

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

 Gesellschaft 3.0

Wir werden immer
älter – bei guter
Gesundheit

NOVEMBER 2011

INTELLIGENZ

Die kognitiven Höchstleistungen
von Schimpansen und Delfinen

COMPUTER

Wie neue Superrechner die
Wissenschaft voranbringen

ÖKOLOGIE

Faszinierende Lebens-
formen in der Tiefsee

Gibt es parallele Welten?

Dem Multiversum auf der Spur

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





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Die größte Unbekannte

In was für einer Welt leben wir eigentlich? Etwa 73 Prozent ihrer Masse besteht nach heutiger Vorstellung aus Dunkler Energie, 23 Prozent aus Dunkler Materie; beides ist jedoch experimentell nicht nachgewiesen. Von den verbleibenden vier Prozent normaler Materie ist nur ein Zehntel in den für uns sichtbaren Galaxien enthalten. Wo sich der Rest verbirgt, darüber rätseln die Astronomen noch. Ohnehin bleibt ihnen prinzipiell verborgen, was sich außerhalb des kosmischen Horizonts von rund 42 Milliarden Lichtjahren abspielt. Entstehen und vergehen in unvorstellbarer Ferne womöglich ständig andere Universen innerhalb eines Hyperraums – und dazu solche, in denen die unterschiedlichsten Naturgesetze gelten?

Physiker bezeichnen das hypothetische Gebilde mehrerer oder gar unendlich vieler Universen als Multiversum. Quanteneffekte im Vakuum des Hyperraums könnten einen Kosmos nach dem anderen hervorbringen, mit unterschiedlichen Materietypen und -verteilungen, so lautet eine besonders intensiv diskutierte Theorie, das Modell der chaotischen Inflation. Ist unser Universum also nur die für uns nächste aller Welten, ansonsten aber nichts Außergewöhnliches?

Leserzuschriften verraten uns, dass manche von Ihnen derlei Überlegungen der Kosmologie misstrauisch gegenüberstehen, ja sie teils eher für Sciencefiction halten als für seriöse Wissenschaft. Doch die komplizierten mathematischen Modelle sind mehr als *L'art pour l'art*. Beispielsweise erschlägt die Annahme paralleler Universen die beiden fundamentalen Fragen, warum das Universum so ist, wie es ist, und warum die elementaren Naturkonstanten Werte annehmen, die das Entstehen von Leben ermöglichen. Antwort: Wenn immer neue Universen entstehen, dann eben auch irgendwann eines mit genau den Eigenschaften, die unsere Art von Leben begünstigen. Diese Argumentation hat einen gewissen Charme. Dennoch dürften eher die Skeptiker unter Ihnen an unserer aktuellen Titelgeschichte Gefallen finden. Der Mathematiker und Kosmologe George F. R. Ellis von der Universität Kapstadt unterzieht die Argumente der Multiversum-Anhänger einer Fundamentalkritik in sieben Akten (ab S. 36). Er kommt zu dem Schluss, dass es sich beim Multiversum um »eine philosophische Spekulation auf wissenschaftlicher Grundlage« handelt, und fordert von den Befürwortern, die Grenzen der Aussagekraft ihrer Denkübungen offenzulegen.

Was meinen Sie: Wie spekulativ darf harte Wissenschaft sein? Und müssen Forscher die Grenzen ihrer Modelle sowie ihrer Interpretationen von empirischen Daten stets offensiv zur Schau stellen? Ich empfehle Ihnen Ellis' Artikel, der sich in weiten Teilen wie ein Kommentar, ja fast wie eine Streitschrift liest, ganz besonders zur Lektüre!

Herzlich Ihr

Car R. Köhnel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Ungeordnete statt klar strukturierte Proteine beflügeln seit Neuestem die Fantasie von Biologen. Warum, das erklären der Biophysiker **A. Keith Dunker** (links) und der Strukturbiologe **Richard W. Kriwacki** ab S. 30.



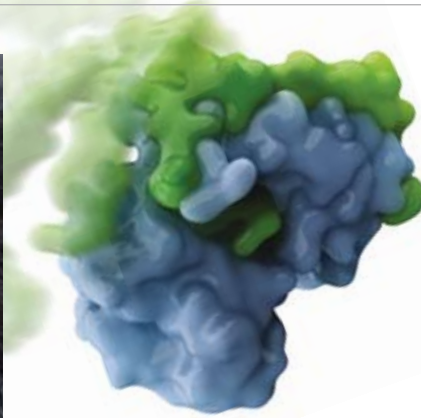
James W. Vaupel, Direktor am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock, zeichnet ab S. 52 ein optimistisches Bild der Zukunft: Unsere Kinder werden ein hohes Alter bei guter Gesundheit erleben.



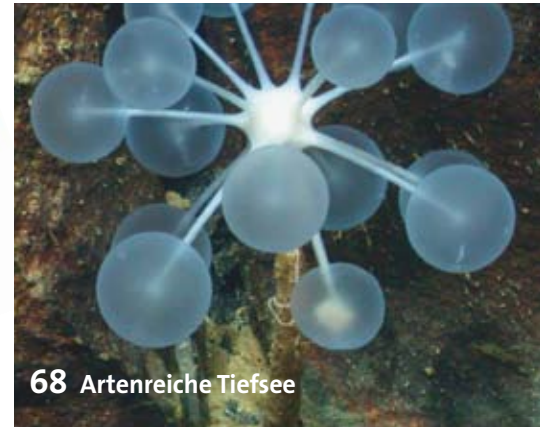
Thomas Lippert (links) und **Achim Bachem** vom Forschungszentrum Jülich stellen ab S. 84 die spektakulären Lösungen gigantischer Rechenaufgaben vor, für die erst seit Kurzem ausreichende Computerkapazitäten in Deutschland verfügbar sind.



22 Intelligente Tiere



30 Proteinfaltung



68 Artenreiche Tiefsee



60 Wikinger an der Seine

BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 22 Intelligenzbestien

Maddalena Bearzi, Craig Stanford
 Delfine und Menschenaffen verhalten sich in vielem sehr ähnlich: So bilden sie strategische Koalitionen und führen Täuschungsmanöver durch. Möglich macht das ihr überdurchschnittlich großes Gehirn

30 Proteine ohne Struktur

A. Keith Dunker, Richard W. Kriwacki
 Viele Proteine erfüllen ihre biologische Funktion, ohne sich jemals vollständig zu falten. Womöglich besitzt sogar jedes dritte menschliche Eiweiß große unstrukturierte Abschnitte

PHYSIK & ASTRONOMIE

TITELTHEMA

▶ 36 Multiversum in Beweisnot

George F.R. Ellis
 Kosmologen meinen, es gebe unzählige Paralleluniversen mit jeweils eigenen Naturgesetzen. Doch niemand wird ihre Existenz je nachprüfen können

SCHLICHTING!

44 Eingebildete Farben

H. Joachim Schlichting
 Weil unser visuelles System uns gerne weiße Wände vorgaukelt, kommen gelegentlich unerwartete Farben zum Vorschein

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

46 Falltür, Jo-Jo und Billard

Norbert Treitz
 Kann etwas schneller fallen als im freien Fall? Ja. Das zeigt schon eine simple Holzlatte

MENSCH & KULTUR

Gesellschaft 3.0

▶ 52 Das Jahrhundert der Hundertjährigen

James W. Vaupel
 Die Menschen leben heute zehn Jahre länger als noch vor 40 Jahren – und das bei besserer Gesundheit. Ein Ende der Entwicklung ist nicht abzusehen

60 Friedliche Berserker

Vincent Carpentier
 Ihren Zeitgenossen galten die Wikinger als mordlüsterne Krieger. Doch jene, die das Seinetal besetzten, integrierten sich in die fränkische Gesellschaft und gründeten das Herzogtum Normandie

36

TITELTHEMA

Gibt es parallele Welten?



ERDE & UMWELT

- **68 Üppige Vielfalt trotz Nahrungsmangel**
Craig R. McClain
Der Boden der Tiefsee, lange als riesige Ödnis angesehen, hat sich als ein biologisch komplexes Ökosystem entpuppt, dessen Schicksal eng mit den obersten Meeresschichten verknüpft ist

TECHNIK & COMPUTER

- **84 Wie Supercomputer die Forschung prägen**
Achim Bachem, Thomas Lippert
Höchstleistungsrechner dienen als eigenständiges, ungeheuer vielseitiges Forschungsmittel. Je nach Verwendung ersetzen sie ein Mikroskop, einen Teilchenbeschleuniger oder auch eine Zeitmaschine

Nach S. 92 folgt eine 52-seitige Sonderpublikation der Nord Stream AG über die Ostsee-Erdgaspipeline

Titelmotiv: Kenn Brown, Mondolithic Studios; NASA; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

- 8** Brustkrebsgen verhindert Entpacken von DNA • Selbstreinigung ohne Lotoseffekt • Ameise als Selbstmordattentäter • Aktive galaktische Kerne helfen Entfernungen zu messen • RNA aus der Nahrung beeinflusst Cholesterinspiegel • Extrem lange Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung mit Nanodiamanten

BILD DES MONATS

- 11 Junge Krater auf Merkur**

FORSCHUNG AKTUELL

- 12 Archaische DNA erhellt Evolution des Menschen**
Haben wir nützliche Gene von ausgestorbenen Verwandten geerbt?
- 14 Rekorde aus der Spiegelwelt**
Erzeugung und Nachweis von Antiatomen in Beschleunigern
- 18 Alzheimer durch chronischen Stress**
Hormonell bedingte Veränderungen des Tau-Proteins töten Neurone
- 19 Ein Käfig als Katalysator**
Gerüststruktur für die Synthese optisch aktiver Moleküle
- 20 Springers Einwüfe**
»Ihr werdet euch nie ändern!«

WEITERE RUBRIKEN

- 3** Editorial
- 6** Leserbrief/Impressum
- 93** Rezensionen
Wolfgang Nentwig (Hg.): Unheimliche Eroberer
Gerhard Roth: Wie einzigartig ist der Mensch?
Oekom e. V. (Hg.): Post-Oil City, u. a.
- 100** Wissenschaft im Rückblick
Vom Babysaurier zum hygienischen Papiergeld
- 101** Exponat des Monats
Der Benz-Patent-Motorwagen Nr. 1
- 102** Vorschau

Trifft das klassische Inflationsmodell zu? Manche Kosmologen bezweifeln, dass das Universum tatsächlich kurz nach dem Urknall einen heftigen Wachstumsschub erfuhr (gelbes Gebiet).



MALCOLM LODWIN

Einstein und das zyklische Universum

Kosmologe Paul J. Steinhardt schlug ein zyklisches Modell des Universums vor, das ohne kosmische Inflation auskommt. (»Kosmische Inflation auf dem Prüfstand«, August 2011, S. 40)

Karl-Heinz Volpert, Plettenberg: Auf einen Artikel mit solch einer Aussage habe ich schon lange gewartet. Hauptsächlich deswegen, weil mir nie aus dem Kopf gegangen ist, was ich in den 1950er Jahren in einem Taschenbuch über Einstein

(»Einstein und das Universum«) gelesen habe: dass dieser mutmaßte, das Universum könne sich möglicherweise zyklisch ausdehnen und zusammenziehen. Hat Einstein diese Vermutung wirklich geäußert? Wenn das so wäre, dann wäre das wieder ein Hinweis auf seine intuitiv vorausschauende Genialität.

