der heute verfügbaren Pumpspeicherkapazität von rund 40 Gigawattstunden. Für den Bau so vieler weiterer Wasserbecken für klassische Pumpspeichersysteme sind geeignete Gebiete selten.

Diese Probleme ließen sich mit Ringwallspeichern umgehen: Wasserspeichersysteme, deren Oberbecken ein aufgeschütteter Ringwall bildet, der mit dem Aushub für das Unterbecken errichtet wird. Sie funktionieren im Prinzip wie Pumpspeicher. Es lassen sich aber leichter geeignete Standorte finden. Ihre potenziellen Vorteile sind beträchtlich:

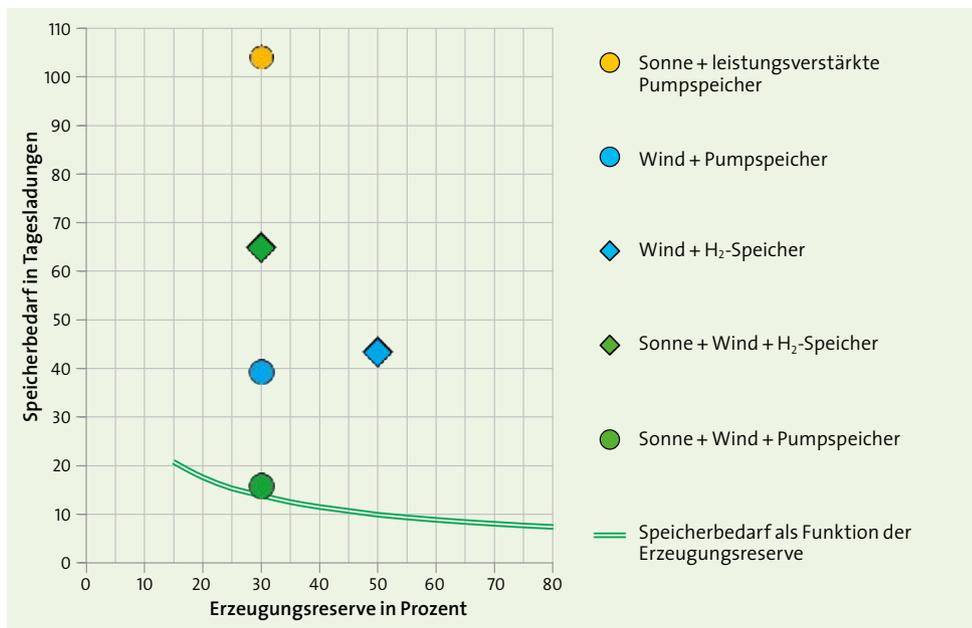
➤ Anders als bei Pumpspeichern kann man bei Ringwallspeichern auf eine Flutung großer Flusstäler verzichten.

➤ Es müssen nicht unbedingt hohe Berge in unmittelbarer Nähe der Wasserreservoirs stehen. Vielmehr wird der Aushub für das Unterbecken dazu benutzt, den Höhenunterschied und die Einfassung für das Oberbecken künstlich herzustellen. Mit dem Ringwall wird der Höhenunterschied im flachen Land geschaffen oder bei geringen natürlichen Höhenunterschieden verstärkt.

➤ Damit lassen sich sehr große Kapazitäten erreichen, die das Speicherproblem der volatilen erneuerbaren Energien mit hohen Wirkungsgraden lösen könnten.

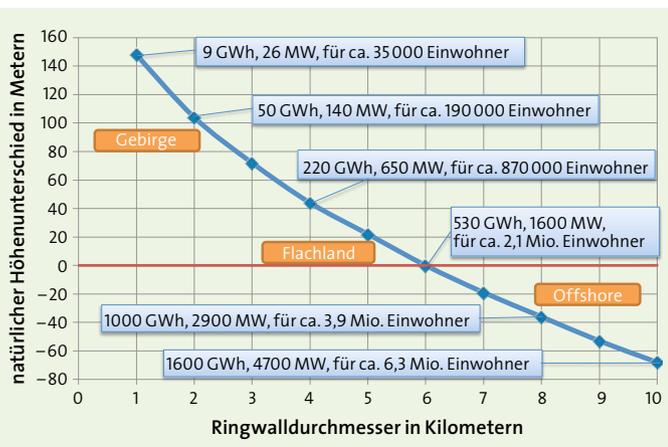
Für einen Ringwallspeicher würde – ähnlich wie beim Abtrag der Deckschichten eines Braunkohletagebaus – das Unterbecken ausgehoben. Aus dem Erdaushub errichtet man einen stabilen Ringwall für das Oberbecken. Dieses wird dann auf seiner Innenseite abgedichtet und durch Druckleitungen über ein Wasserkraftwerk mit dem Unterbecken verbunden. Stromüberschüsse treiben im Kraftwerk Motoren an, die über Pumpen das Wasser vom Unter- in das Oberbecken befördern. Bei Stromdefiziten wird dieses Wasser unter hohem Druck über Turbinen aus dem Oberbecken in das Unterbecken zurückströmen und dabei Generatoren antreiben.

Berechnungen zeigen, dass die Erdarbeiten für einen Ringwallspeicher pro Kilowattstunde Speicherkapazität einen Aufwand erfordern, der dem von Pumpspeichern in Mittelgebirgen entspricht. Sind in einer Region natürliche Höhenunterschiede vorhanden, lassen sich mit dem Prinzip der Ringwallspeicher auch kleinere Systeme als auf dem flachen Land bei gleicher Wirtschaftlichkeit realisieren (siehe Grafik rechts). Das Unterbecken braucht den Ringwall nicht zu umschließen, sondern kann in seiner Form frei gestaltet werden. Siedlungen und sonstige sensible Landschaftsbereiche können umgangen und in die Wasserlandschaft integriert werden. Für die Dimensionen einer derartigen Anlage gilt folgender Zusammenhang: Verdoppeln sich Durchmesser, Höhe sowie das vorgesehene Pegelspiel in Ober- und Un-



MATTHIAS POPP

Wie viel Speicher braucht man, um Strom ausschließlich regenerativ zu erzeugen? Der Grafik sind diese Wirkungsgrade zu Grunde gelegt: Pumpspeicher: 80 Prozent, Wasserstoff(H₂)-Speicher: 40 Prozent.



Der Durchmesser von vergleichbaren Ringwällen variiert mit den natürlichen Höhenunterschieden. Angenommen sind hier 200 Meter mittlere Höhendifferenz der Wasserspiegel und dass der Pegel 20 Meter im Unter- und 50 Meter im Oberbecken schwankt.

terbecken, dann wächst der Energieinhalt auf das 16-Fache. Die Grafik auf S. 85 stellt eine – idealisiert kreisförmige – Ringwallanlage vor. Der Außendurchmesser des Ringwalls beträgt 6,6 Kilometer. Der Ringwall ist 215 Meter hoch und am Wallfuß etwa 700 Meter breit. Der äußere Wasserring für das Unterbecken hat einen Durchmesser von rund elf Kilometern. Etwa 2000 große Windenergieanlagen würden, kombiniert mit der entsprechenden Fläche für Fotovoltaikpaneele, die ohne zusätzlichen Landverbrauch über der Wasserfläche des Speichers angebracht sind, die Energie liefern. Das Gesamtsystem würde im Mittel mit zwei Gigawatt und mit maximal 3,2 Gigawatt Leistung die Stromversorgung für zirka 2,6 Millionen Einwohner sicherstellen und könnte zwei Kernkraftwerke ersetzen.

Die beispielhaft illustrierte Anlage vereinigt die Funktionen von Energiegewinnung und -speicherung, weshalb Fachleute von einem Hybridkraftwerk sprechen. Rund 30 solcher Anlagen würden rein rechnerisch ausreichen, um Deutschland versorgungssicher mit regenerativem Strom allein aus Wind und Sonne zu versorgen (siehe Grafik links). Ein Rückgriff auf fossile und nukleare Energieträger zur Stromerzeugung könnte entfallen. Entsprechend würden keine Kosten für den Einkauf von Energierohstoffen anfallen.

Die angedachte Dammhöhe solcher Ringwälle mag auf den ersten Blick ehrgeizig erscheinen, doch liegt sie unter jener des Nurek-Staudamms, der 1980 in Tadschikistan fertig gestellt wurde und mit 300 Metern das derzeit weltweit höchste Stauwerk darstellt. Wegen der Erdbebengefahr im dortigen Gebiet wurde er nicht aus Beton, sondern als Erdbauwerk ausgeführt. Wie viele andere große Stauseen auch speichert der Nurek-Damm ein Mehrfaches an Wasser im Vergleich zum hier vorgestellten Ringwallspeicher.

Konventionelle Pumpspeicher wälzen als Kurzzeitspeicher ihre Kapazität im Tagesrhythmus oder in noch kleineren Zeitabständen um. Im Gegensatz dazu würden die Pegel

in einem auch für den Langzeitausgleich konzipierten Ringwallspeicher im Normalbetrieb nur geringe Schwankungen aufweisen. Der Speicher wäre meistens gefüllt, die Wasserhöhe würde gerade im Sommer wenig variieren. Nur alle paar Jahre, in besonders windschwachen Wintern, wäre mit größeren Entladungen zu rechnen. Der Pegelverlauf im Unterbecken wäre deshalb vergleichbar mit den Verhältnissen an einem Fluss, der ab und zu einmal von einem Hochwasser überrollt wird. Im normalen täglichen Betrieb sollte der Pegelstand nur im Zentimeterbereich schwanken und bei der Freizeitnutzung des Unterbeckens kaum auffallen.

Regenerative Stromversorgungssysteme mit Speichern wie hier vorgestellt ließen sich europaweit vernetzen. Das würde die Versorgungssicherheit erhöhen, die Variabilität von Wind und Sonne zusätzlich ausgleichen und den Speicherkapazitätsbedarf weiter reduzieren. Man könnte die Speicher auch an der Küste errichten; dann entfielen das Unterbecken und das Meer selbst diente als Auffangbecken.

Um Deutschland mit regenerativem Strom allein aus Wind und Sonne zu versorgen, benötigte man mit diesem Konzept eine Windenergieanlage pro 1300 Einwohner sowie 20 Quadratmeter Solarmodulfläche und, je nach Systemauslegung, zirka 40 Quadratmeter Wasserfläche pro Kopf der Bevölkerung. Zusammen beanspruchten die Ringwallspeicher inklusive aller Erzeugungsanlagen nicht einmal ein Prozent der Landesfläche – weniger, als bereits heute an Biomasse für die Stromerzeugung mit Biogasanlagen angebaut wird. Letztlich handelt es sich bei dieser Zukunftsoption nicht so sehr um eine technische oder finanzielle Herausforderung als vielmehr um eine Frage der öffentlichen Diskussion und Akzeptanz durch die Bürger. ~

DER AUTOR



Matthias Popp studierte Maschinenbau an der Fachhochschule Coburg und machte sich später selbstständig. 1989 diplomierte er an der Technischen Universität München. 2002 bis 2008 war er Zweiter Bürgermeister seiner Heimatstadt Wunsiedel im Fichtelgebirge. 2010 promovierte er an der Technischen Universität Braunschweig über erneuerbare Energien.

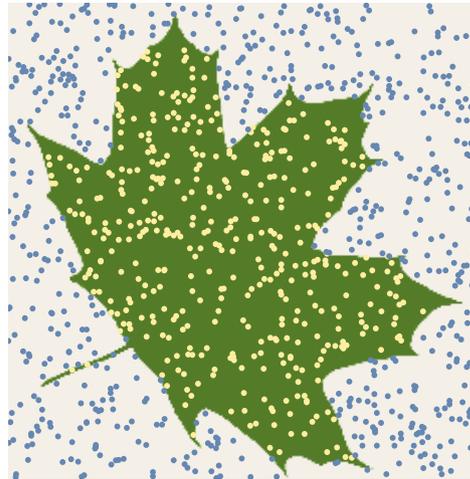
QUELLE

Popp, M.: Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien. Springer, Heidelberg 2010

WEBLINKS

<http://de.wikipedia.org/wiki/Nurek-Staudamm>
Informationen und Linksammlung über die größten Staudämme der Erde
www.ringwallspeicher.de
Analyse eines Hybridkraftwerks auf der Grundlage eines Ringwallspeichers

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1137645



STOCHASTIK

Spiel mit dem Zufall

Zufallszahlen sind für vielerlei gut – etwa dazu, den Flächeninhalt kompliziert geformter Figuren zu ermitteln. In vielen Fällen müssen sie allerdings gar nicht wirklich zufällig sein, sondern nur so aussehen. Manchmal funktionieren sogar schlechte Imitate am besten.

Von Brian Hayes

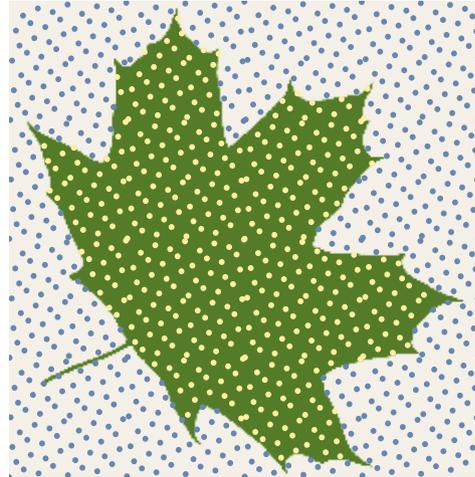
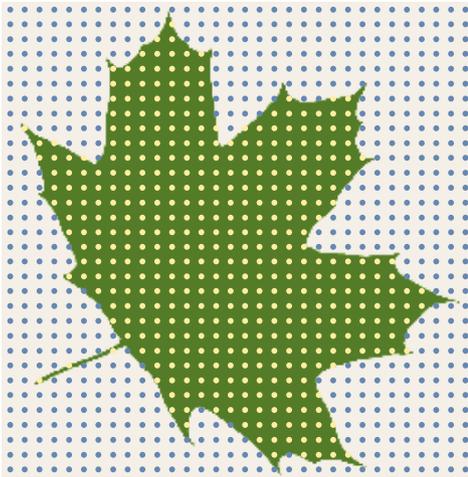
Anfang der 1990er Jahre begann Spassimir Paskov im Rahmen seiner Promotion an der Columbia University in New York ein damals neues Finanzinstrument zu analysieren: mit Hypotheken besicherte Wertpapiere (collateralized mortgage obligations, kurz CMOs), die die Investmentbank Goldman Sachs herausgab. Der Doktorand suchte nach einer Möglichkeit, anhand der zu erwartenden künftigen Zahlungsflüsse für tausende Hypotheken mit einer Laufzeit von 30 Jahren den aktuellen Wert solcher Anleihen zu kalkulieren. Dazu genügte es nicht, mit einer Standardformel Zinsszinsen zu berechnen. Hypotheken werden oft vorzeitig abgelöst, etwa beim Verkauf des betreffenden Hauses oder im Zuge einer Umschuldung. Manche Darlehen fallen wegen Zahlungsunfähigkeit des Schuldners aus. Außerdem können die Zinssätze steigen oder sinken. Der momentane Wert eines CMO entspricht dem zu erwartenden Ertrag über die gesamte Laufzeit von 30 Jahren und wird somit von insgesamt 360 ungewissen, voneinander abhängigen monatlichen Zahlungseingängen bestimmt. Mathematisch gesehen, handelt es sich folglich um eine Art Mittelwert über eine Funktion mit 360 Variablen. Paskov hätte demnach ein Integral im 360-dimensionalen Raum berechnen müssen.

Das schloss eine exakte Lösung des Problems aus. Der Doktorand und sein Betreuer Joseph Traub behelfen sich

deshalb mit einem etwas undurchsichtigen Näherungsverfahren: der so genannten Quasi-Monte-Carlo-Methode. Das herkömmliche Monte-Carlo-Verfahren beruht darauf, Rückschlüsse auf den Mittelwert einer Funktion zu ziehen, indem man einige zufällig gewählte Funktionswerte stellvertretend berechnet. Die »Quasi«-Variante unterscheidet sich in der Art der Stichprobe: Sie ist nicht rein zufällig, aber auch nicht regelmäßig. Wie Paskov und Traub herausfanden, lieferten einige ihrer Quasi-Monte-Carlo-Programme erheblich genauere Ergebnisse und waren dabei sogar schneller als das traditionelle Verfahren. So lag der Wert eines CMO nicht erst nach einer mehrstündigen Berechnung vor, sondern innerhalb weniger Minuten.

Erklärt das die anschließende irrationale Euphorie auf den Finanzmärkten, den Irrsinn des bedenkenlosen Handelns mit komplexen Derivaten und seine traurigen Folgen – Krise, Kollaps, Rezession, Arbeitslosigkeit? So einfach war es leider nicht, für den Wahn gab es andere Gründe.

Auf dem Feld der Mathematik jedoch hatte das Ergebnis von Paskov und Traub sehr wohl Konsequenzen: Quasi-Monte-Carlo-Modelle kamen dadurch unverhofft zu neuem Ansehen. Nach früheren theoretischen Untersuchungen sollten sie ab 10 bis 20 Dimensionen unbrauchbar werden, also weit unterhalb der hier betrachteten 360. Der überraschende Erfolg bei den CMOs spornte die Mathematiker zur Suche nach



ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: BRYAN HAYES

Den Flächeninhalt einer komplizierten Figur – hier eines Ahornblatts (ganz links) – näherungsweise zu bestimmen, gehört zu den klassischen Anwendungen der Monte-Carlo-Methode. Die grundlegende Idee besteht darin, Punkte auf einem Quadrat mit der Figur in der Mitte zu verteilen und zu zählen, wie viele davon innerhalb des Blatts liegen (gelb) und wie viele es verfehlen (blau). Das Verhältnis der Treffer zur Gesamtzahl der Punkte – hier 1024 – gibt den ungefähren Flächeninhalt der Figur an. Bei der herkömmlichen Monte-Carlo-Methode (halb links) werden die Punkte zufällig über das Quadrat verteilt. Das Gegenteil wäre eine streng deterministische Anordnung in einem regelmäßigen Gitter (halb rechts). Die Quasi-Monte-Carlo-Methode (ganz rechts) beruht auf einem Stichprobenmuster, das eine ausgewogene Verteilung der Punkte anstrebt, ohne dass diese ein zufälliges oder regelmäßiges Muster bilden. Die drei Methoden ergeben für den Flächeninhalt Näherungswerte von 0,4189, 0,4209 und 0,4141 der Quadratfläche, was durchweg weniger als ein Prozent vom tatsächlichen Wert 0,4185 abweicht.

einer Erklärung an. Vor allem erhob sich die Frage, ob die Methode auch bei anderen Problemen funktionieren könnte.

Das Beispiel illustriert die seltsam zwiespältige Rolle des Zufalls bei Berechnungen. Algorithmen sind ihrem Wesen nach streng deterministisch, viele von ihnen scheinen aber durchaus von der Möglichkeit zu profitieren, ab und zu für eine benötigte Entscheidung auch mal eine Münze zu werfen. Bei tatsächlichen Berechnungen sind die Zufallszahlen allerdings so gut wie niemals wirklich zufällig, weil ein Computer sie ermittelt. Es handelt sich also um kunstvolle Fälschungen, die zwar wie erwürfelt aussehen und sogar statistische Tests bestehen sollen, aber trotzdem aus einer deterministischen Quelle stammen. Erstaunlich daran ist, wie hervorragend diese Pseudozufallszahlen funktionieren – zumindest in der Mehrzahl der Fälle.

Mathematik mit Pfeilwürfen

Quasizufallszahlen treiben die Scharade noch einen Schritt weiter: Sie geben nicht einmal vor, zufällig zu sein. Trotzdem scheinen sie in manchen Situationen, die nach Zufall verlangen, sehr gute Ergebnisse zu liefern. Unter bestimmten Umständen – wie im Fall der CMOs – leisten sie sogar mehr als ihre pseudozufälligen Gegenstücke.

Ein simples Beispiel soll den Unterschied zwischen »pseudo« und »quasi« klarmachen. Es gelte, den Flächeninhalt ei-

ner komplizierten Figur – etwa eines Ahornblatts – zu bestimmen. Die Aufgabe lässt sich mit einem auf Zufall basierenden Trick lösen. Dazu heftet man das Blatt auf ein Stück Papier bekannter Größe und bewirft Letzteres ungezielt mit Pfeilen. Wenn von N Geschossen, die auf das Papier treffen, n innerhalb des Blatts landen, gibt der Quotient $n:N$ näherungsweise das Verhältnis der Blatt- zur Papierfläche an.

Echte Pfeile ungezielt zu werfen, ist sehr aufwändig und auch nicht ganz ungefährlich. Ersetzen wir aber Pfeile durch Punkte und überlassen deren zufällige Platzierung auf der Vergleichsfläche einem Computer, dann geht die Sache ganz einfach und dabei auch noch erstaunlich präzise.

Ich habe das Verfahren mit einem echten Ahornblatt ausprobiert. Ich setzte ein Foto von ihm in ein weißes Quadrat aus 1024×1024 Pixeln, auf dem ein kleines Programm zufällig – in Wirklichkeit natürlich nur pseudozufällig – 1024 Punkte verteilte. Beim ersten Versuch landeten 429 von ihnen im Blatt, was 0,4189 als Näherungswert für den Flächeninhalt lieferte. Als ich alle grünen Pixel im Feld auszählte, erhielt ich fast dasselbe Ergebnis: 0,4185. Offenbar hatte ich einen Glückstreffer gelandet. 1000 Versuche ergaben einen Mittelwert von 0,4183 mit einer Standardabweichung von 0,0153.

Je größer N , desto besser wird die Näherung. Strebt die Menge der Punkte gegen unendlich, ergibt sich als Grenzwert die tatsächliche Lösung. Dahinter steckt ein mathemati-

ches Theorem: das berühmte Gesetz der großen Zahlen. Es garantiert auch, dass eine ideale Münze in der Hälfte aller Fälle »Zahl« zeigt, sofern sie nur oft genug geworfen wird.

Das Beispiel illustriert die Grundidee des Monte-Carlo-Verfahrens. Man kleidet ein mathematisches Problem, das zu kompliziert ist, um sich exakt lösen zu lassen, so in die Form eines Glücksspiels, dass die Gewinnchance des Spielers gleich der Lösung ist. Ein Computer wiederholt das Spiel dann sehr oft für immer andere zufällig gewählte Parameter. Das gemittelte Ergebnis ist ein guter Schätzwert für die gesuchte Größe.

Der Zufall spielt dabei eine entscheidende Rolle. Das Gesetz der großen Zahlen gilt ja nur, wenn die Werte der Parameter tatsächlich zufällig gewählt werden. Beim Ahornblatt ist so gewährleistet, dass die Punkte wahllos darüber verstreut sind. Allerdings fragt sich, ob nicht auch andere Methoden, Punkte für die Stichprobe auszusuchen, denselben Zweck erfüllen würden. Schließlich könnte man die Blattfläche genauso bestimmen, indem man ein Gitter auf das Quadrat legt und die Kästchen innerhalb des Blatts zählt. Ich habe das ebenfalls probiert und dazu ein 32×32 -Raster mit 1024 Kästchen benutzt. Für den Inhalt der Fläche ergab sich ein Näherungswert von 0,4209 – nicht ganz so gut wie bei meinem Glückstreffer mit Zufallszahlen, aber immerhin weniger als 0,6 Prozent vom tatsächlichen Wert entfernt.