Antwort der Redaktion: »Einstein und das Universum« von Lincoln Barnett, auf Deutsch 1952 als Fischer-Taschenbuch erschienen, hat so manchen zur Physik verführt. Dort wird die Idee ei-

nes zyklisch expandierenden und kontrahierenden Universums dem amerikanischen Theoretiker Richard Chase Tolman (1881–1948) zugeschrieben. Einstein selbst favorisierte zunächst ein statisches Universum und führte dafür eigens eine kosmologische Konstante ein. Als dann der US-Astronom Edwin Hubble (1889–1953) die kosmische Expansion entdeckte, bezeichnete Einstein die Einführung der kosmologischen Konstante als »die größte Eselei meines Lebens«. Über ein zyklisches Universum speulierte Einstein nicht.

Ausgezeichneter Überblick

Die Herkulesaufgabe, das umfassende Werk des Universalgenies Leibniz der Öffentlichkeit zugänglich zu machen, beschrieb der Wissenschaftshistoriker Eberhard Knobloch (»Die Kunst, Leibniz herauszugeben«, September 2011, S. 48)

Prof. Dr. Karl Ulrich Mayer, Präsident der Leibniz-Gemeinschaft, Berlin: Gratulation zu dem Text über Gottfried Wilhelm Leibniz. Dem Verfasser gebührt großer Dank in doppelter Hinsicht. Prof. em. Eberhard Knobloch ist nicht nur eine treibende Kraft bei der

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 Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, 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: Silevotstraße 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: Dr. Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Gabriele Herbst, Andrea Jungbauer, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer
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 (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 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 Dölz; 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
Anzeigenverteilung: 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; 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; Kundenbetreuung@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. 32 vom 01.01.2011.
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: © 2011 (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.



Edition der zahlreichen Schriften dieses großen Gelehrten und hat sich damit bereits jetzt bleibende Verdienste erworben, sondern auch – wie der Artikel auf Schönste belegt – ein hervorragender Kommunikator.

Der Artikel gibt einen ausgezeichneten Überblick über das Leben und Wirken von Leibniz – und er unterstreicht, wie richtig die Gründungsväter der Leibniz-Gemeinschaft lagen, als sie diesen vielseitigen Wissenschaftler und Politikberater als Namenspatron für unsere Wissenschaftsorganisation wählten. Leibniz' Werk und sein universaler Anspruch sind für uns nach wie vor Ansporn unserer Arbeit.

Serotonintransporter und Depression

Fehlerhafte Verbindungen im Gehirn könnten häufiger psychische Störungen verursachen als bisher angenommen und Chancen zur besseren Früherkennung bieten, meinte der Neurowissenschaftler Thomas R. Insel. (»Gestörte Schaltkreise«, Mai 2011, S. 24)

Claudia Polzin, Berlin: Aus meiner Sicht wird die Rolle der Serotonintransporter-Moleküle widersprüchlich beschrieben. Vollkommen einleuchtend ist die Aussage, dass bei Depressionen ein Gebiet mit besonders vielen dieser Molekülen, die Area 25, eine erhöhte Aktivität aufweist. Denn das Vorhandensein von vielen Serotonintransporter-Molekülen bedeutet, dass die Wirkung des Serotonins – eines Neurotransmitters, der für eine positive Grundstimmung sorgt – schnell beendet wird.

Unklar bleibt jedoch, warum das Vorkommen der kurzen Genvarianten des Serotonintransporter-Gens, welches zu einer geringeren Produktion der Transportermoleküle führt, mit einem erhöhten Depressionsrisiko verbunden sein soll. Weniger Transportermoleküle sollten eigentlich bewirken, dass Serotonin länger im synaptischen Spalt verweilt, seine Wirkung also erhöht wird. Folglich sollten Personen mit der kurzen Variante des Serotonintransporter-Gens ein verringertes Risiko haben.

Antwort der Redaktion: Auf den ersten Blick wirkt es tatsächlich widersprüchlich, dass das »kurze« Serotonintransporter-Gen sowohl mit niedriger Expression als auch mit hoher Depressionsgefahr verbunden ist. Dennoch ist dies korrekt. Der Grund liegt darin, dass das kurze Gen wohl noch andere, indirekte Auswirkungen hat.

So scheint es dafür zu sorgen, dass die Betroffenen weniger gut mit Angst umgehen können; sie besitzen auch eine deutlich kleinere Amygdala, die für die Angstverarbeitung zuständig ist. Andere Studien deuten bei diesen Personen auf ein vergrößertes Volumen von Pulvinar und limbischen Regionen des Thalamus hin. Es dürften diese anatomischen Veränderungen sein, die das verstärkte Depressionsrisiko begründen.

Warum so umständlich?

Die Mikrobiologen Kenneth D. Coleman und Raymond A. Zilinskas warnten vor der möglichen Verwendung von Botox als Biowaffe. (»Echte Gefahr durch falsches Botox«, Oktober 2011, S. 36)

Kai Petzke, Berlin: Der Artikel enthält nicht die geringsten Hinweise darauf, wie aufwändig die Herstellung größerer Mengen konzentrierten Botox-Proteins ist. Es handelt sich ja um ein recht empfindliches Eiweißmolekül, das an Luft oder bei Hitze schnell denaturiert. Viele einfache Methoden zur Aufkonzentration wie etwa die Abdestillation von Wasser aus einer Vorlage scheiden damit aus. Entsprechend selten war bisher der erfolgreiche Einsatz von Botox als Biowaffe, obwohl das Toxin schon lange bekannt ist und die Toxin produzierenden Bakterien einfach zu züchten sind.

Die Ehec-Epidemie hat jüngst gezeigt, wie gefährlich lebende Bakterien für die Bevölkerung sein können und wie hilflos die Behörden bei der Suche nach der Infektionsquelle agieren. Warum sollte es ein Terrorist also überhaupt darauf anlegen, das Toxin zu isolieren oder für viel Geld von jemandem zu kaufen, der es für ihn isoliert, wenn

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

er stattdessen mit viel weniger Aufwand das Bakterium selbst züchten und für den Angriff nutzen kann?

Errata

*»Spinblockade in Plastiksolarzellen«
August 2011, S. 16*

Der Kasten auf S. 18 enthält leider zwei Flüchtigkeitsfehler. Ganz oben in der Mitte muss »Spindrehung durch schwachen Mikrowellenpuls« und rechts darunter »P⁺/P⁺-Paar« stehen.

*»Hormonhaushalt in Gefahr«
September 2011, S. 66*

In der Grafik auf S. 71 wurde das Gerüst von Testosteron falsch gezeichnet. Rechts oben müsste statt eines Sechsrings ein Fünfring stehen.

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

MOLEKULARBIOLOGIE

Brustkrebsgen verhindert Entpacken von DNA

Mutationen im Krebsgen *BRCA1* führen bei Frauen oft zu Brust- oder Eierstocktumoren. Wie genau der Ausfall des Gens die Zellen schädigt, war allerdings bislang rätselhaft. Nun glauben Forscher den Funktionsmechanismus besser zu verstehen: Offenbar sorgt das dort kodierte Enzym dafür, dass bestimmte DNA-Sequenzen verpackt bleiben und deshalb nicht von der Zellmaschinerie abgelesen werden (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2011, S. 28). Geschieht dies doch – wenn *BRCA1* defekt ist –, bringt

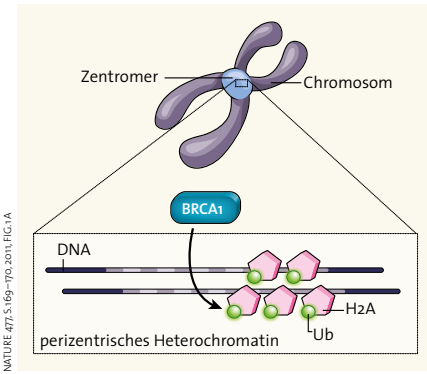
das den Genhaushalt der Zelle verhängnisvoll durcheinander.

Dies zeigte sich in Versuchen mit Mäusen, die Forscher um Inder Verma vom Salk Institute in La Jolla, US-Bundesstaat Kalifornien, durchführten. Dabei schalteten sie *BRCA1* aus, worauf Heterochromatin – besonders dicht gepackte, normalerweise nicht aktive Bereiche des Genoms – stärker aufgelockert war als üblich. Dort wurden nun hochrepetitive Erbgutabschnitte, »Satelliten-DNA«, in RNA übersetzt (transkribiert). Daraufhin destabilisierte sich das gesamte Genom, weil die Transkripte der Satelliten-DNA das normale Zellwachstum unterbinden,

die korrekte homologe Rekombination der beiden DNA-Stränge stören oder zu Brüchen im Erbgutmolekül führen.

Vermas Team vermutet, dass *BRCA1* Heterochromatin inaktiv hält, indem es an Verpackungsproteine der DNA, die H2A-Histone, Ubiquitin anhängt (siehe Bild). Mehreren früheren Studien zufolge ist *BRCA1* an der DNA-Reparatur, der Regulation von Zellzyklus und Transkription, der Inaktivierung von X-Chromosomen und anderen Prozessen beteiligt. All dies könnte nun tatsächlich zutreffen, denn die bei ausgeschaltetem *BRCA1* nicht mehr blockierten DNA-Sequenzen destabilisieren das Genom womöglich in unterschiedlichsten Regionen. Zwar ergebe sich aus den Ergebnissen nicht sofort eine neue Bekämpfungsstrategie für Krebs, so die Forscher, aber man könnte zum Beispiel untersuchen, ob solche Prozesse auch bei anderen Krebsformen eine Rolle spielen.

Nature 477, S. 179–184, 2011



Normalerweise hängt das *BRCA1*-Protein an H2A-Histone Ubiquitin (Ub) an. Zentrale Bereiche des Chromosoms nahe dem Zentromer (perizentrisches Heterochromatin) bleiben so inaktiv. Das funktioniert nicht mehr, wenn *BRCA1* ausfällt – zum Beispiel durch Mutation.

MATERIALWISSENSCHAFT

Selbstreinigung ohne Lotoseffekt

An den Blättern der Lotosblumen perlt das Wasser einfach ab und spült den Schmutz fort, so dass sie stets sauber bleiben. Zahllose winzige Erhebungen sorgen dafür, dass ein aufliegender Wassertropfen kaum Kontakt zur Oberfläche bekommt. Deshalb rollt er ab, statt das Blatt zu benetzen.

Jetzt haben Materialwissenschaftler um Joanna Aizenberg von der Harvard University in Cambridge, Massachusetts, selbstreinigende Oberflächen vorgestellt, die dem Lotosblatt noch weit überlegen sind. Die Forscher nahmen sich den Fangtrichter der Fleisch fres-

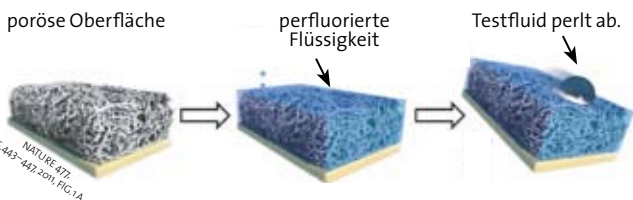
senden Kannenpflanzen zum Vorbild. Er hat auch winzige Erhebungen auf der Oberfläche, sie halten aber lediglich einen Flüssigkeitsfilm fest, der seinerseits für die Antihafteffekt sorgt. Insekten, die sich auf dem Rand des Trichters niederlassen, rutschen in ihn hinein und werden dort verdaut.

Die Forscher bauten diese Oberfläche nach, indem sie poröse Festkörper mit perfluorierter Flüssigkeit benetzten, die sich weder mit Wasser noch mit Öl mischt. Die Flüssigkeit haftet durch Adhäsion auf der Unterlage – entweder zwischen Mikrometerlängen, aufrech-

ten Stäbchen oder in einem mikroskopischen Geflecht aus Teflonfasern. So entsteht ein fixierter Oberflächenfilm, der fast völlig glatt und überdies »selbstheilend« ist: Entfernt man ihn an einer Stelle, bildet er sich rasch neu.

Die neuen selbstreinigenden Oberflächen lassen neben Wasser auch Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung abperlen, etwa Öl und Blut, und funktionieren selbst unter Drücken von mehreren hundert Atmosphären – Bedingungen, unter denen der Lotoseffekt versagt.

Nature 477, S. 443–447, 2011



Schema der neuen selbstreinigenden Oberfläche: Ein Film aus perfluorierter Flüssigkeit haftet auf einer porösen Oberfläche. Andere Fluide, die mit der Flüssigkeit nicht mischbar sind, etwa Öl, Wasser und Blut, perlen an dem Film ab.

ENTOMOLOGIE

Ameise als Selbstmordattentäter

Ameisen produzieren in Drüsen hinter ihren Mandibeln (Oberkiefern) vielfältige Botenstoffe und Sekrete, mit denen sie Artgenossen alarmieren oder sich verteidigen. Die südostasiatischen Holzameisen der Art *Camponotus cylindricus* treiben diese Taktik auf die Spitze: Sie explodieren regelrecht, wenn sie mit Feinden in Kontakt geraten, und überziehen diese mit einem klebrigen, tödlichen Sekret. Ein internationales Forscherteam um Johan Billen von der belgischen Universität Leuven untersuchte nun den Körperbau der Ameisen und entdeckte rekordverdächtige Chemieküchen im Innern der Tiere: Die Kieferdrüsen waren extrem vergrößert und reichten vom Kopf bis in den Abdomen – alle bisher bekannten Drüsenreservoirare von Ameisen fallen deutlich kleiner aus.

Wenn diese Ameisen angegriffen werden oder aber allein schon Konkurrenten in ihr Territorium eindringen, verbeißen sich einzelne Mitglieder der Kolonie in die gegnerischen Körper. Gleichzeitig scheiden sie aromatische Kohlenwasserstoffe aus, die den Feind demobilisieren. Vielfach opfern sie sich dabei allerdings gleich direkt: Sie wickeln sich geradezu um den Gegner und bringen durch den derart aufgebauten Druck aktiv die Riesendrüse



PICTURE PRESS / MINDEN PICTURES / MARK WOFFEIT

Werden südostasiatische Holzameisen der Art *Camponotus cylindricus* (rechts, Kopf unten) angegriffen, verbeißen sie sich in den Gegner und platzen auf. Das dabei explosiv freigesetzte Drüsensekret verklebt den Angreifer.

zum Platzen. Dabei setzen sie einen ganzen Schwall von gelblichen Sekreten frei, wie Laborversuche belegten.

ol. 10.1111/j.1463-6395.2011.00523.x, 2011

ASTRONOMIE

Aktive galaktische Kerne helfen Entfernungen zu messen

Kosmologen haben eine neue Methode entwickelt, um Entfernungen im All zu messen. Die Forscher um Darach Watson von der Universität Kopenhagen (Dänemark) ermittelten hierfür die absolute Helligkeit von aktiven galaktischen Kernen. Setzt man diese in Beziehung dazu, wie hell die Galaxienkerne von der Erde aus erscheinen, erhält man ein Maß dafür, welchen Abstand die Galaxienkerne zur Erde haben. Die neue Methode erlaubt es, größere kosmologische Distanzen zu messen als bisher möglich.

Aktive galaktische Kerne enthalten ein supermassereiches Schwarzes Loch, in das große Mengen Gas und Staub hineinfallen. Das Material heizt sich dabei stark auf und gibt energiereiche Strahlung ab. Diese trifft auf benachbarte Gaswolken und ionisiert

sie, was die Wolken aufleuchten lässt. Je heller die zentrale Region um das Schwarze Loch strahlt, desto tiefer ionisiert sie die umgebenden Gaswolken und umso ausgedehnter ist der Bereich, in dem die Wolken leuchten. Ändert sich die Helligkeit der Zentralregion, zeigt sich dies verzögert auch im Leuchten der benachbarten Wolken. Mit Hilfe dieser Zusammenhänge ermittelten die Forscher die Größe der leuchtenden Gaswolken und leiteten daraus die absolute Helligkeit des Galaxienkerns ab. Insgesamt untersuchten sie 38 aktive galaktische Kerne.

Die neue Methode erlaube es, Entfernungen bis zu einer kosmologischen Rotverschiebung von 4 zu messen, berichten die Forscher. Das entspricht etwa 55 Prozent vom Radius des sichtbaren Universums. Bisherige



NASA/JPL / CALTECH / SSC/TIM PYLE

Künstlerische Darstellung eines aktiven galaktischen Kerns

Methoden zur Distanzmessung funktionieren bis zu einer Rotverschiebung von 1,7: etwa 40 Prozent des Radius. Entfernungen im All zu messen, ist wichtig, um die Expansion des Universums zu untersuchen und alternative Gravitationsmodelle zu überprüfen.

arXiv, 1109.4632, 2011

PHYSIOLOGIE

RNA aus der Nahrung beeinflusst Cholesterinspiegel

Eine Klasse kurzer RNA-Schnipsel, die miRNAs, spielen eine bislang unterschätzte Rolle beim Regulieren unserer Gene: Sie werden im Körper in großer Menge ins Blut ausgeschüttet und steuern dann Stoffwechselfvorgänge in anderen, oft weit entfernten Zellen. Dabei müssen die RNA-Stücke nicht einmal aus unserem eigenen Körper stammen, berichten jetzt Forscher um Chen-Yu Zhang von der Nanjing-Universität in China. Denn sogar pflanzliche miRNAs aus der Nahrung können Prozesse in unseren Zellen steuern.

Die Forscher fütterten Mäuse mit Reis und entdeckten, dass dabei Pflanzen-miRNAs in die Zellen der Tiere

gelangen. Dort beeinflussen diese dann den Bau eines Proteins, das den Cholesterinstoffwechsel bestimmt: Die im Reis besonders konzentriert vorkommende RNA »MIR168a« reguliert die Herstellung des Rezeptorproteins LDLRAP1 (*low-density lipoprotein receptor adaptor protein 1*) und sorgt so dafür, dass weniger Rezeptoren für das als schädlich geltende LDL-Cholesterin gebaut werden. Der Körper kann somit langsamer LDL aus dem Blut in die Zellen transportieren, weshalb dessen Serumspiegel in der Folge ansteigt.

Ähnliches könnte im Körper von Millionen Menschen geschehen, denn laut Stichproben lässt sich »MIR168a« aus Reis auch in der chinesischen

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie auf spektrumdirekt.de

Bevölkerung im Blut nachweisen. Wie andere miRNAs zirkulieren die Moleküle dabei wohl geschützt in Mikrovessikeln: kleinen, membranumhüllten Bläschen. Im Prinzip könne so jegliche kurze RNA aus der Nahrung durch den Körper wandern, meinen Zhang und seine Kollegen. Womöglich verzehre man demnach nicht nur Material, um daraus Energie zu gewinnen, sondern auch Informationen, die direkt verarbeitet werden. Welche Auswirkungen dies haben könnte, ist bislang wenig untersucht. Immerhin werden aber schätzungsweise 30 Prozent aller Gene in unseren Zellen auch durch verschiedene kurze RNA-Abschnitte reguliert.

Cell Research 10.1038/cr.2011.158, 2011

CHEMIE

Extrem lange Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung mit Nanodiamanten

Ein kleiner Abstand für den Normalbürger, doch ein großer für die Wissenschaft: Chemiker haben eine stabile Bindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen (C-C-Bindung) hergestellt, die 170 Pikometer lang ist, also 170 billionstel Meter. Es handelt sich um die längste derartige Bindung, die bisher in Alkanen (gesättigten, nichtzyklischen Kohlenwasserstoffen) beobachtet wurde. Die Entdeckung wirft ein neues Licht auf die theoretisch nur schlecht verstandene Beziehung zwischen Bindungslänge und -stabilität und erklärt bislang rätselhafte Eigenschaften einiger Molekülklassen.

Die Chemiker um Peter Schreiner von der Justus-Liebig-Universität Gie-

ßen koppelten so genannte Diamanttoide aneinander: Wenige hundert Pikometer große Moleküle, die Ausschnitte aus dem Diamantgitter verkörpern und an ihrer Außenseite Wasserstoffatome tragen. Der einfachste und kleinste Vertreter ist Adamantan mit der Summenformel $C_{10}H_{16}$. Weitere Verbindungen aus dieser Stoffgruppe heißen Triamantan ($C_{14}H_{20}$) oder Diamantan ($C_{18}H_{24}$).

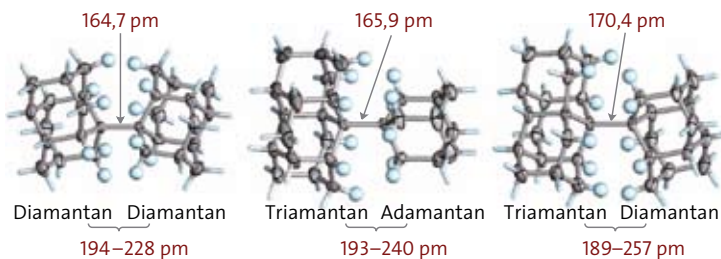
Als die Forscher die beiden letzteren Moleküle aneinanderkoppelten, entstand eine C-C-Verknüpfung zwischen ihnen, die 170,4 Pikometer lang war – mehr als zehn Prozent länger als gewöhnliche C-C-Bindungen in Alkanen. Der große Abstand rührt daher,

dass die beiden Diamanttoide wegen räumlicher (sterischer) Behinderung nicht näher zusammenrücken können. Zwar wurden ähnlich lange C-C-Bindungen schon in anderen Kohlenwasserstoffen beobachtet, dort sind sie jedoch instabil und zerfallen oberhalb von 150 Grad Celsius rasch.