Der Fluch der hohen Dimensionen

Zuletzt habe ich mit 1024 quasizufälligen Punkten die Blattfläche vermessen. Diese ergeben eine Verteilung, die irgendwo in der Mitte zwischen totalem Chaos und vollkommener Ordnung liegt. Dadurch füllen sie im zweidimensionalen Fall eine Fläche gleichmäßiger aus als echte Zufallszahlen, aber bei Weitem nicht so regelmäßig wie die Punkte eines Gitters. Berechnet werden sie mit mehr oder weniger komplizierten mathematischen Verfahren; das älteste hat schon in den 1930er Jahren der niederländische Mathematiker Johannes G. van der Corput (1890–1975) erdacht (siehe Kasten auf S. 93). Das Zählen der Treffer mit quasizufälligen Punkten

ergab einen Näherungswert von 0,4141 bei einem Fehler von einem Prozent.

Jede der drei Vorgehensweisen liefert also ein zufriedenstellendes Resultat. Sind somit alle in etwa gleich gut? Im Allgemeinen nicht. Sie haben nur in diesem Fall ähnlich gut abgeschnitten, weil es ziemlich einfach ist, den Inhalt einer zweidimensionalen Figur zu bestimmen.

In höheren Dimensionen wird die Aufgabe deutlich schwieriger. Um zu verstehen, warum, betrachten wir einen Würfel mit der Kantenlänge 1 samt einem kleineren, dessen Kanten die Länge $\frac{1}{2}$ haben sollen (Bild rechts). Im eindimensionalen Fall besteht ein solcher »Würfel« einfach aus einer Strecke, und sein »Volumen« entspricht deren Länge. Folglich nimmt der kleine Würfel das halbe »Volumen« des größeren ein. Bei zwei Dimensionen handelt es sich um ein Quadrat mit dem Flächeninhalt als »Volumen«. Der kleinere Würfel hat dann das »Volumen« $\frac{1}{4}$. In drei Dimensionen haben wir es mit dem uns vertrauten Würfel zu tun; das Volumen des kleineren beträgt nun $\frac{1}{8}$. So nimmt der Unterschied im Inhalt bei höheren Dimensionen d immer weiter zu. Bei $d=20$ ist das Volumen des kleineren »Würfels« – dessen Kanten weiterhin alle die Länge $\frac{1}{2}$ haben – auf weniger als ein Millionstel geschrumpft! Der Mathematiker Richard Bellman (1920–1984) bezeichnete dieses Phänomen als »Fluch der hohen Dimensionen«.

Um im 20-dimensionalen Raum das Volumen des Ein-Millionstel-Würfels zu messen – oder ihn überhaupt nur aufzuspüren –, wären schon sehr viele Testpunkte nötig, damit zumindest einer überhaupt trifft. Ein 20-dimensionales Gitter müsste dafür aus mehr als einer Million Punkten (genauer $2^{20} = 1\,048\,576$) bestehen. Bei Zufallspunkten lassen sich nur Wahrscheinlichkeiten ermitteln, so dass es nicht möglich ist, die nötige Anzahl präzise anzugeben. Damit man aber mit wenigstens einem Treffer rechnen kann, braucht es wieder 2^{20} Punkte. Dieselbe Punktzahl ergibt sich schließlich auch bei einer quasizufälligen Verteilung. Tatsächlich spielt es kaum eine Rolle, wie man konkret vorgeht, wenn man blind nach einem Objekt vom Volumen $\frac{1}{2}d$ tastet; man muss auf jeden Fall an mindestens $2d$ Orten suchen.

Wären reale Aufgaben so schwierig wie diese, bestünde nicht die geringste Hoffnung, mit einem 360-dimensionalen Integral fertigzuwerden. Wie wir aber bereits wissen, lassen sich einige Probleme selbst dieser Größenordnung mit der Monte-Carlo-Methode erfolgreich angehen. Das dürfte daran liegen, dass die mit diesem Verfahren lösbaren Fälle über eine spezielle Struktur verfügen, durch die sich die Suche beschleunigt. Außerdem spielt offenbar auch die Art des Suchmusters eine Rolle. Dadurch lässt sich eine sinnvolle Unterscheidung zwischen den verschiedenen Auswahlverfahren treffen – von völlig chaotisch über pseudo- und quasizufällig bis hin zu streng geordnet.

Es gibt mindestens drei Eigenschaften, die Mathematiker von Zufallszahlen erwarten. Die erste ist, nicht vorhersagbar zu sein: Es darf keine feste Regel geben, nach der sie gebildet werden. Zweitens sollten sie unkorreliert, also voneinander

AUF EINEN BLICK

ERFOLG MIT PLUMPEN FÄLSCHUNGEN

1 Monte-Carlo-Methoden liefern mit Zufallszahlen Näherungslösungen für Probleme, die zu kompliziert sind, als dass sich ein exaktes Ergebnis berechnen ließe. Tatsächlich sind die verwendeten Zahlen aber nicht wirklich zufällig, sondern erscheinen nur so; denn sie werden nach einer festen **Rechenvorschrift** per Computer ermittelt.

2 Quasizufallszahlen erwecken nicht einmal mehr den Anschein von Zufälligkeit; dafür ergeben sie Muster, die eine sehr ausgewogene und trotzdem unregelmäßige Verteilung aufweisen. Dank dieser Eigenschaft liefern Quasizufallszahlen bei Monte-Carlo-Simulationen unter bestimmten Bedingungen bessere Ergebnisse als ihre echt zufälligen Gegenstücke.

3 Allerdings gilt das im Normalfall nur für Probleme, deren abstrakter **Parameterraum** nicht höher als 20-dimensional ist.

unabhängig sein. Kennt man eine Zahl, darf das nicht dabei helfen, die nächste zu erraten. Schließlich sollten keine Zahlen bevorzugt werden. Die Verteilung der Zufallszahlen muss drittens also ausgewogen sein: Wenn man den Bereich der zulässigen Werte auf beliebige Art in gleiche Gebiete unterteilt, dürfen in keinem davon besonders viele oder wenige Zufallszahlen vorkommen.

Verschiedene Arten von Zufall

Diese Anforderungen liefern hilfreiche Kriterien, um zwischen wirklich, pseudo-, quasi- und überhaupt nicht zufälligen Zahlen zu unterscheiden. Echte Zufallszahlen erfüllen alle drei Bedingungen. Sie sind unvorhersagbar, unkorreliert und ausgewogen verteilt. Bei Pseudozufallszahlen wurde die Forderung nach Unvorhersagbarkeit fallen gelassen. Sie werden nach klar bestimmten arithmetischen Regeln erzeugt; deren Kenntnis erlaubt es, die komplette Folge zu reproduzieren. Allerdings sind Pseudozufallszahlen immer noch unkorreliert und auch – zumindest annähernd – ausgewogen verteilt.

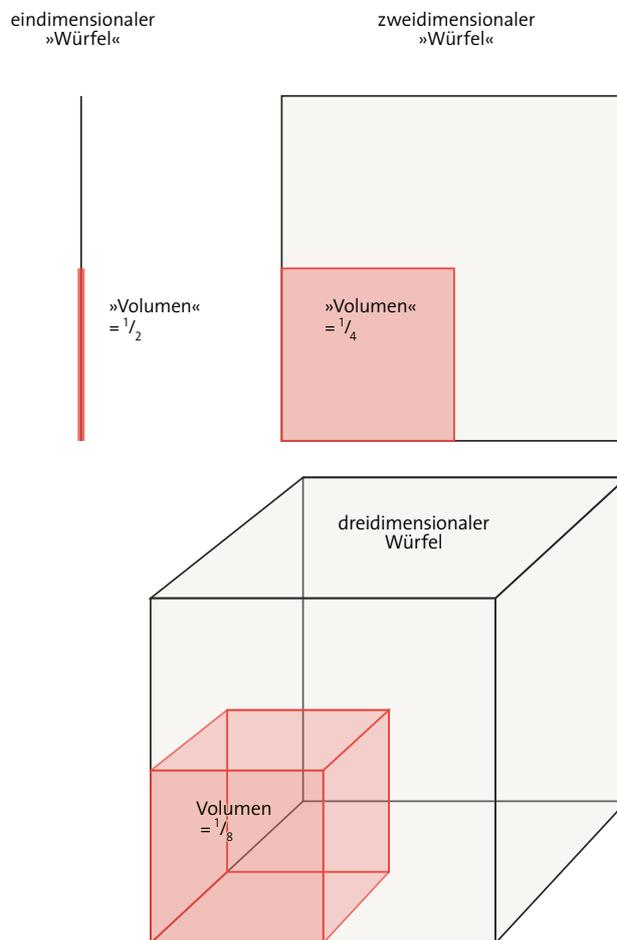
Quasizufallszahlen erfüllen noch eine Bedingung weniger. Sie sind nicht nur vorhersagbar, sondern auch abhängig voneinander. Das von ihnen gebildete Muster weist dadurch viele Regelmäßigkeiten auf, ohne jedoch so geordnet zu sein wie ein Kristallgitter. Quasizufallszahlen erfüllen damit nur noch die Forderung nach ausgewogener Verteilung.

Bei einer hochgradig geordneten Zahlenmenge, die etwa die Positionen der Knoten in einem kubischen Gitter beschreibt, ist schließlich auch diese dritte Bedingung noch verletzt. Das mag zunächst verwundern. Schließlich kann man ein Gitter aus N Punkten so in N kleine Würfel zerlegen, dass jeder genau einen Punkt enthält. Aber das reicht nicht für eine ausgewogene Verteilung. Damit sie vorliegt, darf bei jeder beliebigen Unterteilung des Raums in N gleiche Bereiche jede Region nur genau einen Punkt enthalten. Das Würfelgitter erfüllt diese strenge Forderung nicht: Es lässt sich derart in achsenparallele Schichten zerlegen, dass in einigen gar kein Punkt vorkommt, wogegen andere ziemlich viele enthalten.

Jede der drei Eigenschaften von Zufälligkeit ist wichtig. Im Fall des berühmten Casinos im realen Monte Carlo – einem Stadtteil von Monaco – kommt es in erster Linie auf Unberechenbarkeit, aber auch auf Unabhängigkeit an. Ähnlich verhält es sich bei den kryptografischen Anwendungen von Zufall. In beiden Fällen gibt es einen Gegenspieler, der alles daran setzt, jeden noch so geringen Hinweis auf Regelmäßigkeit aufzuspüren und auszunutzen.

Bestimmte Computersimulationen sind sehr anfällig für Korrelationen zwischen aufeinander folgenden Zufallszahlen. Unter diesen Umständen ist die Unabhängigkeit besonders wichtig. Bei der oben durchexerzierten Volumenabschätzung steht dagegen die Ausgewogenheit der Verteilung im Vordergrund. Quasizufallszahlen schneiden hier besonders gut ab, verzichten dafür aber auf den Anschein von Unberechenbarkeit und Unabhängigkeit.

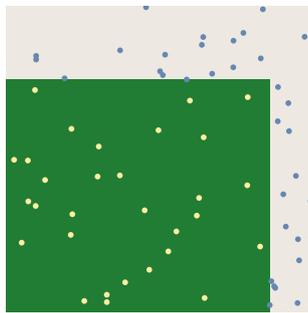
Die Ausgewogenheit einer Verteilung lässt sich über ihr Gegenstück bestimmen: die so genannte Diskrepanz. Bei ei-



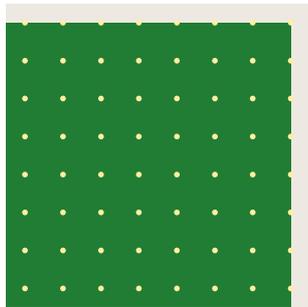
Die näherungsweise Berechnung eines Volumens wird in höheren Dimensionen immer schwieriger. Betrachten wir einen d -dimensionalen Würfel der Kantenlänge 1, der einen kleineren der Kantenlänge $1/2$ enthält. Für $d = 1$ ist der »Würfel« eine Strecke und sein »Volumen« dessen Länge. In diesem Fall füllt der kleinere Würfel die Hälfte des Gesamtvolumens aus. Für $d = 2$ (ein Quadrat mit dem Flächeninhalt als »Volumen«) nimmt er nur noch $1/4$ und für $d = 3$ sogar lediglich ein $1/8$ des gesamten Volumens ein. Der Volumenanteil des kleineren Würfels schrumpft also mit $(1/2)^d$. Dadurch braucht es schon allein etwa 2^d Testpunkte, ihn auch nur aufzuspüren.

nem Punktmuster innerhalb eines Quadrats zum Beispiel wählt man dazu ein in ihm enthaltenes Rechteck, dessen Seiten parallel zu den Koordinatenachsen verlaufen, und zählt die Punkte darin. Dann berechnet man anhand des Flächeninhalts, wie viele es bei vollkommen ausgewogener Verteilung sein müssten. Die maximale Differenz dieser beiden Zahlen für alle möglichen Rechtecke ist ein gebräuchliches Maß für die Diskrepanz.

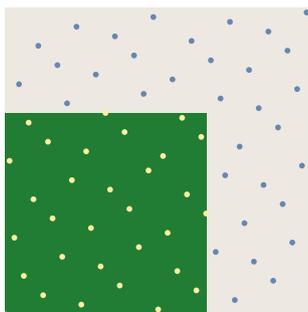
Ein anderes Maß, die so genannte Sterndiskrepanz, berücksichtigt nicht alle achsenparallelen Rechtecke, sondern nur solche, bei denen eine Ecke im Ursprung des Einheitsquadrats liegt. Diskrepanzen lassen sich aber auch mit Kreisen, Dreiecken oder anderen Figuren definieren. Nicht alle diese Maße



$$D^* = |42,02 - 30| = 12,02$$



$$D^* = |56,25 - 64| = 7,75$$



$$D^* = |27,56 - 31| = 3,44$$

Die Diskrepanz gibt an, wie stark ein Punktmuster von einer ausgewogenen Verteilung abweicht. Die hier illustrierte Stern-Diskrepanz (D^*) beruht auf Rechtecken, deren eine Ecke im Koordinatenursprung liegt. Bei vollkommener Ausgewogenheit sollte der Anteil der Punkte innerhalb eines jeden solchen Rechtecks proportional zu dessen Flächeninhalt sein. Die Stern-Diskrepanz des Punktmusters entspricht der Differenz zwischen diesem erwarteten und dem beobachteten Wert bei dem Rechteck, bei dem diese Abweichung am größten ist. Gezeigt ist hier das Ergebnis für drei Muster aus 64 Punkten: ein pseudozufälliges (oben), ein regelmäßiges (Mitte) und ein quasizufälliges (unten). Die quasizufälligen Punkte sind gezielt so gewählt, dass sie die Diskrepanz minimieren.

sind äquivalent, liefern also dasselbe Ergebnis. Im Übrigen fällt auf, dass das Vorgehen bei der Messung von Diskrepanzen stark demjenigen beim Monte-Carlo-Verfahren ähnelt.

Raster oder Gitter haben hohe Diskrepanzen, weil die Punkte in langen Zeilen und Spalten angeordnet sind. Ein unendlich schmales Rechteck, in dem eigentlich überhaupt keine Punkte vorkommen sollten, kann eine komplette Zeile enthalten. Mit Hilfe solcher Rechtecke, die den schlimmstmöglichen Fall darstellen, lässt sich berechnen, dass die Diskrepanz eines quadratischen Gitters mit N Punkten gleich der Wurzel aus N ist. Interessanterweise ergibt sich für die Diskrepanz eines zufälligen wie auch eines pseudozufälligen Musters genau derselbe Wert. Das heißt, für eine Million zufällig angeordneter Punkte existiert sehr wahrscheinlich mindestens ein Rechteck, in dem entweder 1000 Punkte zu viel oder zu wenig liegen.

Quasizufällige Muster sind dagegen bewusst so konstruiert, dass sie die Chance minimieren, solche Rechtecke mit stark unterschiedlichem Füllungsgrad zu finden. Dadurch lassen sich Diskrepanzen bis herab zu einem Wert von $\log N$ (zur Basis 2) erreichen, was viel kleiner als \sqrt{N} ist. Für $N = 106$ beträgt die Wurzel 10,3, aber der Logarithmus nur 20.

Die Diskrepanz ist ein entscheidendes Qualitätskriterium bei Monte-Carlo- und Quasi-Monte-Carlo-Simulationen. Sie bestimmt den möglichen Fehler der Berechnung, das heißt die statistische Ungenauigkeit, die für einen gegebenen Stichprobenumfang zu erwarten ist. Bei der herkömmlichen Monte-Carlo-Methode mit zufälliger Wahl nimmt mit zunehmender Punktezahl der maximal zu erwartende Fehler ungefähr mit $1/\sqrt{N}$ ab. Im Fall von Quasi-Monte-Carlo-Verfahren beträgt die entsprechende »Konvergenzrate« dagegen $(\log N)^d/N$, wobei d die Raumdimension ist. Verschiedene Konstanten und andere Details sind bei den Formeln außer Acht gelassen; der Vergleich bezieht sich also nur auf Wachstumsraten und nicht auf die genauen Werte.

Gratwanderung zwischen Regelmäßigkeit und Chaos

Eine Konvergenz mit $1/\sqrt{N}$ ist quälend langsam. Damit die Genauigkeit um eine weitere Dezimalstelle steigt, müssen 100-mal so viele Punkte in die Berechnung einbezogen werden; hat sie vorher eine Stunde gedauert, braucht sie nun plötzlich vier Tage. Der Grund für das Schneckentempo ist, dass bei echter Zufallswahl unweigerlich »Klumpen« und »leere Gebiete« auftreten. Liegen zwei Punkte nahe beieinander, bedeutet das vergeudete Rechenzeit, denn dieselbe Region ist dadurch doppelt vertreten. Sind gewisse Bereiche dagegen überhaupt nicht repräsentiert, vergrößert sich der Fehler.

Diesem Nachteil steht ein Vorzug von Zufallszahlen gegenüber: Die Konvergenzrate hängt nicht von der Dimension des Raums ab. In erster Näherung ist das Programm in Dimension 100 demnach genauso schnell wie in Dimension 2. Nicht so bei der Quasi-Monte-Carlo-Methode. Ohne den Faktor $(\log N)^d$ wäre sie dem klassischen Verfahren mit Zufallszahlen deutlich überlegen, denn dann hätte sie eine Konvergenzrate von $1/N$. Eine zusätzliche Dezimalstelle an Genauigkeit würde also nur den zehnfachen Rechenaufwand erfordern! Doch leider funkt der Faktor $(\log N)^d$ ziemlich störend dazwischen; er wächst mit zunehmendem d exponentiell an. In den Dimensionen 1 und 2 ist sein Einfluss noch gering, aber schon für $d = 10$ wird $(\log N)^{10}/N$ erst kleiner als $1/\sqrt{N}$, wenn N größer als 10^{43} ist.

Es war diese allseits bekannte langsame Konvergenz in höheren Dimensionen, die den Erfolg von Paskov und Traub bei CMO-Berechnungen für $d = 360$ so frappierend erscheinen ließ. Die einzige plausible Erklärung lautet, dass die »effektive Dimension« des betreffenden Problems in Wirklichkeit viel kleiner ist als 360. Offenbar erstreckt sich das gemessene Volumen nicht über alle 360 Dimensionen des abstrakten Raums – ähnlich wie ein Blatt Papier zwar dreidimensional ist, aber nicht viel verloren geht, wenn man seine Dicke vernachlässigt.

Diese Erklärung schmälert die Leistung der beiden Mathematiker etwas: Nicht dank eines überlegenen Verfahrens hatten sie Erfolg, sondern nur, weil sich das Problem als unerwartet einfach entpuppte. Noch bemerkenswerter erscheint, dass die Methode funktionierte, obwohl gar nicht klar war,

welche der 360 Dimensionen vernachlässigt wurden. Das wirkt schon ein wenig wie Zauberei.

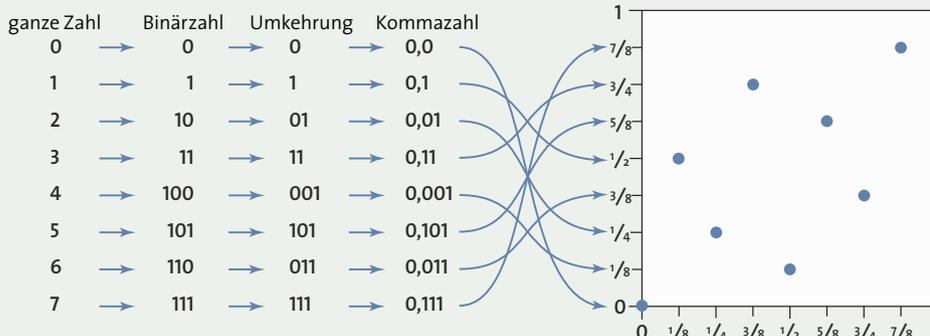
Handelt es sich um einen bloßen Glückstreffer, so dass sich das Phänomen einer reduzierten effektiven Dimension auf eine kleine Klasse von Problemen beschränkt? Oder tritt es öfter auf? Die Antwort steht noch aus; doch gibt eine neue Idee Anlass zu Optimismus: die »Konzentration des Maßes«. Demnach sind hochdimensionale Welten überwiegend eher glatt und eben – ähnlich einem Riesenplaneten, der durch seine ungeheure Anziehungskraft die Entstehung hoher Berge verhindert, weil das zu viel Energie erfordern würde.

Die Monte-Carlo-Methode ist keine wirklich neue Idee, ebenso wenig wie ihre Quasivariante. Schon vor mehr als 100 Jahren haben Darwins Halb Cousin Francis Galton (1822–1911), Lord Kelvin (1824–1907) und andere Forscher Simulationen auf der Grundlage zufälliger Stichproben ausprobiert. Diese Pioniere verwendeten noch echte Zufallszahlen – und entwi-

ckelten viel Fantasie bei deren Erzeugung. Die Monte-Carlo-Methode als solche wurde kurz nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs im Los Alamos National Laboratory entdeckt und erhielt dort auch ihren Namen – nicht ohne Grund. Die Wissenschaftler an dieser Forschungseinrichtung in New Mexico mussten gewaltige Probleme lösen, die teils noch beängstigender waren als CMOs, und konnten dabei auf die ersten Digitalcomputer wie ENIAC und MANIAC zurückgreifen, deren Rechenleistung allerdings weit unter der heutiger Taschenrechner lag. Es handelte sich um ein verschworenes Häuflein kreativer Problemlöser wie Stanislaw Ulam (1909–1984), John von Neumann (1903–1957), Nicholas Metropolis (1915–1999) und Marshall Rosenbluth (1927–2003).

Von Beginn an stützte die Los-Alamos-Gruppe ihre Untersuchungen auf Pseudozufallszahlen. »Wer arithmetische Methoden zur Erzeugung von Zufallszahlen einsetzt, versündigt sich natürlich«, verkündete von Neumann auf der ersten

Ein Rezept für Quasizufallszahlen



Verfahren für die Konstruktion von Mustern mit möglichst geringer Diskrepanz –

Abweichung von der gleichmäßigen Punktverteilung – waren schon vor der Entdeckung der Quasi-Monte-Carlo-Methode bekannt. In den 1930er Jahren fragte sich der niederländische Mathematiker Johannes G. van der Corput, ob sich eine unendliche Folge verschiedener Zahlen nacheinander so im Einheitsintervall (der Menge aller Zahlen zwischen 0 und 1) anordnen ließe, dass ihre Diskrepanz proportional zu $1/N$ oder sogar noch schneller gegen null geht. Die Antwort lautet Nein, wie Corputs Kollegin Tatjana van Aardenne-Ehrenfest (1905–1984) ein Jahrzehnt später bewies. Dennoch war die Arbeit des niederländischen Mathematikers Auslöser für die Konstruktion einer ganzen Familie quasizufälliger Punktmengen und -folgen mit geringer Diskrepanz. Dabei werden Zahlen (das heißt mathematische Größen) mit Ziffernfolgen (also ihrer Darstellung) kombiniert.