Die C-C-Bindung zwischen Diamantan und Triamantan beginnt hingegen erst ab 220 Grad Celsius auseinanderzubrechen. Stabilisiert wird sie dadurch, dass die beiden Diamanttoide sich gegenseitig anziehen: Die Wasserstoffatome ihrer benachbarten Oberflächen polarisieren einander und verursachen elektrostatische Kräfte, so genannte Dispersionswechselwirkungen. Laut Röntgenstrukturanalysen liegt die Länge dieser Wasserstoff-Wasserstoff-Kontakte zwischen 190 und 260 Pikometern. Die Forscher vermuten, solche anziehenden Kontakte könnten unter anderem auch bewirken, dass verzweigte Alkane stabiler sind als unverzweigte.

Nature 477, S. 308–311, 2011

Koppeln Diamanttoide aneinander, entstehen zwischen ihnen teils sehr lange C-C-Bindungen. Bei der Verknüpfung von Diamantan und Triamantan (rechts) ist die Bindung über 170 Pikometer (pm) lang.



JUNGE KRATER AUF MERKUR

Seit März 2011 liefert die Raumsonde Messenger faszinierend detaillierte Bilder von Merkur. Darauf sind immer wieder Krater von einigen Metern bis Kilometern Durchmesser zu erkennen, die stark reflektieren – in dieser Falschfarbenaufnahme blau dargestellt. Sie erscheinen unregelmäßig, relativ flach und randlos; viele sind in Gruppen angeordnet. Da die Krater keine Spuren von Einschlägen zeigen, müssen sie vergleichsweise jung sein. David Blewett von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) und seine Kollegen vermuten, dass hier der Boden eingebrochen ist, nachdem im Untergrund verschiedene Stoffe sublimierten und entweichen konnten. Der sonnennächste Planet enthielte demnach mehr flüchtige Verbindungen in seinem Inneren, als Modelle zu seiner Entstehung bisher vorhergesagt haben.

Science 333, S. 1856–1859, 2011

PALÄOANTHROPOLOGIE

Archaische DNA erhellt Evolutionsgeschichte des Menschen

Im Gefolge der Entzifferung des Genoms des Neandertalers und einer erst kürzlich in Sibirien entdeckten Frühmenschenart zeigt sich, dass der moderne *Homo sapiens* wichtige Gene von ausgestorbenen Verwandten übernommen hat.

VON EWEN CALLAWAY

Erst im vergangenen Jahr veröffentlichten Forscher die Genomsequenzen des Neandertalers sowie einer anderen ausgestorbenen Population von Hominiden aus Sibirien und eröffneten so die Möglichkeit, Probleme der menschlichen Evolution und Frühgeschichte anzugehen, die noch vor wenigen Jahren völlig unlösbar schienen. Tatsächlich gab es in der kurzen Zeit seither bereits rasante Fortschritte. Die Liste interessanter Entdeckungen reicht von der genaueren Eingrenzung der Zeitraums, in dem sich *Homo sapiens* und Neandertaler genetisch vermischten, bis zum Aufspüren wichtiger Immungene, über welche die Menschheit als Folge des einstigen Tete-a-Tete verfügt.

Neandertaler sind benannt nach jenem Ort in der Nähe von Mettmann bei

Solingen, an dem 1856 die ersten Knochen dieser Frühmenschenart entdeckt wurden. Es handelte sich um hochgewachsene Jäger und Sammler mit ausgeprägten Überaugenwülsten, die vor 400 000 bis 30 000 Jahren Europa und Teile Asiens durchstreiften. Die Analyse ihres Genoms unter Federführung von Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig zeigte, dass sich ihre Erblinie vor einer knappen halben Million Jahren von der des modernen Menschen abspaltete, als die gemeinsamen Vorfahren von beiden noch in Afrika lebten.

Im Dezember 2010 veröffentlichte Pääbos Arbeitsgruppe die Genomsequenz einer anderen menschlichen Population, die weder dem modernen Menschen noch den Neandertalern zuzuordnen ist. Die verwendete DNA-Probe stammte aus einem 30 000 bis 50 000 Jahre alten Fingerknochen, der in einer Höhle in Denisova im südlichen Sibirien gefunden wurde (*Nature* 468, S. 1053–1060, 2010). Paläoanthropologen sprechen bei solchen Hominiden von archaischen Menschen, um sie vom modernen *Homo sapiens* abzugrenzen, der erstmals vor etwa 200 000 Jahren in Afrika auftrat.

Pääbo registriert mit Erstaunen, wie schnell andere Wissenschaftler sich auf die Genomsequenz des Neandertalers gestürzt haben, um ihr alle möglichen Informationen zu entlocken. Unmittelbar nach der Präsentation dieser Sequenz auf einer Fachtagung zur Genomik im letzten Jahr durch den Leipziger

Paläoanthropologen sollte Cory McLean sprechen. Der Doktorand von der Stanford University (Kalifornien) hatte in den Tagen zuvor das gerade erst veröffentlichte Genom fasziniert durchforstet. Dabei war ihm aufgefallen, dass den Neandertalern ebenso wie den modernen Menschen ein DNA-Stück fehlte, das bei vielen anderen Primaten Hornspitzen auf dem Penis wachsen lässt. Statt über sein ursprünglich geplantes Thema redete er nun kurzerhand darüber (*Nature* 471, S. 216–219, 2011).

Paarung mit Frühmenschen

Das wohl spektakulärste Ergebnis der Analyse des Neandertalergenoms war, dass Menschen, die außerhalb Afrikas leben, etwa vier Prozent ihres Erbguts mit diesem gemeinsam haben (Spektrum der Wissenschaft 7/2010, S. 12). Dafür gibt es nur eine plausible Erklärung: Ihre Vorfahren paarten sich nach der Auswanderung aus Afrika vereinzelt mit Neandertalern, bevor sie sich vom Nahen Osten aus über Europa und Afrika ausbreiteten.

Durch akribische Vergleiche einzelner Positionen in den Genomen mehrerer moderner Menschen mit den entsprechenden Stellen im Neandertalererbgut ist es inzwischen gelungen, den Zeitraum der genetischen Vermischung auf 65 000 bis 90 000 vor heute eingrenzen. Montgomery Slatkin und Anna-Sapfo Malaspinas von der University of California in Berkeley präsentierten diese Schätzung auf einer Tagung der Society for Molecular Biology



Der Hauptteil des Neandertalergenoms wurde anhand dieser Knochenfunde aus der Vindja-Höhle in Kroatien sequenziert.

and Evolution, die vom 26. bis 30. Juli in Kioto (Japan) stattfand.

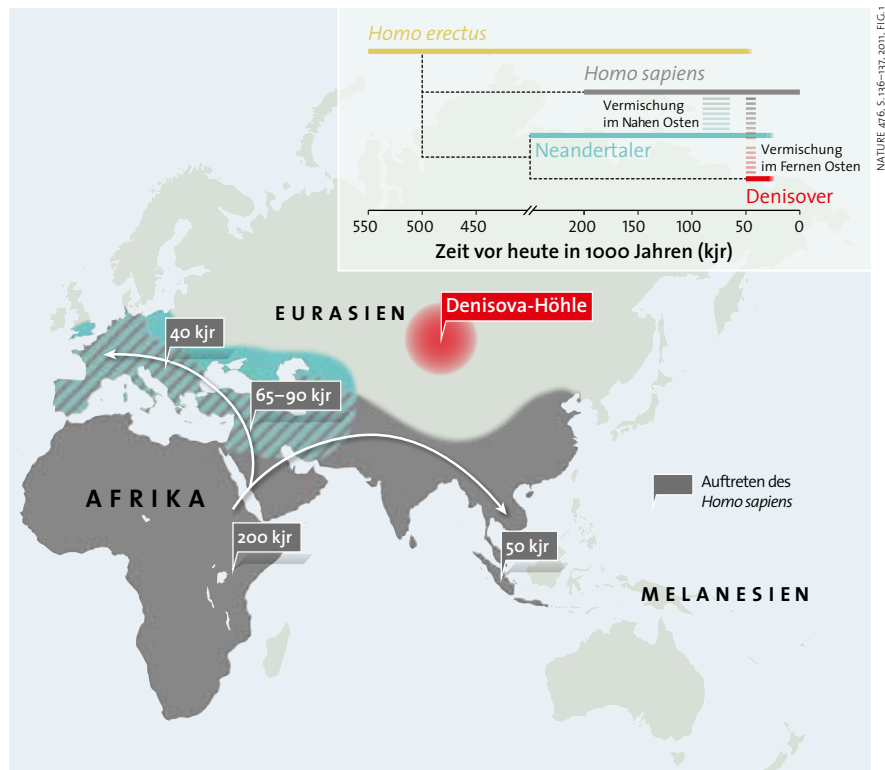
Auf der gleichen Veranstaltung berichtete David Reich von der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts), der an der Sequenzierung der Genome von Neandertalern und Denisova-Fossilien beteiligt war, über ein ähnliches Ergebnis. Außerdem passen die neuen Daten gut zu archäologischen Befunden, wonach *Homo sapiens* vor 100 000 bis 50 000 Jahren aus Afrika auswanderte. Reichs Arbeitsgruppe tüfelt nun an Methoden, mit denen sich möglicherweise Anzeichen für weitere genetische Vermischungen in der Zeit nach der Ankunft des *Homo sapiens* in Asien und Europa erkennen lassen.

Den Analysen von Pääbo und Reich zufolge hatten auch die Hominiden aus Denisova gemeinsame Nachkommen mit damals lebenden anatomisch modernen Menschen. Für sie typische DNA-Sequenzen fanden sich allerdings nur bei Einwohnern Melanesiens, also Tausende von Kilometern entfernt. Das heißt, dass die Denisover wohl irgendwann einmal über ganz Asien verbreitet waren.

Schon 2008 richtete Pääbos Team ein Labor in Peking ein. Die Forscher wollten Fossilien untersuchen, die DNA-Sequenzen von Denisovern enthalten könnten, um mehr über deren Verhältnis zu modernen Menschen zu erfahren. Doch bisher sind der Knochen, der zur Sequenzierung des Genoms diente, und ein einzelner Backenzahn aus derselben Höhle die einzigen bekannten Überreste der Denisova-Menschen geblieben.

Übernommene Immungene

Vor Veröffentlichung der ersten Analyse des Neandertalergenoms im Mai 2010 gab es bereits Spekulationen, dass *Homo sapiens* durch genetische Vermischung womöglich vorteilhafte Merkmale von anderen Frühmenschen übernommen hat. Die Rede war von Genvarianten, die mit der Entwicklung des Gehirns und der Sprachfähigkeit zusammenhängen. Die genaue Analyse des Neandertalergenoms ließ derlei Hy-



Während der Evolution und der weltweiten Wanderungsbewegungen von *Homo sapiens* kam es zur genetischen Vermischung mit archaischen Menschen wie Neandertalern und Denisovern.

pothesen jedoch wie Seifenblasen platzen. Hingegen zeigt eine Untersuchung, die Peter Parham von der Stanford University School of Medicine dieses Jahr im Juni auf einer Tagung der Royal Society in London vorstellte, dass *Homo sapiens* den Neandertalern und Denisovern wichtige Immungene verdankt. Erst die Kreuzung mit ihnen verlieh ihm anscheinend jene vielfach von Hybriden bekannte Vitalität, die ihn befähigte, die ganze Welt zu erobern.