Die grundlegende Idee ist, eine ganze Zahl zu nehmen, ihre Ziffernfolge umzukehren, dann eine Null mit Komma davorzusetzen und das Ergebnis als Dezimalzahl zwischen 0 und 1 anzusehen. Dieses Verfahren lässt sich mit einer beliebigen Basis für das Zahlensystem ausführen. Für die Basis 2 etwa wird aus der Anfangszahl 100 (also 4 im Dezimalsystem) zunächst 001 und dann 0,001, die Binärzahl für $1/8$.

Um ein zweidimensionales quasizufälliges Muster mit N Punkten zu erzeugen, beginnen wir mit der Folge der natürlichen Zahlen, $i=0, 1, 2, \dots, N-1$. Für jeden zu konstruierenden Punkt nehmen wir i/N als x -Koordinate; die zugehörige y -Koordinate wird mit dem Van-der-Corput-Verfahren aus der Ziffernfolge für i gebildet. Oben sind die einzelnen Schritte und das Ergebnis im Fall $N=8$ gezeigt. Das quasizufällige Muster auf S. 89 wurde auf dieselbe Art für $N=1024$ konstruiert. Inzwischen gibt es viele weitere

Verfahren zum Erzeugen von Folgen mit geringer Diskrepanz. Die meisten beruhen ebenfalls auf der Kombination von Zahlen mit den Ziffernfolgen ihrer Darstellung. Einige lassen sich leicht auch auf beliebig hohe Dimensionen verallgemeinern.

Die so gewonnenen Muster zeichnen sich durch ein sorgsam ausbalanciertes Gleichgewicht zwischen Ordnung und Unordnung aus. Die Abstände zwischen den Punkten sind recht gleichmäßig; es gibt also weder Anhäufungen noch leere Bereiche, die bei zufälligen Punktmustern für eine große Diskrepanz sorgen. Allerdings dürfen die Punkte auch nicht in Reihen oder anderen regelmäßigen Strukturen angeordnet sein, was die Diskrepanz ebenfalls erhöhen würde. Das Austarieren dieser beiden gegensätzlichen Ziele ist im zweidimensionalen Fall nicht allzu schwierig; in höheren Dimensionen erfordert es jedoch einige Kompromisse.

Konferenz über Monte-Carlo-Methoden im Jahr 1949 augenzwinkernd – um dann ebendieser Sünde ausgiebig zu fröhnen.

Auch der Einsatz von Quasi-Monte-Carlo-Verfahren ließ nicht lange auf sich warten. Die erste Veröffentlichung dazu war 1951 ein Bericht von Robert D. Richtmyer (1910–2003), dem Leiter der theoretischen Abteilung in Los Alamos. Dieses Debüt geriet gleich höchst eindrucksvoll. Richtmyer nannte die Gründe für den Einsatz quasizufälliger Stichproben, führte einen Großteil der Terminologie ein und erläuterte die zugehörige Mathematik. In erster Linie lieferte er allerdings ein Dokument des Scheiterns. Der Los-Alamos-Forscher hatte zeigen wollen, dass Quasi-Monte-Carlo-Berechnungen schneller konvergieren. Doch war ihm das nicht gelungen. Berichte über negative Ergebnisse haben durchaus ihre Berechtigung, weil sie andere Forscher vor der Wiederholung nutzloser Experimente bewahren, aber sie können – wie in diesem Fall – auch weitere Untersuchungen auf einem an sich aussichtsreichen Feld verhindern.

Immerhin verfasste Stanisław K. Zaremba 1968, damals an der University of Wisconsin in Madison, eine Lobeshymne auf Quasizufallsstichproben – und eine Schmäherei auf Pseudozufallszahlen. Viele Konvertiten gewann er damit freilich nicht.

Zufall in homöopathischen Dosen

Dennoch kam die Untersuchung der mathematischen Eigenschaften von Folgen mit geringer Diskrepanz über die Jahrzehnte langsam, aber stetig voran. Besonders hervorzuheben sind die Beiträge von Klaus Friedrich Roth (deutschstämmiger Brite und Fields-Medaillen-Gewinner 1958), Ilja M. Sobol (russischer Mathematiker), Harald Niederreiter (heute an der Universität Singapur arbeitender österreichischer Mathematiker) und Ian H. Sloan (australischer Mathematiker an der University of New South Wales in Sydney). Inzwischen ist das Interesse an den Anwendungen der Methode wieder gewachsen, und das nicht nur bei den Analysten an der Wall Street. Vor allem in der Physik, aber auch in anderen Disziplinen werden sie immer populärer; zu den viel versprechenden Einsatzgebieten zählt etwa das Raytracing in der Computergrafik: das Nachverfolgen sämtlicher Lichtstrahlen von der Lichtquelle bis zum Auge des Betrachters, wodurch erst eine realistische Darstellung von dreidimensionalen Szenen möglich wird.

Die wechselnde Beliebtheit des Zufalls ist auch im Zusammenhang mit allgemeineren Trends zu sehen. Im mechanistischen physikalischen Weltbild des 19. Jahrhunderts galt er als unwillkommener Störenfried, der nur dort widerwillig toleriert wurde, wo es sich nicht vermeiden ließ – wie in der Thermodynamik und in Darwins Evolutionstheorie. Im 20. Jahrhundert dagegen kam der Zufall groß in Mode. Den Anstoß dazu gab wohl die Quantentheorie, die nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen erlaubte. Die Monte-Carlo-Modelle folgten. Paul Erdős (1913–1996) führte die zufällige Auswahl sogar in die Methodologie mathematischer Beweise ein – wo man sie wohl am allerwenigsten vermuten würde. In der

Computerwissenschaft entwickelten sich zufallsgesteuerte Algorithmen zu einem zentralen Forschungsthema. Der Zufall fand auch Eingang in die Kunst, etwa bei der aleatorischen Musik oder den Dripping-Gemälden von Jackson Pollock (1912–1956). In den 1980er Jahren entstand schließlich die Chaostheorie, der zufolge winzige zufällige Störungen enorme Auswirkungen haben können. In einem Essay aus dem Jahr 1967 nannte der Informatiker Alfred Bork (1926–2007) Zufälligkeit »ein Hauptmerkmal unseres Jahrhunderts«.

Heute jedoch scheint das Pendel wieder in die andere Richtung zu schwingen, vor allem in der Computerwissenschaft. Zufallsgesteuerte Algorithmen haben immer noch große praktische Bedeutung, aber die intellektuelle Herausforderung liegt inzwischen eher darin, zu beweisen, dass sich dieselbe Aufgabe auch mit einem deterministischen Programm lösen lässt. Spannend ist die Frage, ob eine solche »Entrandomisierung« wirklich bei jedem Algorithmus gelingt. Manche Theoretiker glauben das. Auch wenn sie Recht behalten, könnte es in bestimmten Fällen aber weiterhin zweckmäßig sein, den Zufall einzubeziehen.

Ähnliches gilt vermutlich für die Quasivariante, wobei hier das nötige Quäntchen Zufall in möglichst geringer Dosis verabreicht wird. Vielleicht steuern wir ja auf eine Art homöopathischer Doktrin zu, die besagt, dass die Wirksamkeit eines Heilmittels mit abnehmender Konzentration steigt. In der Medizin ist das zwar Unsinn, aber vielleicht funktioniert es in Mathematik und Informatik. ∞

DER AUTOR



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

QUELLEN

- Cafisch, R. E.:** Monte Carlo and Quasi-Monte Carlo Methods. In: Acta Numerica 7, S. 1–49, 1998
- Chazelle, B.:** The Discrepancy Method: Randomness and Complexity. Cambridge University Press, Cambridge 2000
- Kuo, F. Y., Sloan, I. H.:** Lifting the Curse of Dimensionality. In: Notices of the American Mathematical Society 52, S. 1320–1328, 2005
- Matousek, J.:** Geometric Discrepancy: An Illustrated Guide. Springer, Heidelberg 1999/2010
- Paskov, S. H., Traub, J. E.:** Faster Valuation of Financial Derivatives. In: Journal of Portfolio Management 22, S. 113–121, 1995

WEBLINKS

www.puc-rio.br/marco.ind/quasi_mc.html
Beschreibung des Quasi-Monte-Carlo-Verfahrens

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1135755

© American Scientist
www.americanscientist.org



Walter Lewin

Es funktioniert!

Vom Vergnügen, endlich Physik zu verstehen

Aus dem Amerikanischen von Helmut Reuter.

Knaus, München 2011. 384 S., € 19,99

PHYSIK

Liebeserklärung eines Forschers

Der Leser betritt die Welt eines Mannes, der sein Leben der Physik verschrieben hat, und findet sich in einem Alltag voller Wunder wieder.

Walter Lewin ist ein begnadeter Dozent. Mehr als 30 Jahre lang hat er seine Studenten am MIT für Physik begeistert; Millionen Zuschauer betrachteten die Aufzeichnungen seiner Vorlesungen im Internet. Nun will er auch seinen Lesern »die Unschuld nehmen«: Ein einziger Blick durch physikalisch trainierte Augen kann die Wahrnehmung der Welt verändern – davon ist Lewin überzeugt.

Bereits im ersten Kapitel versteht es der außergewöhnliche Physikprofessor, Anekdoten aus seinem wissenschaftlichen Alltag behutsam mit anschaulichen Ausflügen in die Theorie zu weben: von weißen Wolken und blauem Himmel bis zur Ausdehnung des Universums. Es folgen ergreifende Kindheitserinnerungen aus seiner jüdischen Familie in den Niederlanden, die von

den Nazis zum Teil ermordet, zum Teil in alle Winde verstreut wurde. Ist das Buch doch eher eine Biografie?

Die folgenden Kapitel erinnern an eine Vorlesungsserie – so klar gegliedert, dass man mühelos Themen überspringen kann, die man schon in der Schule gehasst hat, wie Druck, Akustik und Bewegungsgesetze. Aber lassen Sie sich zumindest Lewins wundervolle Ausführungen zu den Geheimnissen des Regenbogens nicht entgehen! Einige Tage nach Lektüre des Buchs beobachtete ich einen prächtigen doppelten Regenbogen in der Abendsonne, und Lewin behielt Recht mit dem, was er die »Schönheit des Wissens« nennt. Wer die Physik des Regenbogens begreift, sieht ihn mit anderen Augen.

Auch die Themen, die nicht so offensichtlich zu Lewins Favoriten gehören wie atmosphärische Lichtspiele, erklärt er lebensnah und routiniert. Aber seine eigentliche Liebe gehört der Astrophysik. Hier hat er Karriere gemacht und war an bahnbrechenden Entdeckungen beteiligt. So wirkt die erste Hälfte des Buchs wie eine hastig absolvierte Vorbereitung, bis er in Kapitel 10 endlich zu »Röntgenstrahlen aus dem Weltall« kommen kann. Bis zum Schluss bleibt Lewin dabei und reißt den Leser immer tiefer in die Geschichte der Röntgenastronomie, die auch seine eigene ist. In Kapitel 14 wird es spannend wie im Kriminalroman, als Lewin mit seinen Messungen versehentlich die nationale Sicherheit gefährdet und sogar seine

sowjetischen Kollegen überreden muss, ihre seltsamen Daten zurückzuhalten.

Ein meisterhafter Erklärer kann auf Bilder verzichten, aber Lewin tut das überraschend konsequent. Das ganze Buch enthält nur sieben kleine Bilder. Viel häufiger verweist er auf ergänzendes Material im Internet, wie die Videos seiner Vorlesungen oder Fotos von physikalischen Phänomenen – ein unbequemer Ersatz, der überdies von der im Internet üblichen raschen Veraltung bedroht ist.

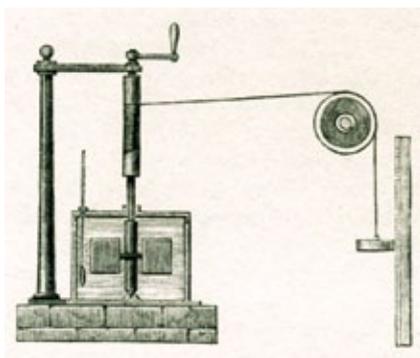
Die deutsche Übersetzung entscheidet sich oft dagegen, die direkte Ansprache »you« zu übernehmen, mit der Lewin – beziehungsweise sein Ghostwriter Warren Goldstein – im englischsprachigen Original »For the Love of Physics« seine Ideen dem Leser nahebringt. Die unpersönlichere deutsche Variante »man« verleiht dem Text eine etwas distanzierte und verstaubte Note. Dazu gesellen sich vereinzelt Fehler bei der Übersetzung von Zahlenwerten und Kleinigkeiten, die in einer ersten Auflage aber verzeihlich sind.

Im letzten Kapitel schreibt Lewin von seiner Liebe zur Kunst und verleiht dem Buch wieder den Hauch einer Biografie. Nur in Randbemerkungen erfährt der Leser von persönlichen Ereignissen wie einer schweren Herzoperation, oder dass seine erste Ehe an seiner Hingabe für die Forschung scheiterte. Über die Person Walter Lewin weiß ich auch nach Ende der Lektüre nicht viel, wohl aber über den Wissenschaftler, der im Flugzeug Fensterplätze abhängig von Flugzeit und -richtung bucht, um die beste Sicht auf berechenbare atmosphärische Erscheinungen zu haben.

Wie in seinen Vorlesungen wird es Lewin gelingen, Menschen für etwas zu begeistern, was sie vorher nur als Pflichtfach wahrgenommen haben. Auch wer längst die Schönheit der Physik erkannt hat, wird von ihm lernen können, über Alltägliches wie das Trinken mit dem Strohalm oder über Kosmisches wie Röntgendoppelsternsysteme.

Mike Beckers

Der Rezensent ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.



So bestimmte James P. Joule (1818–1889) das mechanische Wärmeäquivalent: Die potenzielle Energie des Gewichts rechts wird durch die Schaufelräder in Wärmeenergie umgewandelt.



Marcel Robischon

Planet der Insekten

Von duftenden Ameisen, betrügerischen
Leuchtkäfern und gespenstischen Faltern

Haupt, Bern 2011. 224 S., € 39,90

ZOOLOGIE

Vermenschlicht, aber prachtvoll anzusehen

Marcel Robischon setzt die Vielfalt der Insekten eindrucksvoll ins Bild. Manche Metaphern sind allerdings fragwürdig.

Es gibt so viele Insektenarten, dass eine intensive wissenschaftliche Beschäftigung mit ihnen allen und ihrem Verhalten das Forschungsvermögen der Zoologen überfordern würde. Derzeit sind etwas mehr als eine Million Arten beschrieben; insgesamt sollen es – je nach Quelle – zwischen 2 und 30 Millionen sein. Die Gesamtzahl der Individuen ist noch eindrucksvoller: Auf jeden menschlichen Bewohner unseres

Planeten kommen schätzungsweise 1,5 Milliarden Insekten! Bei solcher Vielfalt erweist sich schon die Abgrenzung zweier Arten als besonders schwierig, weil verwandte Arten einander häufig zum Verwechseln ähnlich sind.

Marcel Robischon, gelernter Forstwirt und Akademischer Rat an der Universität Freiburg, verzichtet denn auch im weiteren Verlauf des Textes auf genaue Zahlen zu den einzelnen Gruppen und überhaupt auf die biologische Klassifizierung als Ordnungsprinzip. So bleibt mehr Raum für das übrig, was man etwas altertümlich als Naturgeschichte bezeichnet.

Kein Blatt: Der Zitronenfalter überwintert als voll entwickeltes Insekt und ist dadurch als einer der Ersten im Frühling aktiv.



BILDWINKEL / G. STAHLBAUER

Statt besonders interessante Arten (zum Beispiel den Totenkopfschwärmer) aus besonders interessanten Ordnungen (Schmetterlinge) zu betrachten, sucht Robischon nach neuen Blickwinkeln auf seine zahlreichen Beispiele. So verwendet er im Kapitel »Grüne Paläste« die Gallenbildung bei vielen nicht miteinander verwandten Pflanzen sowie deren chemische Steuerung durch Hautflügler, Fliegen, Käfer, Schmetterlinge oder Ameisen, um dann ausführlich zu erklären, was dabei alles geschieht. Neben der allgemeinen Begeisterung für das Gebiet erkennt man seine speziellen Vorlieben für Schmetterlinge, für Gerüche und deren Biochemie, für Inseln und für Stoff-, Energie- und Informationsströme.

In den 19 Kapiteln mit jeweils einem Schwerpunkt geht es unter anderem um die Auswirkung der Isolation auf die Artbildung (»Inselgeschichten«), um das Verschwinden von Arten – manchmal ehe sie überhaupt entdeckt und beschrieben wurden (»Der stille Artentod«) – oder um die Verschleppung von Insekten in fremde Regionen und die damit verbundenen Gefahren (»Entomologische Globalisierung«).

Dank seiner tiefen Kenntnisse in Wissenschafts- und Kulturgeschichte kann Robischon seine Texte um äußerst interessante Anekdoten bereichern. So erinnert er an längst vergessene Forscher, die so manche »moderne« Erkenntnis schon viel früher geäußert haben. Und die Flöhe betrachtet er nicht nur biogeografisch (welcher Floh bei wem und wo) und evolutionär (Artspezifität von Wirt und Parasit), sondern schließt gleich noch eine umfangreiche Geschichte des Flohzirkus an.

Gelegentlich gewinnt man den Eindruck, dass die Überfülle an mitteilenswerten Einzelheiten den Verfasser selbst überwältigt hat. Nur so ist es zu erklären, dass er an mehreren Stellen unvermittelt in reinen Wissenschaftsjargon verfällt. Im an sich gut gelungenen Kapitel »Piratenfeuer – kaltes Licht für heiße Liebe« (was für eine Vorankündigung!) geht es um die Biolumineszenz, also die Erzeugung von Licht durch Lebewesen. Nur mutet Robischon

dem Leser die Erklärung zu, dass »der Trick in der chemischen Reaktion des Luciferins mit der energiereichen Substanz Adenosintriphosphat (besteht), die durch das Enzym Luciferase katalysiert wird«. Auch das Register lässt den Leser hier völlig allein. Dafür entschädigen die fantastischen Bilder der Tiere mit ihrem Leuchten in der Nacht.

Ärgerlich, weil unzulässig vermenschlichend in einem Buch mit wissenschaftlichem Anspruch, sind manche der Kapitelüberschriften und besonders einige der Zwischentitel: »Schwarzfahrer und Brautleute« (Verbreitung durch den Wind), »Parfüm und Parasiten« (Düfte und deren biologische Bedeutungen), »Wenn der Letzte das Licht ausmacht« (Verschwinden der Glühwürmchen), »Wegelagerer und Drogendealer« (Ameisengäste). Einige stilistische Eigenarten des Verfassers sind gewöhnungsbedürftig, so seine Vorliebe für Verbanhäufungen (»es krabbelt und wuselt und wimmelt und schwirrt«

gleich mehrfach) oder die Verwendung schiefer Bilder: Wer kommt schon darauf, dass mit »Hundertwasserhäusern« Pflanzengallen gemeint sind? Auch ein »hormonelles Wortgefecht« mit »rhetorischen Tricks« und »subtilen Untertönen« – hier sind es die Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Insekt – ist nicht erhellender als die dann zu gegebene Tatsache, dass das bis heute noch gar nicht völlig verstanden ist. Einige Rechtschreibfehler (»Gränze« statt »Grenze«) und mehrere falsch orientierte Bilder (so das Präparat einer Köcherfliege mit dem Kopf nach unten) hätte ein sorgfältigeres Lektorat vermeiden können.

Bilder, darunter manche doppelseitig, gibt es genug. Die meisten passen genau zum Text und sind von guter Qualität und hoher Aussagekraft. Einige aber fallen aus dem Rahmen, fast alle davon vom Autor selbst. Er folgt dabei einer Bildsprache namens »künstlerisch abstrakte Naturfotografie«, die

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

bei Wettbewerben derzeit nahezu alle Preise gewinnt. In solchen Fotos ist fast alles unscharf bis auf ein winziges Detail: bei der Zartschrecke auf dem Einband ein kleines Stück des Fühlers, beim Falter auf der Rückseite ein Auge und der Fühleransatz. Nichts gegen die künstlerische Absicht; wenn aber Dinge, auf die es ankommt, in der allgemeinen Unschärfe verschwinden, dann ist es nur Platzverschwendung, wie bei der Heuschrecke, die »auf einer artenreichen Wiese im Schwarzwald« lebt, bei der man aber weder die Heuschreckenart bestimmen noch den Artenreichtum anhand wenigstens einer Blüte nachvollziehen kann. Das Buch bietet genügend hervorragende Beispiele,

Erweitern Sie Ihren Horizont. Und zwar ins Unendliche.

Jetzt
im Miniabo
kennen
lernen!

Fordern Sie drei aktuelle Ausgaben von **Sterne und Weltraum** für nur € 15,30 (statt € 23,70 im Einzelkauf) an:*



06221 9126-743



service@spektrum.com



www.sterne-und-weltraum.de/miniabo



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

* Wenn ich innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt der dritten Ausgabe nichts von mir hören lasse, erhalte ich Sterne und Weltraum zum Vorzugspreis von nur € 85,20 inkl. Inlandsversand im Jahresabonnement (12 Ausgaben). Ermäßigter Preis (auf Nachweis) für Schüler und Studenten € 64,-. Ich kann das Jahresabonnement jederzeit kündigen, zu viel gezahltes Geld erhalte ich zurück. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Sievogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-743, Fax 06221 9126-751, service@spektrum.com, www.spektrum.com



Alex Bellos

Alex im Wunderland der Zahlen. Eine Reise durch die aufregende Welt der Mathematik

Aus dem Englischen von Bernhard Kleinschmidt. Bloomsbury, Berlin 2011. 480 S., € 24,-

Schon wieder so einer, der glaubt, das Wesentliche an der Mathematik seien die Zahlen (was nur geringfügig weniger absurd ist als die Behauptung, das Wesentliche an der Literatur seien die Buchstaben). Der britische Journalist Alex Bellos ist überaus reisefreudig. Von einem schrägen Typ aus Arizona lässt er sich den albernsten Tiefsinn über besondere Eigenschaften kleiner Zahlen erzählen; vergeblich sucht er nach Beziehungen zwischen der »vedischen Multiplikation« (die man nicht unbedingt kennen muss) und altindischen Weisheiten. Aber zugleich liefert er uns eine Tour de Force durch die klassische Geometrie, Evergreens wie die Paradoxien des Unendlichen und die Fallstricke des Glücksspiels, zum Schluss sogar Perlen wie die hyperbolische Geometrie und Hilberts Hotel mit den unendlich vielen Zimmern. Das alles erzählt Bellos so kurzweilig, eingängig – und korrekt –, dass man seine esoterischen Abwege mühelos vergessen kann.