Parhams Team verglich eine Gruppe von Immungenen, die für humane Leukozytenantigene (HLA) kodieren, bei Neandertalern, Denisovern und Gruppen von *Homo sapiens* aus aller Welt. In mehreren Fällen enthielt das Erbgut der beiden Frühmenschen Versionen der HLA-Gene, die bei modernen Europäern und Asiaten häufig, bei Afrikanern aber selten sind.

Parham führt das auf ein unterschiedliches Maß an genetischer Vermi-

schung auf den einzelnen Kontinenten zurück. Er schätzt, dass bei Europäern etwa 50 Prozent der HLA-Genvarianten von der Kreuzung mit anderen *Homo*-Spezies herrühren, während es bei Asiaten 70 bis 80 Prozent und bei den Ureinwohnern von Papua-Neuguinea sogar bis zu 95 Prozent sind.

»Demnach verdanken etliche von uns einen Teil ihrer immunologischen Widerstandskraft den Neandertalern«, meint Pääbo. John Hawks, Anthropologe an der University of Wisconsin-Madison, gibt jedoch zu bedenken, dass viele HLA-Gene aus einer Zeit stammen, als sich die Abstammungslinien von *Homo sapiens*, Neandertalern und Denisovern noch nicht getrennt hatten. Die beobachteten Unterschiede könnten bei der weiteren Evolution der einzelnen Gruppen zufällig entstanden sein.

Auch das Team von Hawks hat die archaischen Genome bereits genauer durchkämmt und dabei herausgefunden

den, dass Neandertalern und Denisovern bestimmte Gene fehlen, die dem Immunsystem der modernen Menschen zur Abwehr von epidemisch auftretenden Infektionskrankheiten wie den Masern dienen. Dies ist nicht wirklich überraschend; denn die geringe Bevölkerungsdichte der Jäger und Sammler machte Epidemien unwahrscheinlich, weshalb diese Immungene kaum einen Vorteil gebracht hätten.

Widerstandskraft gegen Epidemien mit Neigung zu Allergien erkauft

Auf einer Tagung der European Society for the Study of Human Evolution, die am 23. und 24. September dieses Jahres in Leipzig stattfand, präsentierten Hawks und sein Kollege Aaron Sams nunmehr Daten, wonach die Denisover praktisch keine Genvarianten trugen, die mit der Zöliakie in Verbindung gebracht werden – einer Autoimmunerkrankung des Darms, die beim modernen Menschen recht häufig vorkommt. Falls die betreffenden Varianten, wie die beiden Forscher vermuten, mit den Genen zur Abwehr epidemischer Infektionen in Zusammenhang stehen, hätte sich der Mensch also die höhere Widerstandskraft gegen Masern

und ähnliche Seuchen mit einer größeren Anfälligkeit für Allergien erkauft.

Über einige seiner profanereren Entdeckungen – etwa, dass Denisover keine roten Haare hatten – berichtet Hawks in seinem Internet-Blog (johnhawks.net/weblog): »Die Genomdaten sind alle öffentlich zugänglich«, betont er. »Jeder kann damit arbeiten. Die Art von Analysen, die ich in meinem Blog veröffentlichte, könnte ein aufgeweckter Gymnasiast auch durchführen.« Bedeutendere (und nicht so leichthin ausgeplauderte) Erkenntnisse werden sich laut Hawks aus der Entwicklung neuer Analysemethoden für archaische Genome ergeben, die dazu dienen können, Hypothesen zur Evolution unserer Art zu prüfen.

Trotz der gespannten Erwartung auf das, was Forscher in aller Welt noch aus den Sequenzdaten von Frühmenschen ableiten werden, weist Reich auf die Grenzen solcher Analysen hin. »Die Qualität der Genomdaten ist im Grunde furchtbar schlecht«, sagt er. Sie seien voller Lücken, fehlerhafter Basen und falsch platzierter DNA-Segmente. »Es gibt eine Menge Fallstricke bei der Arbeit mit diesem Material, und wer nicht höllisch aufpasst, entdeckt Gott weiß was für interessante Dinge, die der ge-

nauerer Überprüfung nicht standhalten.« Deshalb arbeitet Pääbos Gruppe intensiv daran, die Qualität der Sequenzdaten zu verbessern – durch Analyse der Genome weiterer Individuen von Neandertalern und möglichst auch von Denisova-Menschen.

Wie der Leipziger Forscher berichtet, erhalten er und seine Mitarbeiter ständig E-Mails von Wissenschaftlern mit Fragen zur Nutzung ihrer Genomdaten. Dabei hätten sie sich alle Mühe gegeben, den Zugang so einfach wie möglich zu gestalten. Jedenfalls wird die Flut solcher Nachfragen wohl nicht so bald abebben. Nach den Erfahrungen aus dem ersten Jahr der Erforschung fossiler Genome dürfte sie eher noch ansteigen, wenn immer mehr Wissenschaftler überall auf der Welt sich immer neue Fragestellungen ausdenken, die sie mit den Sequenzdaten angehen möchten. »Vielleicht sollten wir eine Broschüre ›Archaische Genomik für Anfänger‹ schreiben«, scherzt Pääbo.

Ewen Callaway ist Redakteur bei »Nature«.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 476, S. 136–137, 11. August 2011

TEILCHENPHYSIK

Rekorde aus der Spiegelwelt

In unserer Welt entsteht Antimaterie nur vorübergehend bei hochenergetischen Teilchenkollisionen. Nun konnten europäische Forscher die Lebensdauer von künstlich erzeugten Antiwasserstoffatomen auf eine gute Viertelstunde hochschrauben, während US-Kollegen mit Antihelium den bisher schwersten Kern der Spiegelwelt erzeugten.

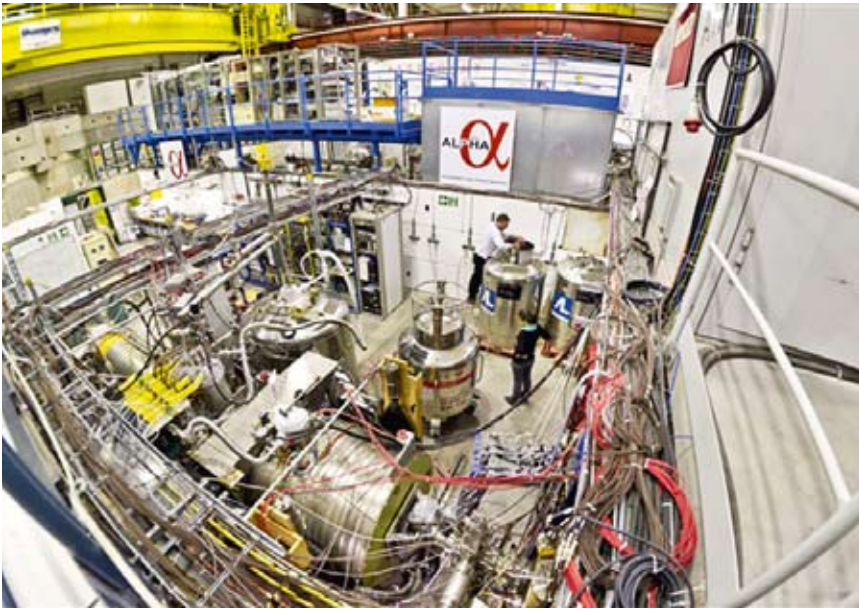
VON JOACHIM EIDING

Als 1928 der englische Theoretiker Paul Dirac Einsteins spezielle Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik verband, lieferten seine Gleichungen Hinweise auf die Existenz eines höchst seltsamen Teilchens. Es hatte die Masse eines Elektrons, war aber nicht negativ, sondern positiv geladen. Nur drei Jahre später konn-

te der US-Physiker Charles Anderson am California Institute of Technology in Pasadena das ominöse Objekt in der kosmischen Strahlung tatsächlich nachweisen. Er gab ihm den Namen Positron.

In kühner Verallgemeinerung seines theoretischen Ergebnisses hatte Dirac aber nicht nur für das Elektron, son-

dern für jedes Teilchen einen Antipartner postuliert, der eine Art Spiegelbild von ihm sei und die entgegengesetzte Ladung trage. Auch diese weit reichende Vermutung erwies sich als richtig. So existiert zum Proton, das nach heutigem Wissensstand seinerseits aus drei Quarks besteht, das 1955 erstmals künstlich erzeugte Antiproton, das sich



In diesem Labor des ALPHA-Projekts am europäischen Kern- und Teilchenforschungszentrum CERN in Genf gelang es, einige tausend Antiwasserstoffatome zu erzeugen und mehr als 300 davon in einer raffinierten Falle 1000 Sekunden lang festzuhalten.

analog aus drei Antiquarks zusammensetzt. Doch auch Partikel ohne Ladung verfügen über ein Gegenstück aus der Spiegelwelt; so gehört zum Neutron das Antineutron.

Aber warum kommt in dem uns bekannten Teil des Universums so gut wie

keine Antimaterie vor? Der Grund dafür ist, dass sie sich mit der normalen Materie nicht verträgt: Sobald beide aufeinandertreffen, vernichten sie sich gegenseitig und setzen ihre gemeinsame Masse gemäß Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ komplett als Energie frei.

Das wirft ein großes Problem auf: Beim Urknall sollten dem kosmologischen Standardmodell zufolge die zwei Materiearten in gleichen Mengen entstanden sein. Wenn sie sich danach gegenseitig vernichteten, stellt sich die Frage, wieso überhaupt etwas existiert. Gibt es im Universum vielleicht Inseln aus Antimaterie als Ausgleich für die Materie in unserer Welt?

Die meisten Physiker verwerfen diese Idee. Sie glauben vielmehr, dass sich Teilchen und ihre Spiegelbilder eben doch nicht völlig identisch verhalten. Dann wären sie auch nicht in gleichen Mengen beim Urknall entstanden. Auf der Suche nach Hinweisen auf den ver-

ANZEIGE

Gedächtnisprobleme?*

Zeit zu handeln.



Zuerst ist es mehr lästig als schlimm, wenn einem die richtigen Worte nicht einfallen und man sich Neues schlechter merken kann. Wenn die Probleme zunehmen, Dinge verlegt oder vergessen werden, sollte man etwas tun.