CHRISTOPH PÖPPE



Hugh Aldersey-Williams

Das wilde Leben der Elemente. Eine Kulturgeschichte der Chemie

Aus dem Englischen von Friedrich Griese. Hanser, München 2011. 461 S., € 24,90

Chemische Elemente haben kein Leben – schließlich sind sie unvergänglich –, und auch ihre Wildheit hält sich in Grenzen: Dass sie sich in heißen Partynächten austoben, wäre mir neu. Da ist der Verlag auf der Suche nach einem griffigen Titel deutlich übers Ziel hinausgeschossen; aber das wäre gar nicht nötig gewesen. Passend zum dezenteren Originaltitel »Periodic Tales. The Curious Lives of the Elements« bietet das Buch ein Potpourri ebenso kurioser wie wissenswerter Fakten über die Entdeckungsgeschichte, die technischen Anwendungen und – eine besondere Delikatesse – die künstlerische Bedeutung der Elemente. Die Chemie bleibt zwar weitestgehend ausgespart; insofern verspricht der deutsche Untertitel zu viel. Trotzdem dürfte sich gut bedient fühlen, wer auf unterhaltensame Weise Interessantes über die Bausteine unserer Welt erfahren möchte.

GERHARD TRAGESER



Hubert Filser

Das erste Mal.

Das erste Werkzeug, die erste Musik, das erste Bier, die ersten Künstler, das erste Haustier, die ersten Kleider

Ullstein, Berlin 2011. 336 S., € 18,-

Wer beim täglichen Blick auf die Schlagzeilen am Sinn des Experiments Menschheit zweifelt, dem sei dieses Buch empfohlen. Der Wissenschaftsjournalist Hubert Filser fragt letztlich nach den Besonderheiten unserer Spezies und findet sie in einer fernen Vergangenheit. Welchen Sinn macht das Sprechen? Ist »Pst!« vielleicht ein Relikt der ersten Worte? Wie und warum kamen unsere Vorfahren auf die Idee, ein Feuer zu machen? Filser hat namhafte Experten befragt und macht sich seine eigenen Gedanken. Etwa, dass letztlich alle Menschen einen Migrationshintergrund haben, verließen unsere Ahnen doch in mehreren Auswanderungswellen ihre Heimat in Afrika. Der Journalist stellt Bezüge her und entwickelt Szenarien, um vergangene Lebenswelten anschaulich zu machen, bleibt dabei aber stets auf dem Boden der Wissenschaft.

KLAUS-DIETER LINSMEIER



Max J. Kobbert

Das Buch der Farben

Primus, Darmstadt 2011. 240 S., € 39,90

Was ist eigentlich Farbe? Goethe hielt seine Antwort auf diese Frage, die »Farbenlehre«, für bedeutender als sein gesamtes poetisches Schaffen. Farbstoff, elektromagnetische Welle, physiologische Wahrnehmung, individuelles Erleben – diese Bedeutungen »entmischt« der Wahrnehmungspsychologe Max J. Kobbert in seinem reich illustrierten Werk. Verständlich formulierte, anekdotenreiche Ausführungen umfließen Kunstwerke, optische Illusionen und reizvolle Fotografien so geschickt, dass die Lektüre niemals anstrengend wird. Eine Fülle von Einzelphänomenen aus Kunst, Natur und Wissenschaft vermischt sich schließlich wieder zu einem Bild davon, wie der Eindruck von Farbe entsteht. Goethe zog übrigens die falschen Schlüsse über die Physik des Lichts. Nach Lektüre des Buchs ist aber klar: Farbe lässt sich nicht auf Physik reduzieren.

MIKE BECKERS

wie man trotz »Abstraktion« von der Umgebung geradezu abenteuerlich genaue Details der wunderbaren Tiere zeigt. Man betrachte nur den Schwarzkäfer auf dem Wüstensand und die beiden Wachtelweizenschneckenfalter,

die den gelungenen Abschluss dieses Buchs bilden.

Ein sehr inhaltsschweres, informationsreiches, am Stand der Forschung orientiertes Insektenbuch mit kleinen Mängeln, die man in einer – wün-

schenswerten – zweiten Auflage beheben sollte.



Tobias Hürter

Du bist, was du schläfst

Was zwischen Wachen und Träumen alles geschieht

Piper, München 2011. 272 S., € 19,99

SCHLAFFORSCHUNG

Freund Morpheus

Das bewusste Drittel unseres Lebens ist nicht verschwendet: Wesentliche Züge unserer Persönlichkeit bilden sich im Schlaf.

Ist Schlafen Zeitverschwendung? Warum müssen wir täglich viele Stunden ohne Bewusstsein verbringen? Das wollte Tobias Hürter schon als Kind nicht einsehen – und vor allem die Kontrolle nicht abgeben. Warum reicht es nicht, still dazusitzen, um sich zu erholen? Warum verbringt ein Mensch rund sechs Jahre seines Lebens mit Träumen? Macht Schlafen schön?

Als mittlerweile 39-Jähriger hat der Wissenschaftsjournalist und Mathematiker Tobias Hürter die Ergebnisse unzähliger Studien zusammengetragen und dabei – neben viel Falschem und Überholtem – wissenschaftlich fundierte Antworten auf all diese Fragen gefunden. Die Kindheitsvorstellung von der Entbehrlichkeit des Schlafs musste er dabei aufgeben. Schlaf formt die Persönlichkeit, bewertet Erinnerungen emotional und baut das Weltbild aus. »Wer Mensch sein will, muss schlafen.«

Das Buch hat seine eigene Note, wie schon das Inhaltsverzeichnis zeigt. Jedes Kapitel hat eine Uhrzeit zwischen 21 Uhr und 7.30 Uhr am nächsten Morgen; »die Dauer eines typischen Nachtschlafs« soll zum Durchlesen reichen.

Konsequenterweise geht die Erzählung von der Dämmerung über das Einschlafen, den REM- und den Tiefschlaf bis zum Aufwachen. Dazwischen geht es um Phänomene wie Schlafwandeln, Gähnen, Klarträumen oder Schlafentzug. Hürters Fakten sind oft verblüffend. Wer hätte gedacht, dass bis ins Mittelalter der Nachtschlaf der Menschen aus zwei deutlich getrennten Phasen bestand? Dass Elefanten nur drei Stunden Schlaf brauchen und Giraffen nicht gähnen? Sie enthalten aber auch Desillusionierungen: Schlafen macht leider nicht schlank.

Viele Kapitel beginnen mit einer kurzen Geschichte, die eine Frage aufwirft. Die klärt der Autor dann mit Hilfe wissenschaftlicher Studien. Der Weg der Forschung zur jeweiligen Erkenntnis war lang – teilweise beginnend mit Aristoteles –, mühsam und oft grotesk verschlungen. Bis vor wenigen Jahrzehnten vertraten die Wissenschaftler unhaltbare Positionen – das ist dem Schlafmuffel Hürter persönlich nicht anders gegangen. Aber manche Hartnäckigkeit erregt selbst heute noch Kopfschütteln, so die Suche nach einer »Es-

senz des Schlafs«. Ein Forscher namens John Pappenheimer verarbeitete tausende Liter Urin, um am Ende sieben millionstel Gramm einer »Essenz« zu gewinnen – die dann keine war. Inzwischen weiß man, dass »die Chemie des Einschlafens viel zu komplex und umfassend ist, um von einer einzelnen Substanz gesteuert zu werden«. Auch die Theorie, Träume seien sinnloses Synapsengeflimmer, hielt sich über mehr als drei Jahrzehnte.

Die Prozesse in Gehirn und Körper beschreibt Hürter präzise, eingängig und – dank seiner lockeren und anschaulichen Sprache – unterhaltsam. Die einfallsreichen Vergleiche tragen zum Verständnis bei. Wer hätte erwartet, dass Gehirnwellen im Prinzip »La Ola durch Zuschauerränge der Stadien« gleichen? Einige Grundkenntnisse über Nervenzellen und neurologische Messverfahren wie das Elektroenzephalogramm (EEG) sind trotzdem hilfreich.

Humorvolle Abbildungen und eingestreute Fallgeschichten lockern das Buch auf. Nur einige Kapitel wie das über den REM-Schlaf enthalten etwas zu reichlich Information. Das Werk ist kein Ratgeber, sondern eine Sammlung von Antworten auf häufig gestellte Fragen. Hürter bewertet die Erkenntnisse nicht, er stellt den aktuellen Wissensstand dar, samt Quellenangabe im ausführlichen Literaturverzeichnis.

Einige Tipps gibt es dann doch – zum Beispiel, dass es zum Einschlafen hilft, das Gesicht mit einem Föhn zu erwärmen. Doch im Vordergrund steht das amüsant aufbereitete Wissen zum Schlaf. Und die Einsicht: »Die Frage, warum wir schlafen, ist ebenso sinnlos wie die Frage, warum wir wach sind.«

Gabi Warnke

Die Rezensentin ist Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



Ein Reifen für den Weltraum

Raumstation zum Aufblasen

»Eine Rakete befördert dieses Paket in den Weltraum. Es enthält aufblasbare Raumfahrerstationen, die wie große Reifen geformt sind und im Innern Wohnraum für eine oder zwei Personen bieten. Goodyear baut eine Teststation von 7,20 m Durchmesser, die von der N.A.S.A. erprobt werden soll. Das Gebilde wird erst im Weltraum aufgeblasen. Die Injektion eines schnell härtenden Kunststoffes zwischen den Wandungen macht die Struktur fest.« Populäre Mechanik 77, Februar 1962, S. 30

Reinraum für Frühchen



»Als einmalig in der Welt gilt zur Zeit die Frühgeburtstation der Universitätsklinik in Homburg/Saar. In einem Plexiglaszylinder wird die Temperatur bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % ständig auf 30° C gehalten. Entkeimte Luft wird zugfrei in den Zylinder eingeführt. Welche Bedeutung einer modernen Frühgeburtstation zukommt, kann daraus ersehen werden, daß 10 % aller Neugeborenen in Deutschland Frühgeburten sind und daß im Durchschnitt 30–50 % von ihnen sterben.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Februar 1962, S. 70

Quarzuhr für jedermann

»Die außerordentlich hohe Stabilität der Tunneldiode als Frequenzteiler und des Quarzkristalls als Schwingungserzeuger wurde dazu benutzt, eine kleine Uhr zu bauen, die pro Jahr höchstens 5 sec verliert oder gewinnt. Die elektronischen Elemente verbrauchen nur sehr wenig Energie, so daß die Uhr monatelang mit einer kleinen Batterie betrieben werden kann.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 4, Februar 1962, S. 122



Ein direkter Vorfahre des Desertec-Projekts (rechts): Solarthermie für Ägypten



Magnet statt Skalpell

»Zur Entfernung von Fremdkörpern aus dem Auge sind häufig operative Eingriffe erforderlich, die nur dann Erfolg versprechen, wenn sich die Lage des Splitters durch Röntgendurchleuchtung feststellen lässt. Da es sich meistens um magnetisierbare Fremdkörper (Eisenfeilspäne usw.) handelt, lag die Anwendung kräftiger Elektromagneten nahe, und wirklich hat der Versuch gezeigt, dass die Splitter schnell aus dem Auge gezogen werden. Die Vorrichtung gestattet natürlich auch das Herausziehen von Eisenfeilspänen usw. aus anderen Körperteilen.« Prometheus 1162, Februar 1912, S. 287–288



Ein Spezialelektromagnet, der Augenoperationen und Röntgendurchleuchtung ersetzte, wurde an der Universität Zürich entwickelt. Der Arzt steuerte die Feldstärke über einen Fußschalter.

Solarbetriebene Dampfmaschine

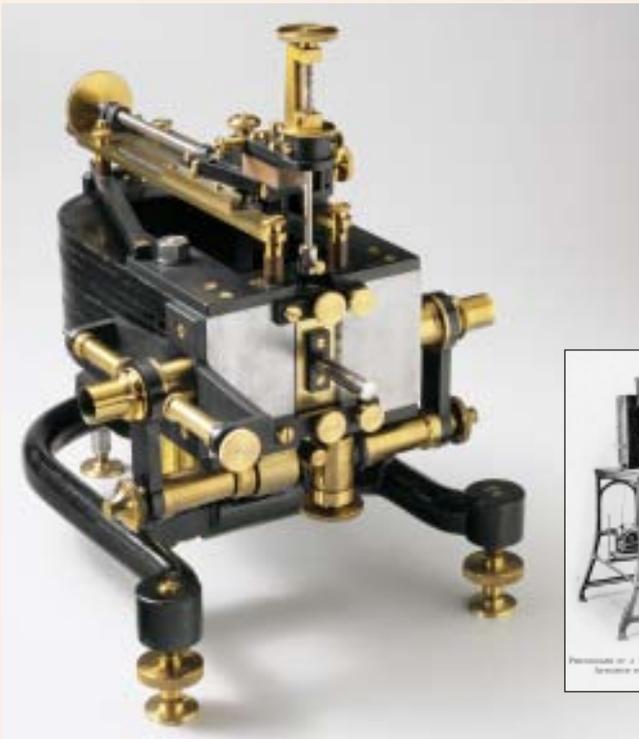
»Eine für Aegypten bestimmte Kraftstation stellt unsere Abbildung dar. Wir finden hier eigenartig angeordnete, zur Verdampfung von Aether dienende Apparate. Mit Hilfe seiner Stützfüsse kann jeder Verdampfer in eine Stellung senkrecht zu den Sonnenstrahlen gebracht werden. Ausserdem sind noch auf beiden Seiten Spiegel angebracht. Jeder Verdampfer ist mit einem Ableitungsrohr für den Dampf versehen, der in einen Sammler eintritt und der zu betreibenden Niederdruckmaschine zugeführt wird.« Die Welt der Technik 3, Februar 1912, S. 51–52

Die Gründe der Tat

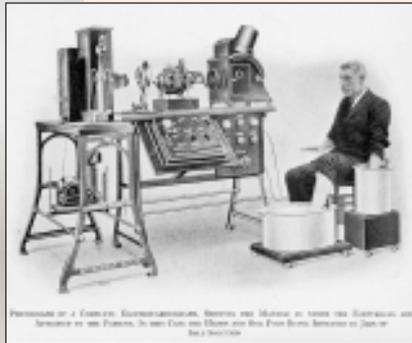
»An 600 wegen Eigentumvergehens bestraften Mannespersonen hat Gefängnisdirektor Grundvig, Kopenhagen, festgestellt, ob der Dieb in Not war oder nicht. Unter Not versteht Grundvig dringendes Bedürfnis nach Essen, Kleidung, Wohnung. Werden diejenigen ausgeschieden, die während der Tat berauscht waren, so bleiben nur 13½ % übrig, die wirklich aus Not gestohlen haben.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 6, Februar 1912, S. 121–122

Herzströme – die Geburt der Elektrokardiografie

GROESSE FOTO: DEUTSCHES MUSEUM, KLEINES BILD: PUBLIC DOMAIN



Wegbereitend für die moderne Elektrokardiografie war das Saitengalvanometer Willem Einthovens (hier ein Gerät, das 1906 von einem renommierten Instrumentenbauer in München gefertigt wurde). Deutlich zu sehen ist der waagrecht liegende Hufeisenmagnet. Die Saite liegt senkrecht dazu im Inneren des Geräts – daher nicht sichtbar – und kann mit der Stellschraube im oberen Teil nachgespannt werden. Rechts und links befindet sich die Beobachtungsoptik.



Das Saitengalvanometer in der praktischen Anwendung: Es ist mittig auf dem Tisch angebracht.

Auf dem ersten internationalen Kongress für Physiologie in Basel 1889 unternahm der britische Physiologe Augustus D. Waller einen Selbstversuch: Er hielt eine Elektrode in der Hand, steckte einen Silberlöffel in den Mund und verband beides über ein Kapillarelektrometer. Dieses Messgerät hatte der französische Physiker Gabriel Lippmann 1872 entwickelt: Floss Strom durch einen Quecksilberfaden in einem Kapillarröhrchen, der mit verdünnter Schwefelsäure bedeckt war, veränderte sich dort seine Wölbung. Mit einem Mikroskop ließ sich diese Änderung messen. Waller bewies damit, dass der Herzschlag mit schwachen elektrischen Spannungen einhergeht.

Angeregt durch diesen Versuch widmete sich unter anderem Willem Einthoven (1860–1927) der Elektrophysiologie. Er war wenige Jahre zuvor, im Alter von 25 Jahren und frisch promoviert, an die Universität Leiden berufen worden. Um einen guten elektrischen Kontakt zur Haut herzustellen, tauchte er Hände oder Füße der Probanden in Salzlösung. Mit dem Kapillarelektrometer konnte er 1900 nachweisen, dass Herzerkrankungen die Spannungskurven, genannt Elektrokardiogramme (EKG), verändern.

Da ihm das Instrument aber zu unzuverlässig und zu unpraktisch erschien, griff Einthoven eine Idee aus der Nachrichtentechnik auf, mit der man die schwachen Morsezeichen am Ende eines Transatlantikkabels lesen konnte. Er spannte einen sehr dünnen Draht senkrecht zu einem starken Magnetfeld. Floss elektrischer Strom durch diese Saite, wurde sie je nach Stromstärke ausgelenkt. Ein Lichtstrahl

warf ihren Schatten auf einen Schirm, so dass man die Bewegung mit einem Okular beobachten beziehungsweise auf einem Film aufzeichnen konnte.

Das Saitengalvanometer, das Einthoven 1901 präsentierte, registrierte noch Milliardstel-Ampere-Ströme. Wog der Prototyp ganze 150 Kilogramm – die hauptsächlich auf das Konto des Hauptmagneten gingen –, waren die bald darauf von Firmen vertriebenen Geräte deutlich leichter. Beispielsweise brachte es das hier abgebildete Instrument, 1906 vom renommierten Physikalisch-Mechanischen Institut in München gebaut, auf nur 40 Kilogramm.

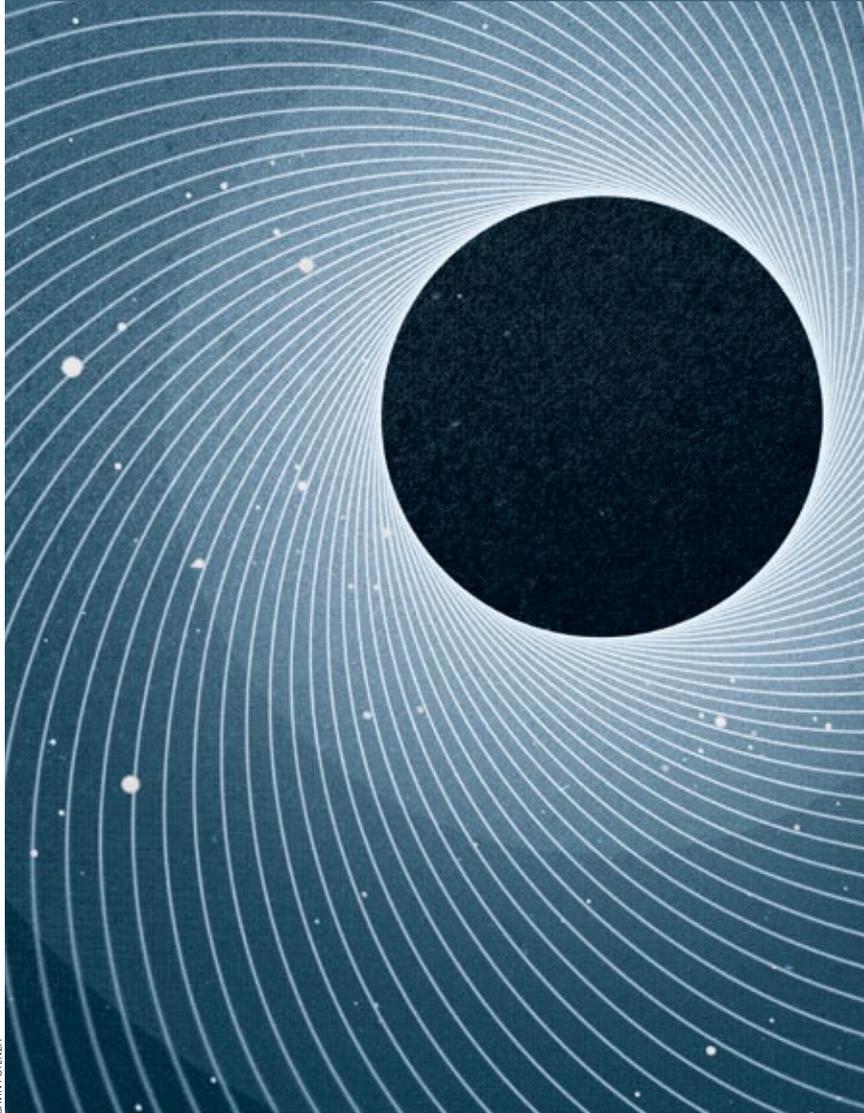
Einthoven entwickelte ein noch heute gültiges Standardverfahren, um EKGs aufzunehmen. Dabei werden drei Spannungskurven abgeleitet: zwischen den beiden Armen, zwischen rechtem Arm und linkem Bein sowie zwischen Arm und Bein auf der linken Körperseite. Außerdem legte der Forscher die theoretischen Grundlagen zur EKG-Analyse und beschrieb beispielsweise, wie sich ein Herzkammerflimmern in den Kurven darstellt.

Nach dem Ersten Weltkrieg brachte die Firma Siemens ein kleines, fahrbares EKG-Gerät auf den Markt, das die weitere Verbreitung der Elektrokardiografie förderte. Diese entwickelte sich zu einem der wichtigsten diagnostischen Verfahren in der Kardiologie. 1924 erhielt Einthoven als Pionier und Begründer der Methode den Nobelpreis für Medizin.

Der Ingenieur und promovierte Technikhistoriker **Frank Dittmann** ist Kurator der Abteilung Energie-, Starkstrom- und Automatisierungstechnik.

Giganten des Weltalls

Die größten Schwarzen Löcher vereinen die Masse von Milliarden Sonnen in sich. Erstaunlicherweise entstanden einige dieser Objekte schon sehr früh im Universum. Entwickelten sie sich tatsächlich aus dem Kollaps einzelner Sterne?



GAVIN POTENZA

Tank oder Teller?

Viele Biokraftstoffe werden aus essbaren Pflanzen gewonnen. Ihre massenhafte Herstellung beansprucht riesige Anbauflächen, die dann nicht mehr für die Produktion von Nahrungsmitteln zur Verfügung stehen. Raffinierte Verfahren sollen helfen, diese Konkurrenz zu entschärfen

Neue Waffen gegen Krebs

Um den todbringenden Wucherungen beizukommen, setzen Wissenschaftler inzwischen vermehrt auf Impfstoffe und andere Therapeutika, die Immunreaktionen gegen Tumoren hervorrufen



VICTOR DEAK

Evolution der Großeltern

Die zunehmende Zahl Älterer vor etwa 35 000 Jahren war womöglich das Erfolgsgeheimnis unserer Spezies: Sie könnte die Verbreitung neuer Werkzeuge vorangetrieben und damit auch dazu beigetragen haben, dass der moderne Mensch archaischere Gruppen wie den Neandertaler verdrängte



KEVIN VAN AELST

Ausflug ins Fleischlabor

Wie lässt sich der dramatisch wachsende Appetit der Weltbevölkerung auf Schnitzel, Steak und Würstchen zufrieden stellen, ohne den Planeten damit zu Grunde zu richten? Für einige Forscher lautet die Antwort: Fleisch züchten – in der Petrischale!