Neuerdings wissen wir: Selbst leichte Gedächtnisprobleme können Warnzeichen sein. Wenn die Verbindungen zwischen den Gehirnzellen abgebaut werden, kann das der Anfang einer dauerhaften Verschlimmerung sein. Je früher man etwas für den Schutz der Gehirnzellen tut, umso besser. Der Spezialextrakt von **Tebonin** zeigt genau hier, direkt an den sensiblen Gehirnzellen, seine Wirkung: Er regt sie an, wieder neue Verbindungen aufzubauen. Das Netz der Gehirnzellen wird dichter und die Gedächtnisleistung wird gestärkt. **Tebonin** aktiviert zudem den Energiestoffwechsel der Gehirnzellen und macht sie leistungsfähiger. **Tebonin** kann die Gehirnzellen also auf zweifache Weise unterstützen. Schon nach wenigen Wochen ist die Wirkung von **Tebonin** in der Regel spürbar: Konzentrations- und Gedächtnisprobleme bessern sich. Sie meistern die Anforderungen des Alltags wieder leichter und sind **ausgeglichener, belastbarer und konzentrierter**.

len, seine Wirkung: Er regt sie an, wieder neue Verbindungen aufzubauen. Das Netz der Gehirnzellen wird dichter und die Gedächtnisleistung wird gestärkt. **Tebonin** aktiviert zudem den Energiestoffwechsel der Gehirnzellen und macht sie leistungsfähiger. **Tebonin** kann die Gehirnzellen also auf zweifache Weise unterstützen. Schon nach wenigen Wochen ist die Wirkung von **Tebonin** in der Regel spürbar: Konzentrations- und Gedächtnisprobleme bessern sich. Sie meistern die Anforderungen des Alltags wieder leichter und sind **ausgeglichener, belastbarer und konzentrierter**.



Tebonin[®]
stärkt
Gedächtnisleistung
und Konzentration.*

- Pflanzlicher Spezialextrakt mit dem patentgeschützten Extraschritt
- Gut verträglich



* Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.

Tebonin[®] konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei leichten bis mittelschweren hirnnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (dementielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. **Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker.** Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe



Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG
www.tebonin.de
www.schwabe.de

Stand: August 2011 T/08/11/21

muteten kleinen Unterschied haben Physiker schon viele Vorgänge, an denen Antiteilchen beteiligt sind, akribisch untersucht, bislang jedoch vergeblich. Eine Möglichkeit zum direkten Vergleich der jeweiligen Eigenschaften eröffnen nun Arbeiten eines internationalen Forscherteams – der »ALPHA-Collaboration« (*Antihydrogen Laser Physics Apparatus*) – um Jeffrey Hangst von der Universität Aarhus (Dänemark). Ihm gelang es am europäischen Kern- und Teilchenforschungszentrum CERN in Genf, rund 6000 Antiwasserstoffatome zu erzeugen und genau 309 davon für 1000 Sekunden, also knapp 17 Minuten, festzuhalten (*Nature Physics* 7, S. 558–564, 2011). »Das ist lange genug, um sie studieren zu können – sogar mit der kleinen Menge, die wir bisher kriegen konnten«, freut sich Hangst.

Damit überboten die Wissenschaftler ihren vorigen Rekord vom November 2010, als sie 38 dieser Antiatome für gerade einmal 0,172 Sekunden einsperren konnten. Generell gilt Antiwasserstoff wegen seines einfachen Aufbaus – mit je einem negativ geladenen Antiproton im Kern und einem Positron in der Hülle – als viel versprechender Kandidat, um beispielsweise bei spektroskopischen Untersuchungen Unterschiede zu normalem Wasserstoff zu offenbaren.

Bei ihrem Experiment sammelten die ALPHA-Physiker zunächst Positronen aus dem Betazerfall von Natrium-22 unter Hochvakuum in einer so genannten Penning-Falle. Dort bremsten sie die Teilchen ab, indem sie sie über mehrere Schritte bis auf ein halbes Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt herunterkühlten.

Durch das so erzeugte Positronenplasma schickten die Forscher anschließend Millionen von Antiprotonen, die sie einem Speicherring am CERN, dem Antiproton Decelerator, entnommen und mittels Verdampfungskühlung ebenfalls abgebremst hatten. Eine ausgeklügelte Kombination aus elektrischen und magnetischen Feldern hielt die Teilchen in der Mitte der röhrenförmigen Falle fest, wo sie sich entlang der Zentralachse bewegten. Hier begegneten sich die Antiprotonen und Positronen; allerdings verband sich nur ein Bruchteil von ihnen (nämlich schätzungsweise etwa 6000) zum Antiwasserstoff. Davon wiederum ließen sich nach 1000 Sekunden noch die besagten 309 nachweisen.

Dazu schalteten die Forscher einfach das Magnetfeld ab, woraufhin die Antiprotonen von der Mitte der Penning-Falle zu den Metallelektroden an den Wänden drifteten und mit den Protonen dort zerstrahlten. Die dabei zu-

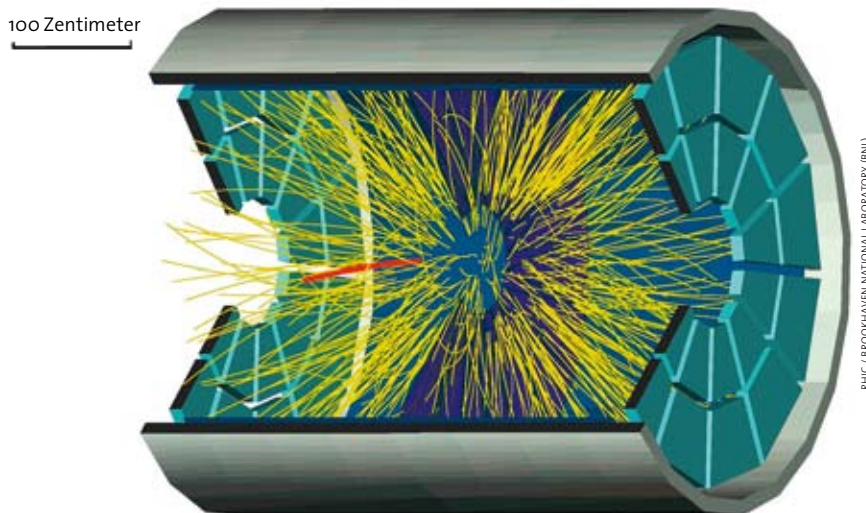
nächst freigesetzten Pionen mit Energien von 50 bis 900 Megaelektronvolt registrierte ein Detektor, der aus drei Lagen von Siliziumstreifen besteht. Die Forscher zählten 309 Vernichtungen und schlossen daraus, dass vorher genauso viele Antiwasserstoffatome vorhanden waren.

Den Unterschieden zwischen Teilchen und Antiteilchen auf der Spur

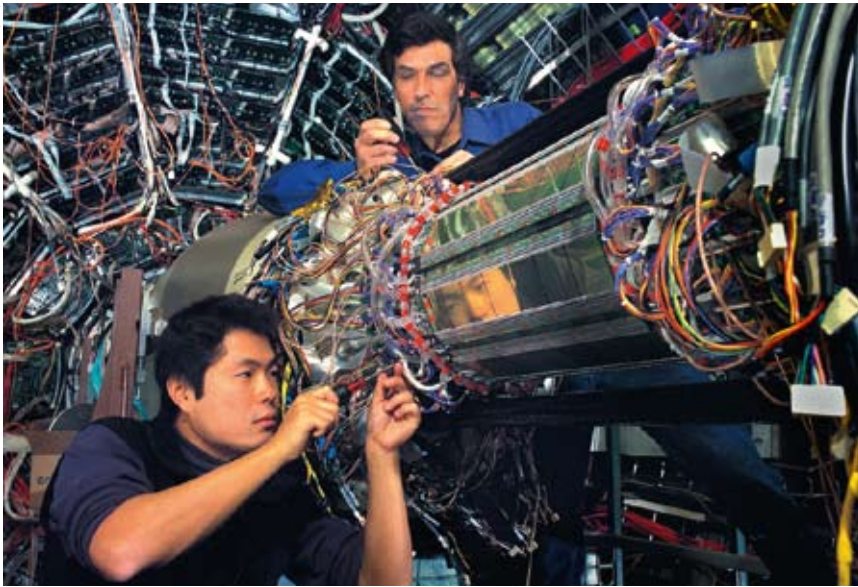
Das erfolgreiche Experiment ebnet nun den Weg für den nächsten Schritt: die gezielte Anregung der Antiatome mit Laserlicht, um die genaue Lage der Energieniveaus zu ermitteln. Damit wollen die Forscher prüfen, ob sich Wasserstoff und sein Pendant aus der Gegenwelt physikalisch tatsächlich gleich verhalten. »Sollten die CERN-Physiker Unterschiede zwischen beiden finden, käme das einer echten Sensation gleich«, meint Thomas Müller, Leiter des Instituts für Experimentelle Kernphysik am Karlsruher Institut für Technologie. »Diese Entdeckung hätte fundamentale Konsequenzen für die gesamte Teilchenphysik.« Er persönlich hat allerdings Zweifel, ob das Genfer Team tatsächlich die erhofften Abweichungen in den Spektren findet.

Um das Geheimnis der Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie zu lüften, beschreitet eine internationale Gruppe von etwa 500 Wissenschaftlern (»STAR-Collaboration«) am Brookhaven National Laboratory (BNL) auf Long Island (New York) andere Wege. Sie spürt dem Plasma aus Quarks und den sie verbindenden Klebeteilchen namens Gluonen nach, das direkt nach dem Urknall vorlag. Zu diesem Zweck untersuchen die Forscher das Verhalten der Bausteine von Atomkernen bei sehr hohen Temperaturen und Dichten. Im Verlauf ihrer Experimente haben sie nun das bisher schwerste Antiteilchen erzeugt und auch nachgewiesen: das Antihelium-4 (*Nature* 473, S. 353–356, 2011).

Die Versuche fanden im Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) statt, einem Beschleuniger mit zwei riesigen, parallelen Ringen, in denen Teilchen in entgegengesetzter Richtung fast mit Lichtgeschwindigkeit umlaufen und an be-



Beim Zusammenprall von Goldionen im Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) am Brookhaven National Laboratory (BNL) auf Long Island (New York) entstehen Schauer von Trümmerteilchen. Darin konnten Forscher jetzt auch die Spur eines Antiheliumatoms (rot markiert) ausmachen.



Der Solenoidal Tracker am RHIC (STAR) – hier beim Zusammenbau – ist ein riesiger Detektor, der die Spuren tausender Partikel nach jeder Ionenkollision aufzeichnet.

stimmten Kreuzungspunkten zusammenstoßen. An diesen Stellen registrieren diverse Detektorsysteme wie beispielsweise der Solenoidal Tracker am RHIC (STAR, siehe Foto oben) die Trümmer der Kollision.

Als Teilchen verwendeten die BNL-Forscher Goldionen, die sie mit einer Energie von 200 Gigaelektronvolt frontal aufeinanderprallen ließen. Dabei entstand ein Quark-Gluon-Plasma ähnlich dem nach dem Urknall, in dem Quarks und Gluonen samt ihren Antiteilchen frei herumschwirrten. Während es langsam abkühlte, vereinigten sich seine Komponenten zu gewöhnlichen Protonen und Neutronen sowie ihren Pendanten aus der Spiegelwelt.