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

Dem Zahn der Zeit zum Trotz

Wie Wissenschaftler mit Hightech
unser Kulturerbe retten



Forschungsallianz
Kulturerbe

getragen von



Stiftung
Preußischer Kulturbesitz



Leibniz
Gemeinschaft



Fraunhofer

Eine Publikation in Zusammenarbeit mit **Spektrum**
DER WISSENSCHAFT

Die »Forschungsallianz Kulturerbe«

Seit 2008 bündeln Fraunhofer-Gesellschaft, Leibniz-Gemeinschaft und Stiftung Preußischer Kulturbesitz ihre natur-, geistes- und kulturwissenschaftlichen Kompetenzen in der »Forschungsallianz Kulturerbe«. Ziel ist es, gemeinsam neue Verfahren, Materialien und Technologien für die Restaurierung und Konservierung von Kulturgütern zu entwickeln und zu erproben.

Die Identität eines Landes oder einer Staatengemeinschaft gründet auf den Eigenheiten ihrer kulturellen Entwicklung. So macht gerade die Fülle des vielfältigen Kulturerbes eine Besonderheit des immer stär-

ker zusammenwachsenden Europas aus und lässt die Geschichte seiner Bevölkerung stets erfahrbar sein und bleiben. Die Zeugnisse der Vergangenheit – Schriftstücke, Gemälde, Skulpturen oder historische Gebäude, aber auch Alltagsgegenstände und industrielle Relikte – besitzen somit eine hohe, weit über ihren finanziellen Wert hinausreichende Bedeutung.

Kulturgüter haben eine besondere Strahlkraft. Sie ziehen Ströme von Menschen an und sind längst zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor geworden: Die Welttourismusorganisation schätzt, dass im Jahr 2020 rund 700 Millionen Touristen Europa besuchen werden. 1995 waren es noch wenig mehr als 336 Millionen. Allein Deutschlands Museen zählen pro Jahr über 100 Millionen Besucher.

Doch Kulturgüter sind keine erneuerbaren Ressourcen – was einmal zerfallen oder zerstört ist, ist unwiederbringlich verloren. Sie bedürfen deshalb des bestmöglichen Schutzes. Ihre Erhaltung stellt somit auch eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe von hoher Priorität dar.

Allerdings sind die schädlichen Einwirkungen auf Kunstwerke und Kulturgüter meist derart komplex, dass ihre Konservierung nach interdisziplinären Lösungsansätzen verlangt. Gezielte Forschung und Entwicklung innovativer, nachhaltiger Technologien tragen maßgeblich zur Erhaltung des kulturellen Erbes bei. Die »Forschungsallianz Kulturerbe« koordiniert diesen Prozess und fördert den Wissenstransfer zwischen Forschung und Restaurierungspraxis. Gemeinsam setzt sich das Bündnis für



STIFTUNG PREUSSISCHER KULTURBESITZ / FOTO BILDSCHÖN

Hermann Parzinger, Präsident der Stiftung Preußischer Kulturbesitz:

»Die Sammlungen und Bestände der Stiftung Preußischer Kulturbesitz besitzen Weltrang und sind unabdingbarer Bestandteil des kulturellen Gedächtnisses. Sie machen kulturelles Schaffen aus allen Teilen der Welt erfahrbar, von den Anfängen der Menschheitsgeschichte bis zur Gegenwart. Die Stiftung agiert als Scharnier zwischen Kunst und Kultur einerseits, Forschung und Bildung andererseits. In den Museen, Bibliotheken und Archiven der Stiftung Preußischer Kulturbesitz finden sich Kulturgüter unterschiedlichster Materialien und Techniken, zu deren Erhalt dringend neue Lösungsansätze gesucht werden müssen. Mit Hilfe der Forschungsallianz Kulturerbe soll die deutsche Forschung in diesem Bereich wieder eine führende Rolle im weltweiten Vergleich erlangen.«

die dauerhafte Bewahrung von Kunst- und Kulturgütern ein – Exzellenzen werden gebündelt und Synergien genutzt. Zudem wollen die drei Allianzpartner die Bedeutung des Kulturerbes und die für die Bewahrung notwendigen Forschungsanstrengungen auf nationaler Ebene stärker im öffentlichen Bewusstsein verankern.

Im »Wissenschaftsjahr 2012« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, das ganz im Zeichen von »Rio20+«, dem 20. Jahrestag des Erdgipfels von Rio de Janeiro steht, gehen die Wissenschaftsorganisationen in Deutschland unter dem Motto »Zukunftsprojekt ERDE« einer nachhaltigen

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT



Ulrich Buller, Forschungsvorstand der Fraunhofer-Gesellschaft:

»Die immensen Herausforderungen zur Erhaltung unseres kulturellen Erbes können wir nur mit multidisziplinären Forschungsteams und durch die Entwicklung innovativer Technologien meistern. Dafür steht die Fraunhofer-Gesellschaft. Ein wichtiges Anliegen der Allianz ist zudem der Nachwuchs und die Aus- und Weiterbildung, wie sie die Fraunhofer-Gesellschaft mit den Allianzpartnern in den beiden Kompetenzzentren in Kloster Benediktbeuern und Kloster Bronnbach vorantreibt.«

Entwicklung in drei thematischen Schwerpunkten nach:

- *Anders leben* – Wie wollen wir leben?
- *Anders wirtschaften* – Wovon wollen wir leben?
- *Umwelt bewahren* – In welcher Umwelt können wir überleben?

In diesem Kontext will die »Forschungsallianz Kulturerbe« gemeinsam mit einer Vielzahl von Partnern aus Wissenschaft, Bildung, Wirtschaft und Gesellschaft die Fragen und Themen eines nachhaltigen Umgangs mit dem Kulturerbe in und mit der Öffentlichkeit diskutieren und in konkreten Projekten umsetzen. Diese Sonderpublikation soll dazu beitragen.



Karl Ulrich Mayer, Präsident der Leibniz-Gemeinschaft:

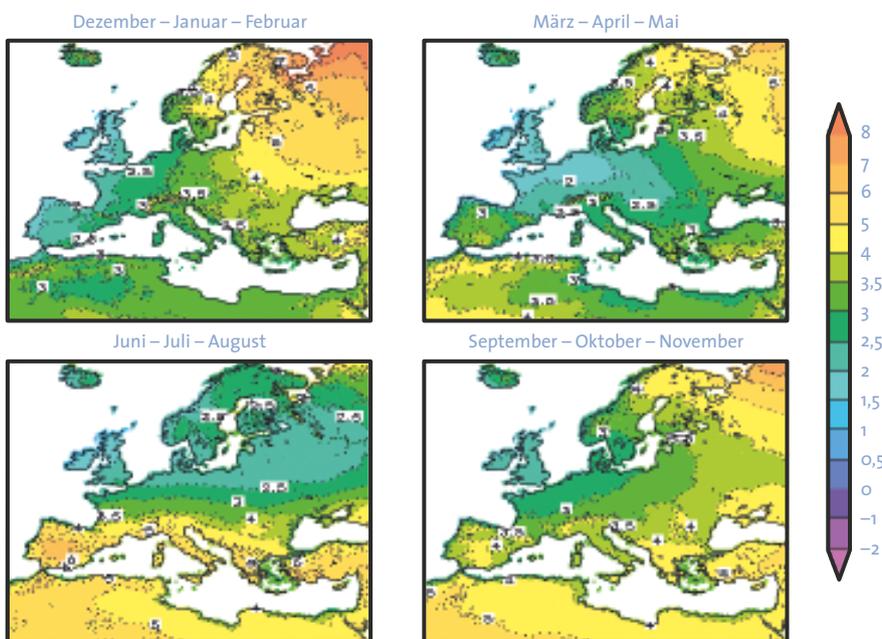
»Die Leibniz-Gemeinschaft möchte mit der Forschungsallianz als wichtigem Sprachrohr den Stellenwert der Konservierungsforschung in Politik und Öffentlichkeit verbessern. Dass seit drei Jahren die Forschungsmuseen der Leibniz-Gemeinschaft direkt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert werden, ist unter diesem Blickwinkel bedeutsam. Das Ministerium betrachtet die Forschungsmuseen als Bindeglied zwischen Wissenschaft und Gesellschaft und hebt zugleich die Forschung zur Erhaltung der Originale in den Sammlungen als entscheidende Aufgabe hervor.«

Klimawandel und Kulturerbe	4
Der globale Temperaturanstieg bedroht auch historische Bauten. Doch Forscher können berechnen, wie sich ein Gebäudeklima verändert – und so frühzeitig Schäden verhindern	
Unsichtbares sichtbar machen	6
Mit Hilfe von Terahertzstrahlen lassen sich Farbschichten durchleuchten und übermalte Wandgemälde wieder sichtbar machen	
Per Ultraschall ins Innere von Steinskulpturen	7
Steine reagieren empfindlich auf Umwelteinflüsse. Mit moderner Ultraschalltechnik können nun strukturelle Schäden im Inneren von Statuen aufgespürt werden	
David im Cyberspace	8
Wie Bernini seine Skulpturen in der Villa Borghese aufstellen ließ, ist unbekannt. Informatiker generierten daher einen virtuellen Raum, in dem naturgetreue Abbilder der Originale beliebig arrangiert werden können	
3-D-Archiv für Kunstschatze	9
Um Skulpturen, Vasen und andere Objekte in Europas Museen überall und zu jeder Zeit zugänglich zu machen, arbeiten Forscher an einem digitalen Archiv mit dreidimensionalen Scans der Kunstwerke	
Craquelé-Schäden – das Modellprojekt Kölner Dom	10
Viele historische Glasflächen sind von feinen Rissen durchzogen. Mit einem neuartigen Festiger gelingt es Wissenschaftlern, die mikroskopisch feinen Spalten zu füllen und die Gläser zu stabilisieren	
Ein Graffiti-Schutz für historische Bauten	11
Ein transparenter Polymerlack schützt die Mauern historischer Bauten vor hässlichen und schädlichen Graffiti – und ist zugleich luft- und wasserdurchlässig	
Umweltfreundlich gegen Rost	12
Forscher entwickelten einen Lack, der historisch bedeutende Industrieobjekte aus Eisen und Stahl vor Korrosion schützt – ohne Zusatz von umweltschädlichen Lösemitteln	
Sauber durch Licht	13
Mit einem Laser lassen sich feinste Schmutzbeläge von Malereien sowie Kulturgütern aus Metall, Holz und Stein schadlos entfernen	
Das Puzzle aus Stasischnipseln	14
Wie können Millionen Schnipsel zerrissener Stasidokumente wieder zusammengefügt werden? Eine spezielle Software macht möglich, was per Hand eine kleine Ewigkeit dauern würde	
Ein Speicher für Jahrhunderte	15
Ungezählte historische Dokumente und Gemälde sind vom Zerfall bedroht. Doch auf Farbmikrofilm gebannt sind ihre Inhalte langfristig gesichert	
Energie sparen im Museum	16
Um den hohen Energieverbrauch besonders in älteren Museen zu drosseln, entwickeln Forscher kluge Sanierungskonzepte	
Mit Plasmen und Elektronen gegen den Verfall	17
Wissenschaftlern gelingt es mit Plasmen und beschleunigten Elektronen, angelaufene Metallobjekte zu reinigen und geschädigtes Papier zu stabilisieren	
Von der Theorie in die Praxis	18
Die Aus- und Weiterbildung von Fachleuten ist der Grundpfeiler einer dauerhaften Bewahrung unseres Kulturerbes	

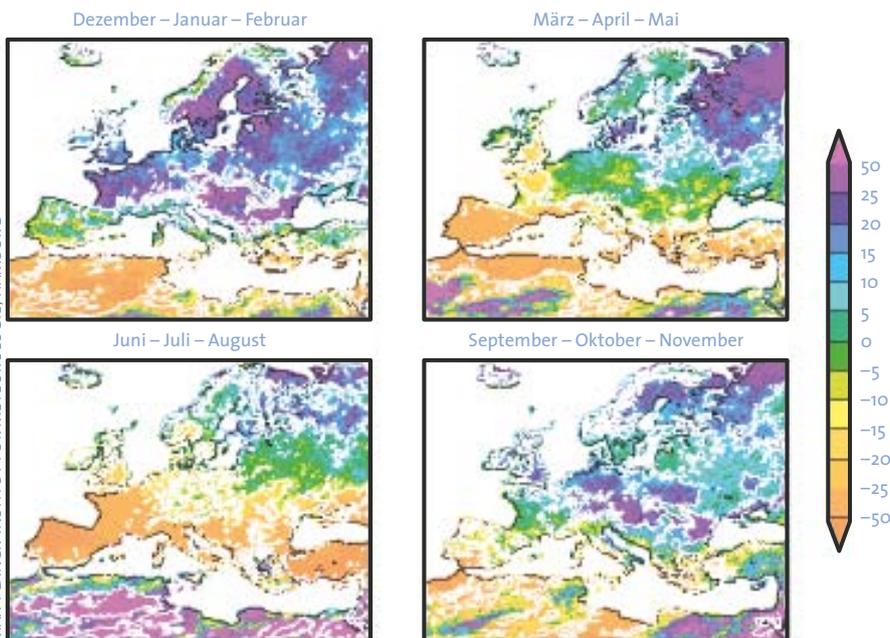
Klimawandel und Kulturerbe

Im EU-Forschungsprojekt »Climate for Culture« werden erstmals hoch aufgelöste Klimamodelle und Gebäudesimulationen gekoppelt, um die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Innenräume historischer Bauten abschätzen zu können.

Prognose der Temperaturveränderungen (°C) für den Zeitraum von 2071 bis 2100, bezogen auf die mittleren Temperaturen von 1961 bis 1990



Prognose der Niederschlagsveränderungen (%) für den Zeitraum von 2071 bis 2100, bezogen auf die mittleren Niederschläge von 1961 bis 1990



Unser bauliches Kulturerbe ist in besonderer Weise von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen. Denn viel stärker als in der Vergangenheit besteht die Gefahr, dass es durch rasant fortschreitende Korrosionsprozesse angegriffen wird. Korrosion stellte zwar schon immer eine Gefahr für Materialien aller Art wie auch für die Substanz historischer Gebäude dar. Aber mit dem prognostizierten weltweiten Anstieg der Temperaturen nehmen die chemischen Reaktionen, die für solche zersetzenden Prozesse verantwortlich sind, Fahrt auf. Dem liegt die exponentielle Arrhenius-Beziehung zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Temperatur zu Grunde: Bei einem Anstieg um zehn Grad verdoppelt sich die Zerstörungskraft derartiger Reaktionen.

Doch nicht nur die Verwitterung baulicher Substanz nimmt mit dem Klimawandel zu. In Küstennähe, etwa im italienischen Venedig oder im ägyptischen Alexandria, wächst die Bedrohung durch den steigenden Meeresspiegel. Allgemein erhöht sich das Risiko, dass Bauten in ihrer Struktur oder an ihrer Außenseite von Überflutungen, Stürmen oder Starkregen schwerer beschädigt werden als bisher.

Mit welchen Strategien kann es gelingen, die zunehmende Zerstörungsgefahr abzu-

Auf der Basis von Klimamodellen simulierten Forscher die Entwicklung der mittleren Temperaturen (oben) und Niederschläge (unten) für die Zeit von 2071 bis 2100 – und verglichen die Daten mit den zwischen 1961 und 1990 gemessenen Werten. Ergebnis: Es wird durchschnittlich weniger regnen – aber dafür häufig umso stärker – und deutlich wärmer werden. Das bringt auch unser Kulturerbe in Gefahr.

wenden? Und: Was wird es uns kosten, wenn wir nicht rechtzeitig auf den Klimawandel reagieren? Das sind die zentralen Fragen des Forschungsprojekts »Climate for Culture«, in dem – maßgeblich mit rund fünf Millionen Euro von der Europäischen Union gefördert – 30 Partner aus 16 Nationen in Europa und Nordafrika zusammenarbeiten, um erstmals Klima- und Gebäudesimulationsmodelle miteinander zu verknüpfen. Denn regional hoch aufgelöste Klimamodelle einerseits und hygrothermische Gebäude- modelle andererseits, mit denen die Auswirkungen von Wärme, Feuchtigkeit und Wasserdampf auf die Bausubstanz erfasst werden können, sind verfügbar – aber sie existieren bislang unverbunden nebeneinander.

Zum Beispiel lässt sich in hygrothermischen Simulationen abbilden, wie Tausende von Touristen bei ihrem Besuch der bayerischen Königsschlösser von Ludwig II. Feuchtigkeit in die Gebäude bringen und auf diese Weise zu deren Zerstörung durch Schimmelbildung beitragen. In der Koppelung mit einem hoch aufgelösten Klimamodell können die Wissenschaftler nun die Veränderungen durch den Feuchtigkeitseintrag abschätzen, der im Zuge des Klimawandels zu erwarten ist.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt hat das Team aus Chemikern, Physikern, Meteorologen, Ozeanografen, Restauratoren, IT-Spezialisten, Wirtschaftswissenschaftlern, Kunsthistorikern und Biologen schon nachweisen können, dass es wie geplant möglich ist, Klimamodellierung und Gebäudesimulationsmodelle miteinander zu verbinden – und so Trends in der Entwicklung der Mikroklimata in Gebäuden bis zum Jahr 2099 vorhergesagt werden können. Dieser Erfolg weist weit über die unmittelbaren Projektziele hinaus, denn die Methode lässt sich künftig auf Gebäude aller Art anwenden. Während der fünfjährigen Laufzeit des Projekts stehen von 2009 bis 2014 ausgewählte europäische und nordafrikanische UNESCO-Weltkulturerbestätten wie das Schloss Schönbrunn in Wien, die Pyramiden von Sakkara in Ägypten oder die Stadt Venedig beispielhaft im Zentrum der wissenschaftlichen Untersuchungen.

Im Ergebnis erwarten die Forscher, Schadenswirkungen neu definieren zu können – und vor allem auf der Basis einer im Projekt entstehenden leistungsfähigen Software-



Glasdosimeter zeichnet Umgebungsbedingungen auf

Ein Monitoring der Temperatur und der relativen Luftfeuchte zum grundlegenden Schutz von Kulturgütern gilt heutzutage als Standard. Handelsübliche Systeme zur Bestimmung von Umwelteinflüssen zeigen allerdings in der Regel nur die jeweils aktuell vorherrschenden Bedingungen an. Um effiziente Schutzmaßnahmen einzuleiten, ist es aber erforderlich, die Umgebungseinflüsse über einen längeren Zeitraum hinweg zu messen. Auf diese Weise lässt sich auch das korrosive Potenzial kleinerer Schadstoffmengen in Wechselwirkung mit Temperatur und Feuchtigkeit erfassen.

Ein Glasdosimeter, das vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC in Würzburg im Rahmen des EU-Forschungsprojekts »Assessment and Monitoring of the Environment of Cultural Property« Mitte der 1990er Jahre entwickelt wurde, erfüllt all diese Anforderungen. Dabei reagieren verschiedene Glasverbindungen unterschiedlich empfindlich auf Temperatur, relative Luftfeuchte, Luftschadstoffe oder organische Säuren wie beispielsweise Essigsäure – das Glas beginnt sukzessive zu korrodieren. Natrium- und Calciumionen werden ausgelagert, und auf der Oberfläche bildet sich eine wasserhaltige Gelschicht. Mittels der Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie lässt sich dann anhand der Zunahme der Wassereinlagerung das korrosive Potenzial der Umgebungsbedingungen messen.

Hat sich nach dem Expositionszeitraum – in der Regel zwischen drei und sechs Monaten – nur eine sehr dünne Schicht mit wenig eingelagertem Wasser gebildet, dann ist die Umgebung für die Aufbewahrung von Kunst- und Archivgut geeignet. Wird hingegen eine dicke Schicht nachgewiesen, dann sind die Aufstellungs- oder Lagerbedingungen nicht optimal.

plattform frühzeitig Strategien zur Schadensverhinderung anzugehen. Dazu werden auch die Ergebnisse von EU-Vorläuferprojekten zur Nachhaltigkeitsentwicklung und zur Energieeffizienz zu Grunde gelegt.

Um schließlich zu gewährleisten, dass die Ergebnisse von »Climate for Culture« umfassend zur Neubewertung bestehender Klimaschutzstrategien herangezogen werden und das neue Wissen überdies in die Praxis zur Erhaltung und Restaurierung von Kirchen, Burgen, Bibliotheken oder Archiven in unterschiedlichen Klimazonen Europas und des Mittelmeerraums transferiert wird, treffen die Projektmitglieder entsprechende organisatorische Vorkehrungen. Zudem hat

sich »Climate for Culture« zum Ziel gesetzt, die zusätzlichen Kosten für die Erhaltung von Kunst- und Kulturgut in Europa abzuschätzen – in Analogie zu dem im Jahr 2006 veröffentlichten »Stern-Bericht«, der eine allgemeine Kostenkalkulation zum Klimawandel abgab.

Auf der politischen Ebene streben die Teilnehmer des EU-Projekts an, dass in künftigen Berichten des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) explizit auf die Gefahr des Klimawandels für das Kulturerbe hingewiesen und seine Erhaltung als ein integraler Bestandteil in die Nachhaltigkeitsstrategien der nationalen Regierungen und der EU-Kommission aufgenommen wird.

Unsichtbares sichtbar machen

Übermalte Wandgemälde galten lange Zeit als unwiederbringlich verloren. Mit Terahertzstrahlen wollen Forscher solche verborgenen Kunstwerke jetzt zerstörungsfrei »enthüllen«.

Viele Kirchengemälde bleiben der Nachwelt verborgen, weil sie im Lauf der Jahrhunderte übermalt wurden. Vor allem im 16. Jahrhundert verdeckten reformatorische Bilderstürmer religiöse Malereien. Deshalb liegen heute oftmals Fassungen aus unterschiedlichen Epochen in mehreren Schichten übereinander.

Wollte man die verdeckten Gemälde mit mechanischen Methoden frei legen, bestünde die Gefahr, das Originalwerk zu beschädigen. Aber auch jüngere, ebenfalls erhaltenswerte Schichten über dem Original würden dabei zerstört. Forscher des Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden haben sich deshalb zum Ziel gesetzt, solche verborgenen Malereien mit einer zerstörungsfreien Methode sichtbar zu machen. Dabei setzen die Experten auf die Terahertz(THz)-Strahlung. In dem Projekt »TERAART« – gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung – arbeiten sie mit der TU Dresden, dem Forschungsinstitut für Denkmalpflege und Archäometrie in Potsdam sowie der Dresdner Hochschule für Bildende Künste zusammen.

THz-Strahlung schließt eine diagnostische Lücke: Ihr Frequenzbereich im elektromagnetischen Spektrum liegt mit 300 Gigahertz bis etwa drei THz unterhalb des sichtbaren Lichts und des Infrarotbereichs, jedoch oberhalb der Mikrowellen. Die Wellenlängen der THz-Strahlen reichen entsprechend von etwa einem Millimeter bis hinunter zu 100 Mikrometern. Infrarotstrahlen können die Wissenschaftler in dem Vorhaben nicht nutzen, da deren Eindringtiefe zu gering ist. Auch Mikrowellen sind keine Alternative, denn sie erreichen unter anderem nicht das nötige Auflösungsvermögen.

Weithin bekannt wurden THz-Strahlen im Zusammenhang mit neuartigen Scannern für die Sicherheitskontrolle an Flughäfen. Die Strahlen können aber nicht nur Kleidung problem- und gefahrlos durchdringen,

sondern auch Tünche oder Wandputz, selbst wenn diese Schicht relativ dick ist. Anders als beispielsweise von UV-Strahlung geht zudem von THz-Strahlung keine Gefahr für das darunterliegende Kunstwerk aus.

Für die Untersuchungen wurde ein mobiles, außerhalb von Labors einsetzbares System entwickelt. Es besteht aus einem Scanner mit zwei Messköpfen, der die Wand kontaktfrei abfährt. Ein Messkopf sendet die Strahlung aus, der andere empfängt die reflektierten Strahlen. Jede Schicht und jedes Pigment sendet diese THz-Pulse anders zurück, so dass sowohl ein Bildkontrast als auch eine Tiefeninformation gewonnen werden können. Die Messergebnisse geben zum Beispiel Auskunft über die Dicke der

Schichten, um welche Farben es sich handelt und wie sie angeordnet sind. Eine eigens entwickelte Software setzt schließlich die Messdaten zu einem Bild zusammen, das die Struktur der verborgenen Malereien darstellt.

Das Potenzial der THz-Strahlung scheint damit aber längst noch nicht ausgeschöpft: Die Experten sind sich sicher, mit ihr außerdem Krebs erregende Biozide an und in Kunstobjekten aus Holz oder Textilien nachweisen zu können. Wegen der hochgradig giftigen Wirkung dieser Substanzen sollten sie bei anstehenden Restaurierungen möglichst entfernt werden. Der zerstörungsfreie Nachweis organischer Biozide ist bislang allerdings noch sehr schwierig.

Schicht auf Schicht verdeckt hier eine Wandmalerei die andere. Doch Terahertzstrahlen können die Lagen zerstörungsfrei durchdringen. Mit Hilfe der so gewonnenen Messwerte lassen sich die verborgenen Bilder am Computer rekonstruieren.

FRAUNHOFER IWS / MICHAEL PANZNER



Per Ultraschall ins Innere von Steinskulpturen

Marmor und andere Gesteine sind anfällig für Umwelteinflüsse wie Schadstoffe oder starke Temperaturschwankungen. Um Schäden besser erkennen und beheben zu können – und um letztlich Naturstein optimal zu konservieren –, erproben Forscher die Anwendung moderner medizinischer Ultraschalltechnik.

Seit der Antike dient Marmor als Baumaterial und zur Gestaltung von Kunstobjekten – und in diesem Zusammenhang ist er Teil unseres kulturellen Erbes geworden. Marmor besteht überwiegend aus den calciumhaltigen Mineralen Calcit oder Dolomit und entstand unter Hitze sowie hohem tektonischem Druck. Doch auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung können Schadstoffe, vor allem Säuren, dem Gestein empfindlich zusetzen. Deshalb haben sich seit Beginn der Industrialisierung Schädigungen, etwa durch sauren Regen, beschleunigt.

Um Statuen und Denkmäler aus Marmor oder anderen Gesteinsarten erfolgreich konservieren und restaurieren zu können, muss der Zustand des Materials genau bekannt sein. Eine zuverlässige Prüfung gelingt zwar mit verschiedenen zerstörungsfrei arbeitenden Ultraschalltechniken aus der Werkstoffforschung, doch sind diese allesamt umständlich zu handhaben. Zudem erzeugen sie keine Bilder für eine visuelle Schadensdiagnose.

Hier setzt ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Projekt an: Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts

Die Stifterfiguren im Naumburger Dom zählen zu den bedeutendsten Werken der deutschen Frühgotik. Um sicherzustellen, dass die rund 750 Jahre alten Sandsteinstatuen keine strukturellen Schäden aufweisen, durchleuchten Forscher sie mit Ultraschall.

für Biomedizinische Technik IBMT versuchen gemeinsam mit ihren Kollegen des Rathgen-Forschungslabors der Staatlichen Museen zu Berlin zu klären, inwieweit moderne Ultraschallsysteme aus der Medizintechnik zur Analyse von Steinschädigungen herangezogen werden können. Deren Anwendbarkeit in der Restaurierung von solchen Denkmälern wäre ein enormer Innovationssprung, denn sie erzeugen nicht nur Bilder, sondern können das Innere von Objekten auch dreidimensional abbilden.

In der modernen medizinischen Diagnostik arbeiten fast alle Ultraschallsysteme mit der so genannten Phased-Array-Technik.

HOCHSCHULE FÜR BILDENDE KÜNSTE DRESDEN / RATHGEN-FORSCHUNGSLABOR



Die dabei verwendeten Ultraschallwandler bestehen aus einzelnen Elementen, die getrennt voneinander angeregt und ausgelesen werden können. Indem die Elemente zu unterschiedlichen Zeitpunkten Schallimpulse verschiedener Intensität aussenden, wird der Fokus einer Schallkeule in einer Schnittebene elektronisch bewegt und erlaubt so die Abbildung der Ebene.

Diese aus der Medizintechnik bekannte Technologie modifizieren die Forscher für die geplante Untersuchung von Skulpturen und Fassaden aus Stein und kombinieren sie mit einem Tracking-System, das die Koordinaten einzelner Scans erfasst. Anschließend lassen sich die so gewonnenen Einzelbilder zu einer dreidimensionalen Darstellung zusammenfügen. Dieses technologische Konzept ermöglicht es, handliche Geräte zu konstruieren, die tragbar sind und somit ortsunabhängig und flexibel eingesetzt werden können.

David im Cyberspace

Moderne Medientechnologien ermöglichen es, in einem virtuellen Rundgang die Villa Borghese zu durchwandern, 3-D-Modelle der Skulpturen Berninis zu studieren und sie im Raum zu verschieben.



Für Kardinal Borghese schuf Bernini 1623/24 die Statue des David. Ihre genaue Aufstellung in dessen Villa ist unbekannt. Doch virtuell lassen sich verschiedene Positionen in historischem Ambiente darstellen.

FRAUNHOFER IAIS

Die Ausdruckskraft von Skulpturen erfassen Museumsbesucher nur, wenn sie die Statuen von allen Seiten betrachten können. Ganz besonders gilt dies für die Werke des in Neapel geborenen Barockkünstlers Giovanni Lorenzo Bernini (1598–1680). So verharrt seine weltberühmte Figur des David, anders als bei Michelangelo, nicht in aufrechter, ernst-besonnener Pose – vielmehr gelang es Bernini, den dramatischen Augenblick einer Bewegung aus dem Marmorblock zu meißeln: Davids grimmig-konzentrierter Gesichtsausdruck, seine angespannten Muskeln, der zur Seite geneigte Rumpf und die Arme, die mit der Steinschleuder in den Händen Schwung gegen Goliath holen. Diese ganze Dynamik kann der Betrachter nur erkennen, wenn er um die Figur herumgeht.

Aus diesem Grund sind die vier Skulpturen, die Bernini für die Villa Borghese in Rom schuf, besonders gut geeignet, um sie mit Hilfe von computergrafischen Verfahren dreidimensional nachzubilden und im virtuellen Raum darzustellen. Ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Projekt, an dem das Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS in Sankt Augustin, die Universität Siegen und die Galleria Borghese

in Rom beteiligt waren, hatte sich zum Ziel gesetzt, die Anwendung moderner Medientechnologien für die Kunstwissenschaft zu testen – und zu untersuchen, wie sie die Wahrnehmung verändern. Überdies sollten Kunsthistoriker ein Instrument bekommen, um Berninis Schaffen besser einordnen und deuten zu können.

Daher musste die virtuelle Nachbildung der Skulpturen so detailgetreu und realistisch sein, dass sie den Ansprüchen einer kunsthistorischen Analyse genügt. Dazu wurde die Figur zunächst mit Hilfe eines mobilen 3-D-Scanners erfasst: Dieser projizierte ein Gitterraster auf Abschnitte und fotografierte die Statue Stück für Stück ab. Durch die Krümmungen der Skulptur verzerrt, lieferte das Raster 3-D-Informationen, aus denen der Computer jede Wölbung und jede Vertiefung errechnen konnte.

Aus mehreren tausend Bildern entstand dann ein dreidimensionales Modell. Als besonders schwierig erwies es sich, die Marmortextur über das virtuelle Bildwerk zu legen. Kristallines Gestein hat nämlich die Eigenschaft, das Licht nicht nur an seiner Oberfläche, sondern auch in den Kristallschichten darunter zu reflektieren. Um dieses Reflexionsverhalten korrekt zu simulie-

ren, entwickelten die Informatiker ein komplexes Generierungsmodell.

Körper im Kontext von Raum, Perspektive, Licht und Schatten sind ein wesentliches Gestaltungselement des Barock. Niemand weiß, wie Bernini das Skulpturenensemble ursprünglich in der Villa Borghese arrangierte – ein Rätsel, das Kunstwissenschaftler lösen möchten. Die Räume selbst wurden seit dem 16. Jahrhundert immer wieder umgestaltet. Anhand zeitgenössischer Beschreibungen modellierten die Forscher die Villa am Computer so nach, wie sie einmal ausgesehen haben könnte.

In dieser virtuellen Realität präsentierten sie die computergenerierten Figuren. Ausgestattet mit einer Brille für die Stereoprojektion und einem »Personal Digital Assistant« kann sich der Nutzer im Cyberspace bewegen und die Skulpturen von verschiedenen Seiten betrachten. Vor allem aber bietet der virtuelle Raum eine Erfahrung, die im Museum unmöglich ist: Der Besucher kann die »schweren« Marmorskulpturen verschieben, andere Positionen bei stets neu berechneter Beleuchtung ausprobieren und die jeweilige Raumwirkung vergleichen. Gestaltungsprinzipien des 17. Jahrhunderts und die Sichtweise Berninis lassen sich so nachvollziehen.

3-D-Archiv für Kunstschatze

Im Rahmen eines europäischen Projekts bringen Forscher ein digitales Archiv auf den Weg, in dem Kunstobjekte dreidimensional erfasst werden und dauerhaft virtuell erhalten bleiben – zur Freude von Laien und zum Nutzen der Fachwelt.

Kunstliebhaber und Forscher müssen miteinander um die ganze Welt reisen, um in einem Museum das Objekt ihres Interesses zu bewundern oder zu studieren. Noch dazu lagert eine Vielzahl der Kulturgüter, unzugänglich für Besucher, in den Kellern der Museen. Gemälde lassen sich immerhin leicht fotografieren und so in Büchern oder im Internet darstellen. Damit auch dreidimensionale Objekte wie Skulpturen, Vasen, Waffen oder ganze Tempelruinen einmal von allen Seiten am Computerbildschirm betrachtet werden können, entwickeln Forscher im EU-Projekt »3D-COFORM« (Tools and Expertise for 3D Collection Formation) eine entsprechende Datenbank. Das Archiv wird über das Internet zugänglich sein und auch 3-D-Modelle sowie deren Metadaten zu der virtuellen Bibliothek »Europeana« (European Digital Library) beitragen.

Neben interessierten Laien sollen vor allem Wissenschaftler von der digitalen Sammlung profitieren. Sie erhalten neue Möglichkeiten der Dokumentation und können ihre Thesen und Methoden mit denen von Kollegen abgleichen und überprüfen. Auch werden zusätzliche multimediale Informationen wie Bilder, Videos und Texte die 3-D-Modelle ergänzen.

Eine spezielle Suchmaschine soll es zudem möglich machen, gezielt Kulturgüter in der Datenbank zu finden. Mit ihrer Hilfe las-

sen sich sogar bestimmte Merkmale wie Material, Oberflächenbeschaffenheit, Farben oder Muster abfragen, um Vergleichsobjekte in den europaweit verteilten Museen aufzuspüren und Zusammenhänge herzustellen. So können Wissenschaftler zum Beispiel Stile vergleichen, können klären, ob Vasen, die nur in Bruchstücken erhalten sind, die gleiche Herkunft haben oder ob an einer Ausgrabungsstätte frei gelegte Mauerreste zu ein und demselben Gebäude gehören. Selbst der Verlauf einer Grabung lässt sich nachzeichnen.

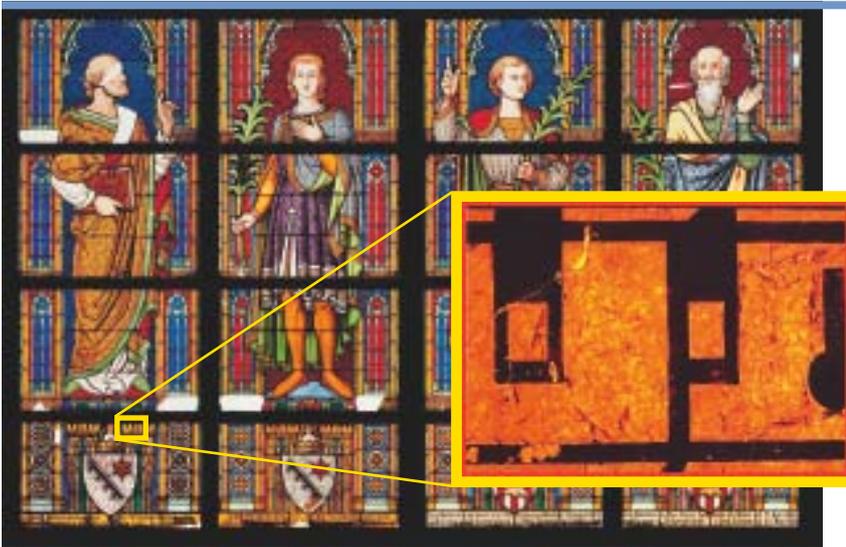
Damit all dies möglich ist, sind große Anstrengungen nötig. Die Forscher müssen jedes einzelne Kulturobjekt scannen und digital aufbereiten, die multimedialen Zusatzinformationen in die jeweilige Datei integrieren, die Algorithmen für die Suchmaschine entwickeln und die Internetnutzung der Datenbank so alltagstauglich machen, dass Wissenschaftler aus dem Kulturbetrieb sie auch anwenden.

Dafür bedarf es einer engen Kooperation von Informatikspezialisten mit Kuratoren und wissenschaftlichen Mitarbeitern aus den Museen, die einerseits über die Objekte verfügen, andererseits auch die kulturwissenschaftlichen Fragestellungen und Bedürfnisse der professionellen Nutzer kennen. Im Projekt »3D-COFORM« arbeiten Fachleute aus Großbritannien, Italien, Griechenland, Belgien, der Schweiz, Österreich, Frankreich, Ägypten, Zypern und Deutschland. Koordinatoren sind die University of Brighton und, für die technische Seite, das Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD in Darmstadt. Bis zum Ende der Förderung 2012 wollen die Beteiligten den Umfang und die Alternativen demonstrieren, die das digitale Archiv eröffnet.

FRAUNHOFER IGD



Wie diese bereits digitalisierten Exponate aus dem Victoria and Albert Museum in London möchten Forscher weltweit noch mehr Sammlungsstücke dreidimensional erfassen – und in einem Onlinearchiv für jedermann zugänglich machen.



Nur 13 von ehemals 28 Fenstern des »Welter-Zyklus« im Kölner Dom überstanden den Zweiten Weltkrieg. Doch die gut 150 Jahre alten Glasmalereien sind stark restaurierungsbedürftig – feine Risse destabilisieren die Gläser.

1860er und 1870er Jahren nach Entwürfen des Kölner Malers Michael Welter für die 28 Fenster der Hochwände des Quer- und des Langhauses. Nur ein Teil dieser Fenster hat den Zweiten Weltkrieg überdauert, und zwei von ihnen weisen heute massive Schäden durch Craquelé auf. Alle bekannten Restaurierungsverfahren haben bislang versagt.

Damit nun diese Kunstschätze im Weltkulturerbe Kölner Dom ihren angestammten Platz in 27 Meter Höhe sicher wieder einnehmen können, erproben Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Silicatiforschung ISC in Würzburg, Außenstelle Bronnbach, im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Modellprojekts zurzeit zwei Rettungsmethoden.

Ein eher schon klassisch anmutendes Verfahren setzt darauf, die besonders stark gefährdeten Glasstücke mit transparenten, sehr feinen Glasfaservliesen zu hinterlegen und auf diese Weise zu stabilisieren.

Die Forscher des ISC-Fachbereichs Kulturgüterschutz untersuchen zudem einen zweiten, innovativen Weg: Sie entwickelten eine hydroaktive Flüssigkeit, mit der sie bereits an zahlreichen Proben aufzeigen konnten, wie dieser Festiger Craquelé-Schäden im Nanomaßstab konsolidiert. Ein dünnflüssiger, molekular verteilter Aluminiumkomplex dringt dabei zunächst tief in die feinen Rissstrukturen ein und verklebt die Spaltenränder mit einem Netzwerk aus Aluminiumhydroxid. Wird das Glas anschließend der normalen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, wandelt sich der Kleber allmählich um. Zurück bleibt ein mikroporöses, anorganisches Gerüst aus Aluminiumoxid. Abschließend sorgt ein thermodynamisch getriebener Diffusionsprozess dafür, dass nach und nach Ionen aus dem umgebenden Glas in die Lücken dieses anorganischen Gerüsts wandern – bis sich als Ergebnis des Prozesses die Craquelé-Risse wieder gefüllt haben.

Craquelé-Schäden – das Modellprojekt Kölner Dom

Mit Hilfe eines neuartigen Festigers auf Basis einer nanoporösen Glasphase lassen sich selbst feinste Risse in historischen Gläsern stabilisieren und auf diese Weise etwa Glasmalereien nachhaltig schützen.

O bgleich auch seit Jahrhunderten Kirchen mit farbigen Fenstern ausgestattet wurden, so hat doch nur ein Bruchteil von ihnen die Zeiten überdauert. Von den Verglasungen repräsentativer Profanbauten blieb noch weniger erhalten. Es gab Kriege und damit verbundene Verwüstungen, oder die Geschmäcker wandelten sich, und man ersetzte Altes durch Neues. Aber so traurig es ist – auch in der materiellen Beschaffenheit der Kunstwerke liegt eine wesentliche Ursache für ihren Verlust, ebenso wie in Schäden, die durch Umweltbelastungen hervorgerufen werden.

Ein besonderes Schadensbild farbiger Glasfenster aus zurückliegenden Jahrhunderten ist ein selbst mit bloßem Auge sichtbares Netz mehr oder weniger feiner Risse: so genanntes Craquelé auf der Oberfläche

und im Glas, das eine veränderte Transparenz des Fensters zur Folge hat. Die Ursache ist noch weit gehend unbekannt. Viele dieser Mikrorisse dringen tief in das Glas ein und können es destabilisieren. Man weiß inzwischen, dass sowohl einige alte Gläser als auch manche Glasmalfarben auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung empfindlich auf Schadstoffe sowie Feuchtigkeit reagieren und so Craquelé-Schäden entstehen können. Doch ebenso dürften Spannungen im Material, die während des Herstellungsprozesses infolge falscher Wärmebehandlung quasi im Glas eingefroren wurden, zur Rissbildung beitragen.

Betroffen von Craquelé sind auch die Fenster aus dem Welter-Zyklus des Kölner Doms. Diese ursprünglich 112 Standfiguren umfassende Verglasung entstand in den

Ein Graffitischirm für historische Bauten

Graffiti bedrohen zunehmend unser Kulturerbe. Ein neuartiges Verfahren hilft, geschützte Baudenkmäler vor den Farben der Sprayer zu bewahren.

Die »Street Art« der Graffiti-Künstler genießt, sofern ambitioniert, inzwischen weltweit Ansehen. Nicht alle Malereien sind indes künstlerisch wertvoll, und auf Baudenkmalen haben sie ganz gewiss nichts zu suchen. Trotzdem verschandeln Graffiti in europäischen Städten 3,5 Millionen geschützte Bauten: nicht nur ein Ärgernis für alle Bürger, sondern für Denkmalpfleger und Handwerker auch ein riesiges – und kostspieliges – Problem. Historische Bausubstanz besteht häufig aus Natursteinen oder Ziegeln mit poröser Oberfläche, in die Farben tief eindringen. Selbst Hochdruckreiniger oder Lösungsmittel werden mit den Pigmenten kaum fertig. So bleibt meist nichts anderes übrig, als die Außenschicht des Bauwerks wegzuzütseln oder sich mit den Graffiti abzufinden – im Sinn des Denkmalschutzes ist weder das eine noch das andere.

Da ist es besser, Schäden vorzubeugen. Zum Schutz der Fassaden gibt es seit einiger Zeit permanente polymere Sperrschichten: Der Wasser abweisende Lack verschließt die Poren, die Sprühfarbe haftet nur schwer und lässt sich so leicht wieder abwaschen. Der

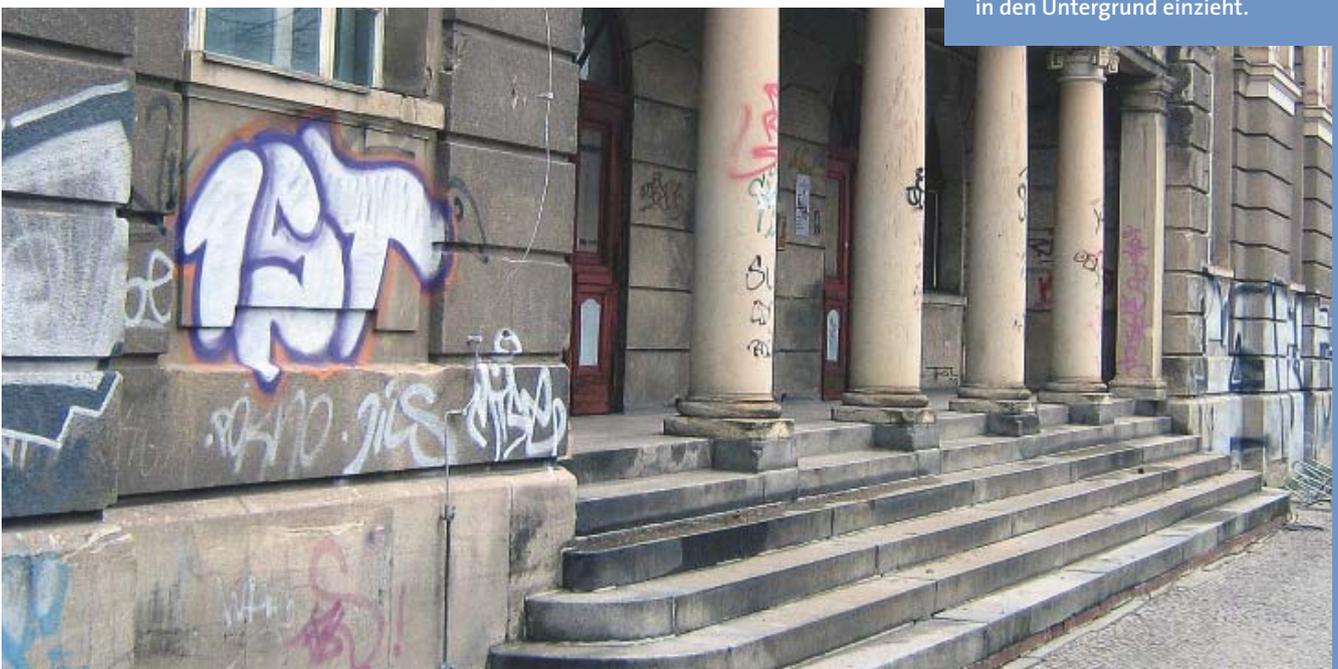
Nachteil allerdings ist, dass die Versiegelung der Poren die Kapillartrocknung des Steinmaterials unterbindet. Schimmel oder Versalzung sind die Folge. Eine optimale Schutzschicht müsste daher widersprüchliche Anforderungen erfüllen: Sie sollte gut haften und Licht, Regen sowie mechanischer Reinigung trotzen, sich aber wenn nötig leicht wieder entfernen lassen, ohne die Bausubstanz in Mitleidenschaft zu ziehen; sie sollte durchlässig für Luft und Wasserdampf sein, aber die Farben der Sprayer abweisen. Und zu guter Letzt sollte sie noch unsichtbar bleiben.