Dank einer kombinierten Messung von Masse, Impuls und Ladung der gefundenen Teilchen und einer eigens entwickelten Software von Physikern des Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) machten die New Yorker Forscher in dieser Partikelwolke die charakteristischen Kennzeichen von Antihelium-4 aus – Kernen, die aus je zwei Gegenstücken der Protonen und Neutronen bestehen. Genauer gesagt lieferte das Flugzeit-Massenspektrometer (TOF) die Geschwindigkeit und die Zeitprojektionskammer (TPC) Impuls und Ladung. Allerdings war die Ausbeute

extrem gering: Bei etwa einer Milliarde Kollisionen ließen sich gerade einmal 18 Antiheliumkerne nachweisen.

Der nächstgrößere Kern im Periodensystem der Antielemente wäre nun das Antilithium-6. Allerdings sehen die Brookhaven-Forscher die Situation realistisch. »Antilithium zu erzeugen, ist mit der derzeitigen Beschleunigertechnologie in endlicher Zeit nicht möglich«, bedauert der am Projekt beteiligte Physiker Thorsten Kollegger von der Universität Frankfurt. Denn dieser Kern sollte noch eine Million Mal seltener entstehen als das Antiheliumteilchen.

Trotzdem geben die New Yorker Wissenschaftler die Hoffnung nicht ganz auf. Wenn schon nicht im Beschleuniger, lässt sich Antilithium vielleicht im All nachweisen. Mit dem letzten Flug der Raumfähre »Endeavor« brachte die US-Raumfahrtbehörde NASA im Juni dieses Jahres das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) auf die Internationale Raumstation ISS. Dort wird der Detektor die Erdatmosphäre nach Spuren fremder Antiteilchen durchforsten, die es womöglich von fernen Sternen zu uns verschlagen hat (Spektrum der Wissenschaft 9/2010, S. 22).

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.

NEUES AUS DEM Lesershop



Kalender »Himmel und Erde 2012«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2012« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2012 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

www.spektrum.com/kalender2012

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

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

MEDIZIN

Alzheimer durch chronischen Stress

Dauerstress sorgt für eine Zunahme der krankhaften Formen des so genannten Tau-Proteins in Nervenzellen des Gehirns – ein charakteristisches Kennzeichen der Alzheimerkrankheit.

VON GERLINDE FELIX

Bei der Alzheimerkrankheit sterben große Mengen von Nervenzellen im Gehirn ab. Weniger als zehn Prozent der Erkrankungen sind durch Mutationen verursacht und damit erblich bedingt, die restlichen gut 90 Prozent der Patienten leiden an so genanntem sporadischem Alzheimer. Über dessen Ursachen ist noch relativ wenig bekannt.

Lange galt das Interesse der Alzheimerforscher vor allem den Beta-Amyloid-Ablagerungen zwischen den Nervenzellen, die bei den Patienten gehäuft auftreten. Doch seit ein paar Jahren studieren Hirnforscher vermehrt neben löslichem Beta-Amyloid (A β) auch abnorme Formen des Tau-Proteins, die zu viele Phosphatgruppen tragen und in den Zellen verklumpen. Laut neuen Untersuchungen sind beide für krankhafte Veränderungen in Nervenzellen des Hippocampus und für Gedächtnisverlust bereits in einem frühen Stadium verantwortlich. Der Hippocampus ist für das Bilden autobiografischer Gedächtnisinhalte sowie das Speichern von Erlerntem zuständig.

Doch wieso entstehen diese abnormen Formen des Tau-Proteins? Viele Alzheimerpatienten weisen erhöhte Konzentrationen des Stresshormons Cortisol auf, wobei bislang unklar ist, ob es sich dabei um Ursache oder Folge der Erkrankung handelt. Bereits bekannt ist allerdings, dass chronischer Stress die Bildung von A β beschleunigt und lösliches A β die Synapsen zerstört: jene Kontaktstellen, an denen die Nervenzellen miteinander kommunizieren. Darüber hinaus scheint das Tau-Protein für die normale Synapsenfunktion wichtig zu sein.

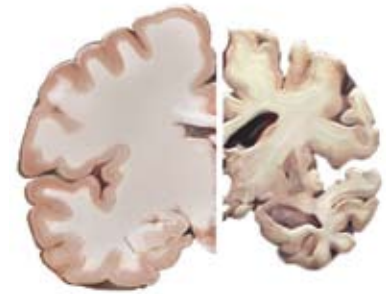
Um herauszufinden, ob und wie chronischer Stress und dadurch freigesetzte Stresshormone zu pathologischer Tau-Protein-Verklumpung führen können, setzten Osborne Almeida vom Max-Planck-Institut (MPI) für Psychiatrie in München und seine Kollegen einen Monat lang Ratten mittleren Alters täglich für eine Stunde Stress aus – etwa in Form eines völlig überfüllten Käfigs oder einer vibrierenden Plattform.

Danach überprüften die Forscher, wie gut sich die gestressten Nagetiere an Gelerntes erinnern konnten, und untersuchten zudem ihre Gehirne auf Tau-Protein. »Tatsächlich hatten sich sowohl im Hippocampus als auch in der präfrontalen Hirnrinde, dem Sitz höherer geistiger Fähigkeiten, vermehrt Tau-Proteine mit viel zu vielen Phosphatgruppen gebildet. Und die Gedächtnisleistung der betroffenen Ratten hatte sich verschlechtert«, so Almeidas Fazit (*Journal of Neuroscience* 31, S. 7840–7847, 2011).

Das Zellgerüst zerfällt

Das Tau-Protein ist als Teil des Zellskeletts lebenswichtig für die Nervenzellen: Es trägt zu ihrer Stabilität bei und wirkt an ihrer Versorgung mit Nährstoffen sowie bei der Zellteilung mit. Doch diese Funktionen werden gestört, wenn Enzyme, die an Proteine einzelne Phosphatgruppen anhängen, zu aktiv sind und die Tau-Proteine hyperphosphorylieren.

Mit zu vielen Phosphatgruppen beladen, löst sich das Protein vom Zellgerüst ab, und die neuronalen Fortsätze – Axone und Dendriten – degenerieren. Die Neurone sind deshalb immer we-



Bei Alzheimerpatienten sterben massiv Nervenzellen im Gehirn ab (rechts).

niger in der Lage, miteinander zu kommunizieren. Ergebnis: Die Erinnerungen verschwinden allmählich, wie wenn man mit einem Tintenkiller über ein beschriebenes Blatt Papier fährt. »Chronischer Stress scheint die zu Alzheimer führenden Prozesse zu beschleunigen. Wir vermuten, dass Stress sogar als Auslöser fungiert, wahrscheinlich, indem es die Produktion von A β erhöht, das seinerseits jene Enzyme aktiviert, die das Tau-Protein hyperphosphorylieren«, so Hirnforscher Almeida.

Da stellt sich natürlich die Frage, ob sich dieser Prozess stoppen, vielleicht sogar rückgängig machen lässt. Ihr gehen Eckhard und Eva-Maria Mandelkow von der Max-Planck-Arbeitsgruppe für strukturelle Molekularbiologie Zytoskelett in Hamburg nach. Bei Mäusen beobachteten sie, dass der Gedächtnisverlust umkehrbar ist, wenn sie das Gen für Tau abschalteten – zumindest solange nicht zu viele Neurone bereits zerstört sind.

Nun kann man bei Menschen nicht so einfach Gene ausschalten. Es werden daher Wirkstoffe benötigt, die die Tau-Klumpen auflösen. Tatsächlich gibt es dafür zwei viel versprechende Wirkstoffklassen: Rhodanine und Phenyl-Thiazolyl-Hydrazide. Ein Bluttest, mit dem sich Alzheimer anhand von krankheitstypischen Antikörpern bereits in einer frühen Form nachweisen lässt, ist auch schon in der Entwicklung. Doch bis beide tatsächlich klinisch anwendbar sind, wird wohl noch einige Zeit vergehen.

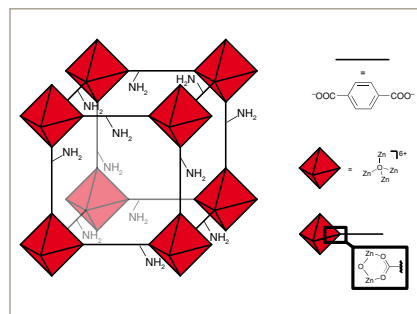
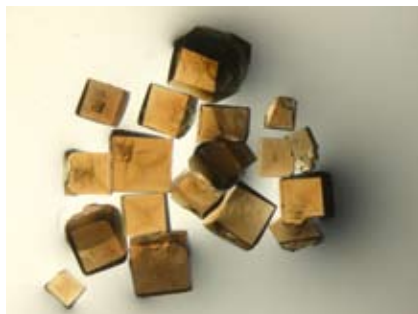
Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Wartenberg.

Ein Käfig als Katalysator

Aus Metallatomen und organischen Molekülen lassen sich käfigartige Gerüststrukturen bauen. Diese Metal-Organic Frameworks finden nun in der asymmetrischen Katalyse eine neue Anwendung: Wenn man eine Substanz im Käfig fixiert, kann sie räumlich spezifisch reagieren.

VON JANINA FISCHER

Vor zwölf Jahren berichtete eine amerikanische Forschergruppe über eine neue Klasse molekularer Gerüststrukturen: Metal-Organic Frameworks, kurz MOFs. Dabei bilden Metallatome oder Metallcluster jeweils die Ecken einer Art Käfig, die über organische Moleküle, so genannte Linker, miteinander verbunden sind. Seitdem untersuchen Arbeitsgruppen auf der ganzen Welt die kubischen Gerüste. Diese erinnern in ihrem Aufbau an Zeolithe: Das sind anorganische Gerüstmaterialien, die zum Beispiel zur Wasserenthärtung und zum Cracken von Erdöl dienen. Der Trick dabei ist, dass sich Atome oder Moleküle leicht in diesem feinen Netzwerk »verfangen« und festgehalten werden können. Zur Wasserenthärtung fischt man so bestimmte Ionen aus dem Wasser heraus; bei der Erdölraffination werden unerwünschte Nebenprodukte abgetrennt.



Die MOFs kristallisieren zu Würfeln (links), die den Aufbau der Käfigmoleküle (rechts) widerspiegeln. Diese bestehen aus Metallclustern (rot) und organischen Molekülen.

Lange Zeit suchten die Forscher daher für die MOFs nach ähnlichen Anwendungen. Tatsächlich sind sie heute zum Beispiel als Gasspeicher oder molekulare Siebe in der Chromatografie begehrt, denn wegen ihrer großen Oberfläche können die MOFs auf engstem Raum unzählige Moleküle beherbergen.

Nun zeichnet sich eine noch aufregendere Verwendungsmöglichkeit des porösen Materials ab: Marco Ranocchiaro vom Paul Scherrer Institut in der Schweiz zeigte mit seinen Kollegen, dass sich bestimmte MOFs zur »enantioselektiven Katalyse« einsetzen lassen (*Physical Chemistry Chemical Physics* 13, S. 6388–6396, 2011).

ANZEIGE

www.fischer125.de

Eine völlig neue Darstellung der Geschichte der Menschheit. Ein Standardwerk.