Ein Team von Wissenschaftlern des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung IAP in Potsdam und des Zentrums für Polymer- und Kunststoffmaterialien der Polnischen Akademie der Wissenschaften (CMPW-PAN) haben nun im Rahmen des dreijährigen, EU-geförderten Projekts »Graffiti« einen neuen schaltbaren Polymerlack entwickelt, der all das kann. Der Film verschließt zwar die Poren, so dass die Farbe keine Chance hat einzudringen und sich wieder entfernen lässt – zugleich aber ist er se-

mipermeabel, das heißt teildurchlässig. Die Wasser abweisende Schicht, die das Polymer an der Oberfläche bildet, weist winzige Poren auf. Diese sind zu klein für Farbpigmente und Regenwasser, aber groß genug, um Wasserdampf passieren zu lassen. Wenn die Schutzschicht weichen muss, etwa wenn Restaurierungsarbeiten anstehen, behandelt man sie mit einer speziellen wässrigen Reinigungslösung. Der sonst dauerhafte, so aber chemisch veränderte Film lässt sich nun leicht abwaschen.

Erste Bewährungsproben hat das neue Polymer bereits bestanden. Die spanische Fundación LABEIN und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM koordinierten eine Reihe von Tests. Spanischer und slowenischer Sandstein, belgischer Kalkstein, italienischer Travertin und deutscher Baumberger Sandstein wurden allesamt mit dem Schutzlack versehen und danach mit gleich mehreren Schichten Graffiti-farbe bemalt, um den Schwierigkeitsgrad zu erhöhen. Ergebnis: Von allen Gesteinsarten ließ sich die Farbe gut entfernen. Der Polymerlack ist inzwischen patentiert und soll nun von Lizenznehmern vermarktet werden. Derzeit entwickelt das Fraunhofer IAP zusammen mit der CMPW-PAN und Tecnalia in Bilbao im Rahmen des EU-geförderten Projekts »Effaceur« die Produktion des Überzugs im technischen Maßstab.

Künftig lassen sich Graffiti völlig schadensfrei von Kulturdenkmälern entfernen: Eine stabile und atmungsaktive, aber bei Bedarf wieder entfernbare Polymer-schicht verhindert, dass die Farbe in den Untergrund einzieht.



Umweltfreundlich gegen Rost

Im EU-Projekt »CONSIST« entwickelten Wissenschaftler eine Schutzschicht, die Industriedenkmäler aus Eisen und Stahl vor Korrosion bewahrt. Der Clou: Das Konservierungsverfahren ist besonders umweltverträglich.

Die Essener Zeche Zollverein, die Völklinger Hütte, das Erzbergwerk Rammelsberg und die Fagus-Werke bei Hannover: Allein in Deutschland haben es vier Industriedenkmäler auf die Liste des UNESCO-Weltkulturerbes geschafft. Doch auch viele andere sind längst nicht mehr bloße Relikte einer schmutzigen Industriegeschichte, sondern geschützte Erinnerungsorte an ein Zeitalter, in dem sie Motor des Fortschritts waren und das unseren Alltag sowie einzelne Regionen veränderte wie kein anderes zuvor. Viele von ihnen werden neu genutzt, zum Beispiel als Museen oder Kulturstätten. Ihre Erhaltung ist allerdings eine große Herausforderung und steht im Mittelpunkt einer noch jungen Wissenschaftsdisziplin.

Neben Schäden durch strukturelle Schwächen, Vandalismus und Diebstahl macht vor allem der Rost den Industriebauwerken zu

schaffen, waren ihre wichtigsten Baustoffe doch Eisen und Stahl. Die Philosophie der Konservierung besteht darin, die Substanz der Anlagen so zu erhalten, dass sie nicht wie neu aussehen, sondern die Spuren ihres Gebrauchslebens unverfälscht dokumentieren. Ein Restrostbelag auf den Metallteilen gehört daher zur charakteristischen »Patina« dieser historischen Monumente. Vor weiterer Korrosion kann eine Beschichtung schützen. Ein solcher Überzug soll transparent, möglichst dauerhaft und zugleich reversibel sein – das heißt, er muss sich bei Bedarf wieder entfernen lassen. Viele Korrosionsschutzprodukte erfüllen diese Anforderungen schon jetzt, haben aber einen großen Nachteil: Sie enthalten umweltbelastende organische Lösemittel.

Das EU-Projekt »CONSIST« (Comparison of Conservation Materials and Strategies for

Sustainable Exploitation of Immovable Industrial Cultural Heritage made of Iron and Steel), an dem neben dem deutschen Koordinator, dem Fraunhofer-Institut für Silicatformforschung ISC, und dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum weitere Partner aus Deutschland, Polen und Großbritannien beteiligt waren, hatte zum Ziel, Schutzsysteme ohne die schädlichen Lösemittel zu finden. Für die Fraunhofer-Forscher am ISC lag es nahe, die Formel der von ihnen entwickelten, jedoch lösemittelhaltigen Ormocer®-Lacke entsprechend zu verändern, da sie sich als Korrosionsschutz in Pilotanwendungen bereits bestens bewährt hatten. Tatsächlich gelang es, einen Hybridtyp zu synthetisieren, der sich mit Wasser statt Lösemitteln verdünnen lässt.

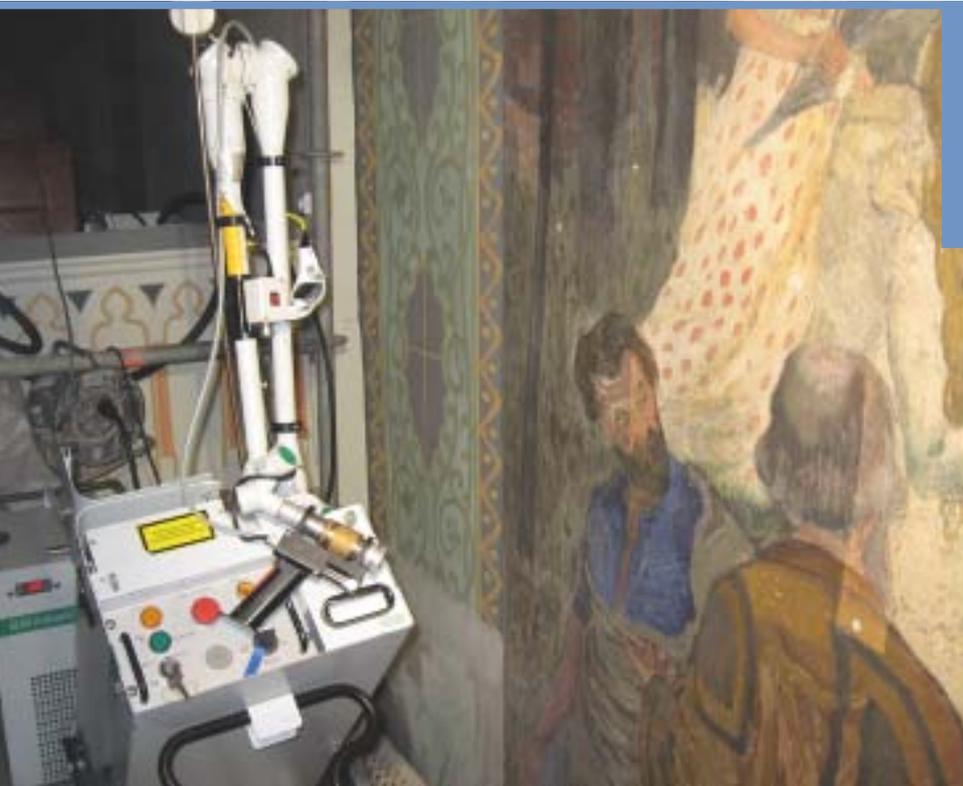
Dann verglichen die Forscher die Wirksamkeit der neuen wasserbasierten Ormocer®e mit der handelsüblicher Schutzbeschichtungen. Drei typische Vertreter des technischen Kulturerbes wählten sie für eine Testreihe aus: den Wagenpark eines polnischen Eisenbahnmuseums, gusseiserne Treppen irischer Herrenhäuser sowie Ausrüstungsteile des Anschauungsbergwerks im Deutschen Bergbau-Museum. Nach Untersuchungen an Probeblechen im Labor mussten sich die Beschichtungsmaterialien an Testflächen unter realen Bedingungen bewähren.

Das Ergebnis: Zwar erreichen die neuen Ormocer®e noch nicht die Qualität der klassischen Lacke und anderer Beschichtungsmaterialien auf Lösemittelbasis, und auch ihre Handhabung ist noch verbesserungsbedürftig; doch zeigen sie eine gute Schutzwirkung. Auf dem Weg zu einem Schutzsystem mit guten Umwelteigenschaften sind die Wissenschaftler, Konservatoren und Restauratoren damit einen großen Schritt vorgekommen.

Die letzten 200 Jahre haben an der gusseisernen Treppe eines irischen Herrenhauses ihre Spuren hinterlassen. Ein Schutzlack kann die Korrosion stoppen und – daran arbeiten Forscher – auch umweltfreundlich sein.



NAYLOR CONSERVATION, TELFORD, UK



Vor mehr als 100 Jahren schuf der Dresdner Künstler Karl Schulz seinen »Einzug in Jerusalem«. Seitdem legte sich ein Schmutzschleier über das Wandgemälde, dem mit herkömmlichen Reinigungsmethoden nicht beizukommen war. Laserstrahlen verhalfen den Restauratoren schließlich zum Durchbruch.

FRAUNHOFER IWS / UDO KLOTZBACH

Sauber durch Licht

Mit Laserlicht haben Experten ein empfindliches Gemälde wieder zum Strahlen gebracht: Damit entfernten sie die Schmutzschichten – ohne die Farben zu schädigen.

Das Wandbild »Einzug in Jerusalem« in der Kirche St. Martin im sächsischen Meerane war stets das Aschenputtel. Die Kirche, ein ursprünglich romanischer Bau, wurde über die Jahrhunderte mehrfach umgebaut und verändert. Das Wandgemälde stammt von der Hand des Jugendstilkünstlers Karl Schulz (1874–1954), der 1906 den Innenraum neu gestaltete. Im Lauf der Zeit hatte ein unansehnlicher Schmutzfilm die Oberfläche überzogen. Nun nahmen sich Restauratoren und das Landesamt für Denkmalpflege Sachsen seiner an. Nachdem Versuche, das Bild mechanisch zu reinigen, gescheitert waren, fragten sie bei Experten vom Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden an. Mit einer möglichst schonenden Methode sollte die

Wandmalerei gesäubert und anschließend konserviert werden. Hierfür wählten die Forscher das Verfahren der Laserreinigung und wendeten es erstmals bei einem Wandbild an, das stellenweise bereits konservatorisch gefestigt und mit einer Schutzschicht überzogen war.

Der Laser ist ein vielseitiges Werkzeug, das seit den 1990er Jahren auch Kunst- und Kulturgut restaurieren hilft. Mit ihm lassen sich filigrane Ersatzstücke ausschneiden, um Intarsien zu reparieren, oder abgebrochene Verzierungen wieder anschweißen. Vor allem als Reinigungsgerät für unterschiedlichste Materialien findet er Verwendung. Besonders geeignet ist die Methode für Stein und Holz, aber auch für Metalle wie Eisen, Bronze oder Gold. Den Fraunhofer-Forschern ist es sogar

gelingen, beim Säubern von verschiedenen Bronzebüsten die natürliche Grünpatina zu erhalten – ein sonst zumeist aussichtsloses Unterfangen. Ein Beispiel für den Werkstoff Stein ist das Dresdner Schlosskapellenportal, das sich mittels Laserstrahlen von verschmutzten Ölfarbanstrichen befreien ließ.

Sehr kurze Laserpulse mit hoher Energie können extrem dünne Schichten von wenigen Mikrometern abtragen. Damit das Material unter dem Schmutzbelag unversehrt bleibt, müssen die Pulse unterschiedliche optische Eigenschaften besitzen: Die unerwünschte Deckschicht absorbiert deutlich mehr Licht als der zu schützende Grund. So wird die Laserstrahlung vom Belag absorbiert und ihre Energie schlagartig in Wärme umgewandelt. Wenn dabei die Intensität des Laserpulses eine vom Material abhängige Schwelle überschreitet, wird die Schicht abgetragen. Dies geschieht meistens mit einem leichten Knallen, oft auch mit einem Leuchten der dabei entstehenden kleinen Plasmafackel. Ist der Untergrund transparent oder reflektiert er die Laserstrahlung nahezu vollständig, stoppt der Abtragprozess von selbst.

Eine entscheidende Rolle spielen die unterschiedlichen optischen und thermischen Eigenschaften der Pigmente in den polychromen Malschichten. Den Laser auf die vielen Farbvarianten des Wandbilds »Einzug in Jerusalem« in St. Martin abzustimmen, verlangte von den Forschern besonderes Geschick und große Sorgfalt. Indem sie die Intensität und die Laserimpulszahl pro Fläche variierten, konnten sie den Reinigungsprozess individuell für jede Farbe des Bilds anpassen. Die hellen, stärker reflektierenden Farbtöne des Himmels erlaubten beispielsweise höhere Laserleistungen als das Rot der Mauern oder die erhöht absorbierende braune Farbe von Haaren und Gewändern. Durch die gleichmäßige Entfernung der Schmutzschicht bekam das Bild seine ursprüngliche Leuchtkraft zurück.



Das Puzzle aus Stasi-schnipseln

Zerrissene oder beschädigte Dokumente wieder zusammensetzen, ist wahre Sisyphusarbeit. Mit einem System zur automatisierten virtuellen Rekonstruktion ist sie aber zu schaffen!

Mehrere Millionen Papierschnipsel in 16 000 Säcken wurden sichergestellt, nachdem im Dezember 1989 aufgebrachte DDR-Bürger, alarmiert durch Gerüchte, die Dienststellen des Ministeriums für Staatssicherheit gestürmt hatten. Ein Großteil der Beweise über Bespitzelungen war hektisch von Hand zerrissen worden, weil der Akten-schredder heiß gelaufen war.

Um das Unrecht an Regimekritikern in der DDR aufzuarbeiten, hat der Bundesbeauftragte für die Unterlagen des Staatssicherheitsdienstes (BStU) der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik den Auftrag erteilt, die Dokumente manuell wiederherstellen zu lassen – ein schier unmögliches Unterfangen. So erhielt 2007 das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK in Berlin vom

Bundesinnenministerium den Auftrag, für zunächst 400 Säcke ein Pilotprojekt zur automatisierten, virtuellen Rekonstruktion zu entwickeln.

Inzwischen haben die IPK-Forscher eine weltweit anerkannte Technologie erarbeitet, die auf drei Prozessschritten basiert. Zuerst müssen die Fragmente detailgenau mit einem Hochleistungsscanner digitalisiert werden, der 1000 Schnipsel pro Stunde schafft. Dabei gilt es, die Teile beidseitig, ohne Reflexionen oder Schatten sowie farbecht und geometriegetreu zu erfassen. Danach kommt das Herzstück des Verfahrens an die Reihe: Der »ePuzzler« ist eine spezielle Software, die mit Hilfe komplexer Algorithmen der Bildverarbeitung und Mustererkennung die gescannten Papierschnipsel automatisch zu kompletten Seiten zusammenfügen kann.

Zunächst berechnet der »ePuzzler« verschiedene Merkmale wie Kontur, Papierfarbe, Schriftart oder Linierung. Ähnlichkeiten ermöglichen es, das Material in Untergruppen zu sortieren. Darauf folgt das »Matchen«: Die digitalisierten Schnipsel werden entlang ihrer Konturen verglichen, um zu sehen, ob Eigenschaften übereinstimmen. Passende und zusammengefügte Fragmente ergeben dann ein größeres Stück, und derselbe Prozess geht in die nächste Runde – so lange, bis eine vollständig zusammengesetzte Seite vorliegt.

Im letzten Schritt geht es darum, einzelne Seiten zu Dokumenten und schließlich mehrere Dokumente zu Akten zusammenzufügen, um sie inhaltlich auswerten zu können.

Erst werden die zerrissenen Dokumente Stück für Stück gescannt. Dann vergleicht eine spezielle Software die Schnipsel so lange miteinander, bis alle Teile virtuell zusammengefügt sind.

Mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung soll dieser Vorgang, die so genannte Formierung, ebenfalls so weit wie möglich automatisiert werden. Damit die wiederhergestellten Stasiunterlagen auch vor Gericht Bestand haben, muss zudem der gesamte Rekonstruktionsprozess transparent und das Datenmaterial vor Manipulationen geschützt werden.

Für Archäologen und Kunsthistoriker wird es spannend, wenn virtuelle Rekonstruktionssysteme nicht nur verloren geglaubte Informationen wiederbeschaffen wie bei den Stasiunterlagen, sondern beschädigte Schätze der Kulturgeschichte auch physisch wiederherstellen helfen. So plant das IPK, die Experten der Ägyptischen Sammlung der Stiftung Preussischer Kulturbesitz bei der Restaurierung fragmentierter, historisch einmaliger Papyri zu unterstützen. Auch für die schwer beschädigten Dokumente des eingestürzten Kölner Stadtarchivs kann ein virtuelles Rekonstruktionssystem von Nutzen sein. Und selbst in die dritte Dimension dringen die Forscher bereits vor, etwa um Fresken, die in unzählige Stückchen zerbrochen sind, mit Hilfe virtueller 3-D-Rekonstruktion wieder zusammenzufügen.

Ein Speicher für Jahrhunderte

Eine Kombination aus digitaler Speicherung und analoger Mikrofilmbelichtung rettet kostbare Dokumente in Archiven, Bibliotheken und Museen bis in ferne Zukunft – und zwar in Form von Kopien.

Der Brand der Herzogin Anna Amalia Bibliothek in Weimar und der Einsturz des Kölner Stadtarchivs haben einmal mehr verdeutlicht, wie wichtig es ist, verzierte Handschriften, reich illustrierte Bücher oder Gemälde in Form von Kopien zu erhalten – damit wenigstens der Inhalt der Originale im Fall einer Katastrophe nicht unwiederbringlich verloren geht. Die heutige digitale Speicherung ist zwar mit wenig Aufwand verbunden und lässt sich flexibel nutzen, hat aber gravierende Nachteile: Niemand kann eine langfristige Haltbarkeit der Datenträger garantieren. Außerdem – es sei nur an die

Floppy Disks erinnert – ändern sich laufend deren Formate, so dass die Daten immer wieder Zeit raubend und kostspielig konvertiert werden müssen.

Die bewährten, überaus stabilen Schwarz-Weiß-Mikrofilme kommen für farbige Objekte leider nicht in Frage. Hochauflösende Farbmikrofilme haben zwar nachweislich eine Lebensdauer von mindestens 500 Jahren, allerdings sind sie derart lichtunempfindlich, dass sie für die Speicherung mit Hilfe der analogen Fotografie nur eingeschränkt verwendet werden können. Der Grund: Für die Belichtung müsste das Archivgut sehr hell ausgeleuchtet werden und könnte Schaden nehmen.

So suchte das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), zuständig für die Sicherungsverfilmung von Archivgut, gemeinsam mit der Herzogin Anna Amalia Bibliothek und dem Landesarchiv Baden-Württemberg nach einem Ausweg. Im Fraunhofer-Institut für Physikali-

sche Messtechnik IPM in Freiburg fanden sie die Partner für das technische Knowhow. Und tatsächlich gelang es den Forschern dort, das optimale Speicherverfahren auszutüfteln. Auf der Grundlage des berühmten und oscarprämiierten Arri-Lasers für Kinofilme, ebenfalls aus der IPM-Denkfabrik, entwickelten sie einen neuen Mikrofilm-Laserbelichter, genannt Arche.

Statt der Originale selbst belichtet der Arche-Laser deren digitalisierte Daten auf dem analogen Mikrofilm, ergänzt durch hilfreiche Zusatzinformationen wie Schlagwörter oder Quellenangaben – und zwar automatisch und schnell. Eine zusätzliche Kalibrierung sorgt für hohe Bildqualität und Farbtreue. Die Langzeitarchivierung ist bedienungsfreundlich, kostengünstig und schont die Originale. Mit einem Scanner lassen sich die Bilder außerdem leicht wieder digitalisieren, so dass bei Bedarf das Studieren einer Handschrift oder eines Bilds am eigenen Computer möglich ist.

Ein Prototyp des Arche-Mikrofilm-Laserbelichters steht im Ludwigsburger Institut für Erhaltung von Archiv- und Bibliotheksgut des Landesarchivs Baden-Württemberg. Es beherbergt eine der größten Werkstätten, die für das BBK Mikrofilme herstellen. Doch auch über historische Bestände hinaus kann das Archivierungsverfahren von Nutzen sein. Immer mehr Daten müssen, etwa wegen gesetzlicher Vorschriften, über lange Zeiträume aufbewahrt werden. Auf laserbelichtetem Mikrofilm lassen sich wichtige Dokumente sicher, authentisch und platzsparend lagern.

Mit einem Laserbelichter können digitalisierte Originaldokumente auf Farbmikrofilm übertragen und so für lange Zeit gesichert werden. Solche Filme haben eine Haltbarkeit von mindestens 500 Jahren!



Energie sparen im Museum

Museen haben einen enorm hohen Energieverbrauch, müssen sie doch ihre Schätze gut klimatisiert behüten. Ein Forscherverbund erarbeitet nun Konzepte, um die Gebäude nachhaltig zu sanieren.

DEUTSCHES SCHIFFAHRTSMUSEUM / EGBERT LASKA



Das Deutsche Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven – hinten links befindet sich der sanierungsbedürftige Scharoun-Bau von 1975 (1), davor der 25 Jahre jüngere Bau von Bangert (2).

Ob Bilder, Skulpturen, Kleinkunst, historische technische Instrumente oder Dinosaurierskelette – die Exponate in den Museen sind empfindlich und erfordern ein genau abgestimmtes Raumklima. Die Ausstellungsräume müssen daher je nach Jahreszeit geheizt oder gekühlt werden, gut belüftet sein und die richtige Luftfeuchtigkeit haben. All dies verbraucht enorm viel Energie. Zudem wurden die meisten Museen in Zeiten errichtet, als niemand an die Energiekosten dachte, als es weder eine Energieeinsparverordnung noch die Technologien für energieeffizientes Bauen gab.

Für die Erprobung moderner Bautechniken an betagteren Gebäuden bieten sich jedoch die vielen Museen an, die ohnehin renovierungsbedürftig sind. Wie sich innovative Sanierungskonzepte und der Einsatz neuer Baustoffe mit den besonderen konservatorischen Ansprüchen des Museumsbetriebs und in vielen Fällen auch mit dem Denkmalschutz vereinbaren lassen, erkunden Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP, der Universität Stuttgart, der Technischen Universitäten München und Dresden, der Bauhaus-Universität

Weimar sowie des ITG Instituts für Technische Gebäudeausrüstung Dresden. Gefördert wird das Projekt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Federführend ist das Institut für Gebäude- und Solartechnik IGS der Technischen Universität Braunschweig. Am Ende werden nicht nur Klima und Umwelt, sondern auch die klammen Kassen der Museen profitieren.

Eines der Demonstrationsobjekte ist das Deutsche Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven. Mit fast 150 000 Besuchern im Jahr zählt es nicht nur zu den bedeutendsten deutschen Museen, sondern steht als Forschungsmuseum der Leibniz-Gemeinschaft auch im Dienst der Wissenschaft. Der berühmte Architekt Hans Scharoun entwarf 1975 den ersten Bau, dessen Gestalt an ein Schiff erinnert. Heute steht das Gebäude unter Denkmalschutz. Dietrich Bangert schuf 2000 einen weiteren Museumsbau. In den kommenden Jahren sollen weitere Neubauten folgen und der Bestand energieeffizient saniert werden. Ziel ist es, ein kluges Versorgungskonzept für das Gesamtensemble zu finden, das auch eine hohe Ausfallsicherheit gewährleistet.

Im Mittelpunkt steht der Scharoun-Bau. Sein desolater Zustand ist augenfällig: So ist inzwischen eine gravierende Durchfeuchtung zu beklagen, durch das Dach tropft Wasser, und die Kosten für die Raumklimaregelung sind in enorme Höhen geklettert. Das Kerninstrument einer jeden Altbauersanierung ist die Dämmung der Hülle, denn eine schlecht isolierte Fassade gibt unnötig viel Wärme nach außen ab. Zugleich aber ist es für ein Gebäude unter Denkmalschutz wichtig, seine Kubatur nicht zu verändern und die Proportionen an den Anschlusspunkten zu berücksichtigen.

Geplant ist, die Klinkerfassade des Scharoun-Baus mit Vakuumisolierpaneelen zu dämmen. Dabei sollen auch die maroden Dehnfugen, welche die Bauwerke in bewegliche Abschnitte teilen und so Spannungsrisse vorbeugen, ausgebessert werden. Damit ist gewährleistet, dass die Außenwände wasserdicht sind. Ebenso werden die Dachflächen gedämmt und die Fenster erneuert. Am Schluss wird sich die gesamte Gebäudehülle am Standard von Neubauten messen können, ohne ihr denkmalgeschütztes Gesicht zu verlieren.

Mit Plasmen und Elektronen gegen den Verfall

In industriellen Verfahren ist die Plasmatechnologie schon lange fest etabliert. Inzwischen hilft sie auch, unser Kulturerbe zu bewahren.

Kein anderes historisches Zeugnis speichert das Wissen und die Kultur der Menschheit umfangreicher als Papier. Doch gibt es Grund zur Sorge: Riesige Mengen an wertvollen Dokumenten sind vom Verfall bedroht. Das Bundesarchiv sieht sogar fast seine gesamten Bestände gefährdet. Die Zerstörung durch Säurefraß, Oxidation sowie hungrige Bakterien und Pilze ist kaum

aufzuhalten. Hoffnung auf Rettung für das Papier, aber auch für andere Kunst- und Kulturgüter versprechen jedoch die Plasmatechnologie und der Einsatz beschleunigter Elektronen.

Plasmen sind ionisierte, also angeregte Gase. Zu den thermischen Plasmen zählen die Sonne, eine Flamme oder ein Blitz. Die Ionisation entsteht hier durch hohe Temperaturen. Regen elektrische Wechselfelder ein Gas an, so sind die Plasmen kalt. Solche Niedertemperaturplasmen können reinigen, entkeimen, abtragen oder Oberflächen schützend beschichten. In dem ersten großen gemeinsamen Projekt der Forschungsallianz Kulturerbe, das sechs Fraunhofer-Institute, dazu Einrichtungen der Leibniz-Gemeinschaft und der Stiftung Preußischer Kulturbesitz sowie weitere Institutionen vereint, werden die Möglichkeiten dieser Technologien ausgelotet.

Niedertemperaturplasmen, die in Unterdruckkammern gezündet werden, sind besonders geeignet für die flächige Behandlung von Objekten. So lassen sich etwa Oberflächen archäologischer Funde, die diesem Verfahren unterzogen wurden, leichter säubern. Auch können wertvolle Kunstobjekte aus Silber, die sich an der Luft schwärzlich braun verfärbt haben, gut mit reduzierenden Plasmen gereinigt werden – ohne Materialabtrag. Weil ionisierte Teilchen zudem sterilisierend wirken, kamen Fraunhofer-Forscher

auf die Idee, mit Niederdruckplasmen geschädigtes Papier zu entkeimen. In Versuchen wiesen sie nach, dass sich die Anzahl an Mikroben wesentlich reduzierte. Behandelt man das Papier mit Wasserstoffplasma, kann es sich sogar verfestigen. Auch lassen sich Schutzschichten aufbringen, die zum Beispiel frisch gereinigtes Silber vor dem erneuten Anlaufen bewahren. Derzeit wird überdies untersucht, wie andere Objekte vor Umwelteinflüssen geschützt werden können.

Atmosphärendruckplasmen werden bei Raumbedingungen gezündet. Mit ihnen versuchen die Wissenschaftler gezielt, angelauene »Flecken« auf Silberobjekten zu reduzieren. Von Vorteil ist hier, dass nicht das ganze Objekt behandelt werden muss, sondern ein Plasmastift eine lokale Reinigung ermöglicht. Bei dieser schonenden Vorgehensweise sieht der Restaurator direkt, was passiert, und kann die reduktive Behandlung objektspezifisch durchführen. Nun sollen diese Plasmen noch an anderen Metallen und Legierungen getestet werden. Des Weiteren lassen sich mit einem miniaturisierten Plasmastift an modernen Gemälden abplatzende Farbschichten auf Kunststoffen wieder verkleben.

Noch mehr Grund zur Zuversicht liefert den Archivaren der Einsatz von beschleunigten Elektronen. Diese können Zellulosefasern chemisch miteinander oder mit eingebrachten Polymeren vernetzen und so das Papier stabilisieren. Ein positiver Nebeneffekt ist zudem ihre keimtötende Wirkung. Da die Behandlung mit niederenergetischen Elektronen kostengünstig und schnell ist sowie flexibel dem Einsatzort angepasst werden kann, steigt die Chance, selbst riesige Massen an bedrohtem Papier zu bewältigen. Ein gigantischer Fundus unserer Geistesgeschichte ließe sich so retten.



FRAUNHOFER IST

Silber läuft rasch an – und lässt sich leicht mit Politur reinigen. Weil dabei auch Originalsubstanz abgetragen wird, sollten historische Stücke so nicht behandelt werden. Schonender ist hingegen die Säuberung mit einem Niedertemperaturplasma.

Von der Theorie in die Praxis

Um erfolgreich unser Kulturerbe zu erhalten, zu pflegen und zu restaurieren, müssen sich die Verantwortlichen untereinander und mit Experten anderer Fachrichtungen austauschen.

Kaum ein Ort scheint geeigneter zu sein, um Restauratoren, Architekten, Techniker, Stuckateure, Kuratoren und andere Fachleute über neue Erkenntnisse und geeignete Maßnahmen zum Schutz von Kulturgütern zu informieren: Die Klosteranlage Bronnbach bei Wertheim aus dem 12. Jahrhundert ist selbst ein Denkmal und hat zugleich moderne Tagungsräume und Labore für praktische Übungen zu bieten. Sie beherbergt das Internationale Zentrum für Kulturgüterschutz und Konservierungsforschung IZKK, das auf Initiative des Fraunhofer-Instituts für Silicatforschung ISC sowie des Landkreises Main-Tauber 2008 gegründet wurde und sich als Bildungseinrichtung versteht. Als besonders günstig erweist es sich, dass dort auch der ISC-Fachbereich Kulturgüterschutz angesiedelt ist, der eine materialwissenschaftliche und chemische Expertise zu Korrosionsprozessen besitzt. Die Forscher prüfen zudem historische Objekte aus Metall, Email, Glasuren oder Mosaiken auf Schäden durch Umweltbelastungen, entwickeln Schutzmaßnahmen und führen Klimamessungen in Museen oder Vitrinen durch.

Ein ebenso passendes und attraktives Ambiente fand das Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege in der Alten Schäferei des Klosters Benediktbeuern, das vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP geführt wird. Zu den Aufgaben zählen neben der Erforschung, der Sammlung und der Vermittlung neuer Er-

kenntnisse auch die didaktische Demonstration von Sanierungstechniken. Das Fraunhofer-Zentrum ist eine fachkompetente Anlaufstelle insbesondere für die Frage, wie energetisch sinnvoll saniert werden kann – ohne den Denkmalschutz und die konservatorischen Aufgaben zu verletzen und ohne Bauschäden zu verursachen. Für ebene Bereiche untersuchen die Forscher traditionelle Lösungen, entwickeln sie weiter und suchen zugleich nach innovativen Wegen zur energetisch effizienten Sanierung von Altbauten und Baudenkmalern. Ausstellungen und Lehrprogramme dienen der Weiterbildung von Architekten, Ingenieuren, Flachplannern, Handwerkern, Bauherren, Kommunen und interessierten Laien. Zudem soll der Öffentlichkeit mit der Alten Schäferei als »gläserner Baustelle« beispielhaft eine denkmalgerechte Instandsetzung gezeigt werden.

Eine Veranstaltungsreihe zu nachhaltiger Energieeffizienz in Museen begeisterte 2010 und 2011 ein großes Fachpublikum in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Konzipiert von der Forschungsallianz Kulturerbe und der Deutschen Kongress GmbH, bot »Das grüne Museum« den Teilnehmern mit Vorträgen, Ausstellungen und Diskussionsrunden Gelegenheit, sich über Themen

wie Energie sparende Klimatisierung, Konservierungs-, Restaurierungs- und Lagerungskonzepte oder Schadstoffreduktion zu informieren. Eine wichtige Komponente in Museen ist zum Beispiel die Beleuchtung, denn sie rückt ein Exponat für den Betrachter erst ins rechte Licht. Doch geben viele Lichtquellen nicht nur unnötig Wärme ab, sondern können Materialien auch schädigen. Vor UV-Strahlung schützen Verschattungen oder Filter. Aber auch der sichtbare Bereich des Spektrums kann gefährlich sein. Aus diesem Grund stieß die Präsentation einer Datenbank, die innerhalb des Projekts »Auswahl geeigneter Leuchtmittel zum Einsatz in Museen« vom Rathgen-Forschungslabor in Berlin, dem Germanischen Nationalmuseum in Nürnberg und der TU Berlin erstellt wurde, auf besonderes Interesse. Sie listet das Schädigungspotenzial und den Farbeindruck von Lichtquellen wie den immer häufiger genutzten LED-Leuchtsystemen auf.

Für die Erhaltung von Kulturgütern werden neueste Technologien entwickelt, doch ebenso wichtig sind die Aus- und Weiterbildung sowie die Anwendung in der Praxis.



IZKK / FRAUNHOFER ISC

Wussten Sie, ...



FRAUNHOFER IAP

... dass Millionen von Zeitungen in den Archiven so stark geschädigt sind, dass sie nicht einmal mehr digital erfasst werden können?

Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP hat zusammen mit der Staatsbibliothek zu Berlin ein kostengünstiges Verfahren entwickelt, um das Papier solcher Zeitungen zu stabilisieren:

Mit einer Klebefolie wird zunächst jedes Blatt einzeln vom Stapel gehoben. Dann wird auf die andere Seite eine klebstofffreie Siegelfolie aufgelegt und das Blatt abschließend laminiert. Derart gefestigt, kann der Zeitungsbogen problemlos digitalisiert werden.

... dass ursprünglich zum Schutz gedachte Substanzen unser Kulturgut und die Umwelt schädigen können?

Ausgasende Inhaltsstoffe zum Beispiel aus Holz- und Brandschutzmitteln können die Raumluft belasten, und auskristallisierende Substanzen greifen womöglich das Gefüge der Materialien an. Um dem entgegenzutreten, hat das Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT verschiedene Reinigungsverfahren entwickelt, die teils schon in der Erprobungsphase sind. Das Institut berät und führt notwendige Analysen und Messungen durch.

... dass die Zukunft des klimagerechten Bauens in der Vergangenheit liegt?

Seit Zehntausenden von Jahren verstehen es die Menschen, in den unterschiedlichen Regionen der Erde mit den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln klimagerecht zu bauen. Sie entwickelten einen Baustil, der den Wetterbedingungen vor Ort und den dortigen Lebensbedürfnissen angepasst war. Deshalb muss die traditionelle Architektur vergangener Epochen studiert werden, um daraus für moderne Baukonzepte zu lernen. Dem nachhaltigen, klimagerechten Bauen werden sich das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP und der Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart in den kommenden Jahren intensiv widmen. Den Kern dieses Forschungsvorhabens bildet das internationale Promotionskolleg »Climate-Culture-Building CCB«.

... dass Staub und andere Substanzen in der Raumluft sowohl Exponate in Museen als auch die Gesundheit von Mitarbeitern gefährden können?

Aus einem Projekt des Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Instituts ist der Leitfaden »Schadstoffe in Museen, Bibliotheken und Archiven« hervorgegangen, der über Innenraumhygiene und Luftschadstoffe informiert, Messverfahren vorstellt und Hilfestellung für die Prävention und Sanierung bietet. Ebenso gibt die Broschüre Auskunft über Schäden an musealem Sammlungsgut, die durch Gase verursacht werden. Der Leitfaden kann ab Ende 2012 in der 2. Auflage beim Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB Stuttgart bezogen werden.

... dass Dosimeter auch Licht überwachen können?

Sowohl natürliches als auch künstliches Licht kann empfindliches Archivgut, das zum Beispiel in einer Vitrine ausgestellt ist, schädigen. Mit einem Lichtdosimeter hat das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC ein Frühwarnsystem entwickelt: Eine blaue Schicht auf einem Glaträger verändert unter Lichteinfall kontinuierlich ihren Farbton und zeigt damit die Belastung an. Der sehr einfach und präzise arbeitende Lichtdosimeter wurde 2003 mit dem Europäischen Innovationspreis ausgezeichnet.



FRAUNHOFER ISC

Forschungsallianz Kulturerbe

SPRECHER DER FORSCHUNGSALLIANZ KULTURERBE

Fraunhofer-Gesellschaft

Prof. Dr. Klaus Sedlbauer,
E-Mail: klaus.sedlbauer@ibp.fraunhofer.de
Dr. Johanna Leissner (Stellvertreterin),
E-Mail: johanna.leissner@zv.fraunhofer.de

Leibniz-Gemeinschaft

Dr. Stefan Brüggerhoff,
E-Mail: stefan.brueggerhoff@bergbaumuseum.de
Dr. Ursula Warnke (Stellvertreterin),
E-Mail: warnke@dsm.museum

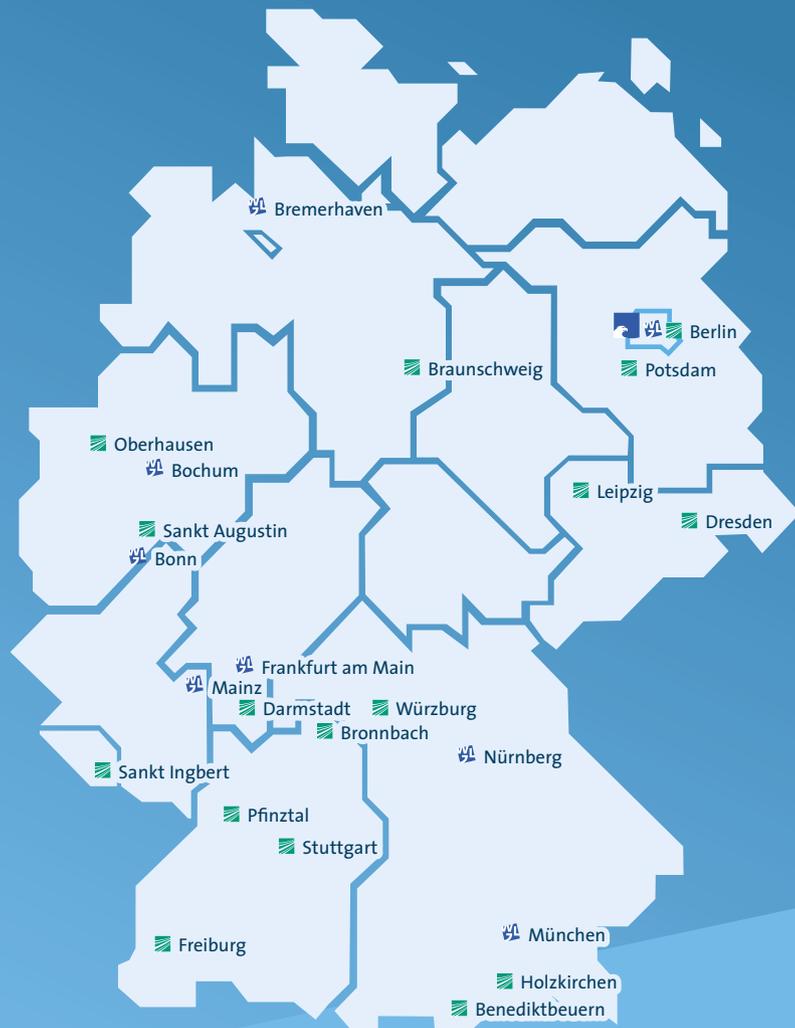
Stiftung Preußischer Kulturbesitz

Prof. Dr. Stefan Simon,
E-Mail: s.simon@smb.spk-berlin.de
Dr. Barbara Göbel (Stellvertreterin),
E-Mail: goebel@iai.spk-berlin.de

DIE MITGLIEDSEINRICHTUNGEN

Fraunhofer

- Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam – Prof. Dr. André Laschewsky (andre.laschewsky@iap.fraunhofer.de)
- Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen – Dipl.-Restaurator Univ. Ralf Kilian (ralf.kilian@ibp.fraunhofer.de)
- Institut für Biomedizinische Technik IBMT, Sankt Ingbert – Dr. Frank Tiefensee (frank.tiefensee@ibmt.fraunhofer.de)
- Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal – Dr. Thomas Reichert (thomas.reichert@ict.fraunhofer.de)
- Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FEP, Dresden – Dipl.-Phys. Wolfgang Nedon (wolfgang.nedon@fep.fraunhofer.de)
- Institut für Graphische Datenverarbeitung IGD, Darmstadt – Prof. Dr. André Stork (andre.stork@igd.fraunhofer.de)
- Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart – Dr. Uwe Vohrer (uwe.vohrer@igb.fraunhofer.de)
- Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI, Braunschweig – Dr. Alexandra Schieweck (alexandra.schieweck@wki.fraunhofer.de)
- Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin – Dr. Manfred Bogen (manfred.bogen@iais.fraunhofer.de)
- Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg – Dr. Dominik Giel (dominik.giel@ipm.fraunhofer.de)
- Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin – Dr. Bertram Nickolay (bertram.nickolay@ipk.fraunhofer.de)
- Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Braunschweig – Dr. Michael Thomas (michael.thomas@ist.fraunhofer.de)
- Institut für Silicatforschung ISC, Würzburg – Dr. Paul Bellendorf (paul.bellendorf@isc.fraunhofer.de)
- Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen – Dipl.-Ing. Erich Jelen (erich.jelen@umsicht.fraunhofer.de)
- Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, Dresden – Dr. Udo Klotzbach (udo.klotzbach@iws.fraunhofer.de)
- Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart – Dipl.-Ing., Dipl.-Wipäd. Volker Schweizer (volker.schweizer@irb.fraunhofer.de)
- Fraunhofer-Zentrum Mittel- und Osteuropa MOEZ, Leipzig – Urban Kaiser M. A. (urban.kaiser@moez.fraunhofer.de)
- Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege, Kloster Benediktbeuern – Dr. Britta von Rettberg (britta.von.rettberg@ibp.fraunhofer.de)
- Internationales Zentrum für Kulturgüterschutz und Konservierungsforschung IZKK, Kloster Bronnbach – Dipl.-Betr. Sabrina Rota (sabrina.rota@izkk.de)
- Fraunhofer-Büro Brüssel – Dr. Johanna Leissner (johanna.leissner@zv.fraunhofer.de)



Leibniz Gemeinschaft

- Deutsches Bergbau-Museum, Bochum – Dr. Stefan Brüggerhoff (stefan.brueggerhoff@bergbaumuseum.de)
- Deutsches Museum, München – Prof. Dr. Helmuth Trischler (h.trischler@deutsches-museum.de)
- Deutsches Schiffahrtsmuseum, Bremerhaven – Dr. Ursula Warnke (warnke@dsm.museum)
- Forschungsinstitut und Naturmuseum Senckenberg, Frankfurt am Main – Dr. Stephan Schaal (stephan.schaal@senckenberg.de)
- Germanisches Nationalmuseum, Nürnberg – Oliver Mack M. A. (o.mack@gnm.de)
- Museum für Naturkunde, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung, Berlin – Dr. Peter Bartsch (peter.bartsch@mfn-berlin.de)
- Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Mainz – Dr. Susanne Greiff (greiff@rgzm.de)
- Zoologisches Forschungsmuseum Alexander Koenig, Bonn – Prof. Dr. J. Wolfgang Wägele (wwaegel.zfmk@uni-bonn.de)



Stiftung Preußischer Kulturbesitz

- Geheimes Staatsarchiv Preußischer Kulturbesitz, Berlin – Direktion (gsta.pk@gsta.spk-berlin.de)
- Ibero-Amerikanisches Institut, Berlin – Direktion (iai@iai.spk-berlin.de)
- Staatsbibliothek zu Berlin, Berlin – Generaldirektion (barbara.schneider-kempff@sbb.spk-berlin.de)
- Staatliche Museen zu Berlin, Berlin – Generaldirektion (generaldirektion@smb.spk-berlin.de)
- Staatliches Institut für Musikforschung, Berlin – Direktion (sim@sim.spk-berlin.de)

Herausgeber:

Forschungsallianz Kulturerbe
www.forschungsallianz-kulturerbe.de
info@forschungsallianz-kulturerbe.de

Verantwortlich:

Dr. Johanna Leissner, stellvertretende Sprecherin der Forschungsallianz Kulturerbe, Fraunhofer-Büro Brüssel, Rue du Commerce 31, B-1000 Brüssel, Tel. +32 2 50642-43, johanna.leissner@zv.fraunhofer.de

Viktoria Piehl M. A., Betriebswirtin (WFA), M. A., wissenschaftliche Mitarbeiterin der Forschungsallianz Kulturerbe

Eine Publikation von:

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
CUSTOM
PUBLISHING

www.spektrum.de/cp
Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg

Leitung: Dr. Joachim Schüring

Redaktion: Dieter Beste, Marion Kälke, Karin Schlott

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

Gestaltung: Claus Schäfer

TITELBILDER:
IZKK / FRAUNHOFER ISC; WOLFGANG CONRAD, LUTHERSTADT EISLEBEN;
FRAUNHOFER IST; IZKK / FRAUNHOFER ISC
(VON LINKS NACH RECHTS)