In seinem Opus Magnum beweist Steven Pinker mit zahlreichen wissenschaftlichen Belegen, dass in der Geschichte der Menschheit die Gewalt immer weiter abgenommen hat. Wir leben heute in der gewaltfreiesten Zeit überhaupt. Ein radikales Buch, das den Blick auf uns selbst völlig verändert.



S. FISCHER
im 125. Jahr

1.216 Seiten, gebunden, € (D) 26,00

G E
STEVEN
PINKER
W A
Eine neue
Geschichte der
Menschheit
L T
S. FISCHER

»Ihr werdet euch nie ändern!«

Sind ethnische Konflikte überhaupt lösbar?

Der Kalte Krieg war ein Konflikt zwischen Gegnern, die sich als Anhänger gegensätzlicher Gesellschaftssysteme definierten. Ethnische Aspekte – die Frage, zu welcher auf gemeinsamer Geschichte und Kultur beruhenden Gruppe man gehörte – spielten in dieser globalen Auseinandersetzung nur eine untergeordnete Rolle.

Seit dem Ende des Kalten Kriegs ist unsere Welt durch eine unübersichtliche Vielzahl mehr oder weniger »heißer« ethnischer Konflikte geprägt. Kampfbereite Gegenspieler definieren sich meist nicht mehr durch unterschiedliche Vorstellungen über die anzustrebende politische Ordnung, sondern über die ethnische Zugehörigkeit. Man ist Albaner versus Serbe, Tibeter versus Chinese, Araber versus Israeli – und umgekehrt.

Wie sind Konflikte lösbar, in denen beide Seiten auf stereotypen Vorstellungen über den anderen beharren, das heißt auf der Unabänderlichkeit der Gegensätze? Wie kann ich als Jude mit Arabern, als Araber mit Juden Frieden schließen, wenn ich von einem angeborenen oder kulturell erworbenen, jedenfalls prinzipiellen Wesensunterschied ausgehe? Dieses Problem hat der israelische Sozialpsychologe Eran Halperin zusammen mit vier US-Kollegen erforscht (*Science* 333, S. 1767–1769, 2011).

In mehreren Studien untersuchte das Team die Haltung von Israelis und Palästinensern zu Aussagen wie: »Gruppen können ihre charakteristischen Eigenschaften nicht ändern.« Wie nicht anders zu erwarten, zeigten sich Personen, die diesem Satz zustimmen, wenig geneigt, Kompromisse zu schließen – zum Beispiel als Israeli Siedlungen preiszugeben oder als Palästinenser friedlichen Umgang mit Israelis anzustreben.

Lässt sich die starre Haltung aufweichen? Die Forscher legten Probanden jeweils fingierte Texte mit konträren Aussagen vor, die angeblich aus dem renommierten Fachorgan »American Psychologist« stammten. Der eine Text besagte, es sei wissenschaftlich erwiesen, dass Gruppen ihr kollektives Verhalten durchaus ändern könnten. Der andere behauptete das Gegenteil: Das Wesen einer Menschengruppe würde sich nachweislich nie wandeln.

Die Lektüre wirkte sich erkennbar aus. Wer den ersten Artikel gelesen hatte, wurde aufgeschlossener für Friedensvorschläge, die Leser des zweiten Textes verhärten ihren Standpunkt.

Halperin zieht daraus den optimistischen Schluss, dass »selbst angesichts lange andauernder Konflikte tief verwurzelte Überzeugungen veränderbar sein können«, sofern sich generell die Sichtweise durchsetzt, die Einstellung von Menschengruppen lasse sich zum Besseren wenden.

Umgekehrt zeigt die Studie aber auch, warum ethnisch begründete Gegensätze so viel schwerer aufzulösen sind als politische Auseinandersetzungen: Sie speisen sich aus dem simplen Glauben an ein unwandelbares gegnerisches Gruppenwesen, während hinter politischem Streit ja immer das Bestreben oder gar die Hoffnung steckt, den Gegner zur eigenen Überzeugung zu bekehren.

Insofern gießt ein millionenfach rezipiertes Buch wie Thilo Sarrazins »Deutschland schafft sich ab« in der Tat Öl ins Feuer. Es spielt exakt die Rolle des zweiten Textes aus Halperins Studie. Wer Problemgruppen nicht sozial definiert, sondern ethnisch, zementiert ihr Wesen als unabänderlich. Da braucht es nicht einmal den zusätzlichen Unsinn über angeblich biologisch vererbte Intelligenzunterschiede zwischen Juden, Arabern und Deutschen. Am ethnischen Wesen kann nichts genesen.



Michael Springer

Weisen Moleküle ein so genanntes chirales Zentrum auf, so kommen sie in zwei Formen vor, die sich zueinander wie Bild und Spiegelbild verhalten: Sie lassen sich nicht zur Deckung bringen. Im Reaktionskolben entstehen diese »enantiomeren« (von griechisch *enantion* = das Gegenteil) Moleküle stets im selben Verhältnis, denn sie sind beide gleich stabil. Doch obwohl sie sich nur geringfügig in ihrer Geometrie unterscheiden, weisen sie oft abweichende Eigenschaften auf. Sie haben zum Beispiel je nach Struktur einen anderen Geruch und Geschmack – der natürliche Aromastoff Limonen riecht entweder orangenartig (Enantiomer (R)-(+)-Limonen) oder nach Terpentin (Enantiomer (S)-(-)-Limonen). Bei Pharmaka ist unter Umständen nur eines der Spiegelbildmoleküle wirksam. Die Verabreichung des falschen Zwillings kann hingegen schwere Schäden hervorrufen.

Eine gezielte ausschließliche Synthese des gesuchten Enantiomers wäre daher ideal, denn wegen ihrer fast identischen Eigenschaften lassen sich die beiden Enantiomere nur sehr schwer voneinander trennen. Obendrein würde die Hälfte des Ausgangsmaterials eingespart. Doch die enantioselektive Synthese gehört zu den Königsdisziplinen der organischen Chemie und stellt höchste Ansprüche an die Kunst der Chemiker.

Marco Ranocchiaro gibt den Forschern nun seine neue Methode an die Hand. Sein Team hat bereits erfolgreich asymmetrische Hydrierungen mit den MOFs als Katalysatoren durchgeführt. Dabei lagert sich Wasserstoff so an eine chemische Doppelbindung an, dass zwar ein chirales Zentrum entsteht, das Produktmolekül aber nur in einer Spiegelbildform gebildet wird.

Hierzu stellten die Forscher zunächst ein nichtchirales »MOF-5« her, bei dem ZnO_4 -Bausteine über Benzolringe miteinander verknüpft waren. An die Ringe hatten die Forscher zuvor Aminogruppen angebracht. Diese fungierten als Andockstellen für den eigentlichen Katalysator, einen Rhodiumkomplex, den die Wissenschaftler zur Reaktionsmischung gaben, nachdem sich das MOF-

Grundgerüst gebildet hatte. Das Rhodium lagerte sich automatisch an die Aminogruppen an. Diesen MOF-Katalysator-Komplex schlammten Ranocchiaro und Kollegen in Methanol auf und fügten dann ein Derivat der Zimtsäure hinzu, das hydriert werden sollte. In das Gemisch leiteten sie schließlich Wasserstoff ein. Tatsächlich erhielten sie fast nur das gewünschte Enantiomer. Weil das Gitter den Rhodiumkatalysator fixierte, lagerte sich das Zimtsäuremolekül nämlich ausschließlich von einer bestimmten Seite her an. So war die Geometrie des Produkts schon vor der Reaktion exakt festgelegt.

Die besten Resultate erzielten die Forscher, wenn sie insgesamt weniger Aminogruppen möglichst gleichmäßig im Gerüst verteilten. Mit einem so genannten MIXMOF aus unterschiedlichen organischen Linkern war das möglich: Die Forschergruppe versah nur einen Teil der organischen Linkermoleküle mit den Aminoheiten, so dass sich eine

statistische Verteilung im MOF-Gerüst ergab. So erhielten die Wissenschaftler eine 95-prozentige Umsetzung bei einer Enantiomerenreinheit von 89 Prozent.

Enzym als Vorbild

Der größte Vorteil der neuen Methode: Es handelt sich um eine heterogene Katalyse, das heißt, der Katalysator und die reagierenden Substanzen liegen in unterschiedlichen Phasen vor. In Ranocchiaris Experiment war das MOF fest, das Zimtsäurederivat hingegen in Methanol gelöst. Das machte die Abtrennung des Katalysators vom Produkt denkbar einfach: Die Forscher mussten lediglich das unlösliche MOF abfiltrieren. So werden Metallkontaminationen im Produkt vermieden.

Zwar sind die Kosten der MOFs recht hoch, da die organischen Linker oft aufwändig in der Herstellung sind und die eingebauten Katalysatoren meist aus teuren Metallkomplexen bestehen. Allerdings werden diese auch in dem

bislang gängigen Verfahren der homogenen asymmetrischen Katalyse benötigt.

Davon muss sich die neue Methode abheben, um für die Industrie interessant zu sein. »Im Moment arbeiten wir an enzyminspirierten katalytischen Reaktionen«, erklärt Marco Ranocchiaro. »Wir wollen mehrere katalytische Gruppen an spezifischen Stellen in den MOF-Käfig einbauen – wie in einem Enzym.«

Indem die Forscher die Moleküle in dem Gerüst fixieren, könnten sie an verschiedenen Stellen selektive Reaktionen nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip durchführen. Dazu müssten sie allerdings einen Weg finden, den Aufbau der MIXMOFs präzise zu steuern. Noch ist dieser Nachbau einer Enzymstruktur daher Zukunftsmusik – gelänge er aber, wäre den MOFs eine steile Karriere gewiss.

Janina Fischer ist promovierte Chemikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

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 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus



DREAMTIME / JAMES STEIDL

VERHALTENSFORSCHUNG

Intelligenzbestien

Die Parallelen verblüffen: Trotz unterschiedlicher evolutionärer Wurzeln zeigen Delfine und Menschenaffen ähnlich kluges Verhalten – bis hin zu strategischen Koalitionen und Täuschungsmanövern.

Von Maddalena Bearzi und Craig Stanford

Bis die Sonne morgens im Gombe-Nationalpark in Tansania über den Bergkamm steigt, dauert es seine Zeit. Noch schlaftrunken regt sich nun im Wald eine Gruppe Schimpansen. Ein Affe nach dem anderen rappelt sich langsam auf, setzt sich still auf den Ast, auf dem er am Abend vorher sein Nest gebaut hat, und pinkelt hinab. Bald klettern die Tiere lautlos nach unten, nur um zunächst bewegungslos zusammenzuhocken gleich ein paar Felsbrocken.

Dann, wie auf Kommando, erhebt sich ein älteres Männchen und geht weg, ungefähr Richtung Norden. Einige andere Männchen folgen ihm, zwei nehmen jedoch Kurs gen Westen, zum See. Und ein Weibchen macht sich allein mit seinem Kind nach Süden auf. Nicht lange, und die meisten Tiere sind irgendwohin unterwegs zu ihren diversen Tagesunternehmungen. Nur ein paar junge Männchen bleiben noch sitzen. Später werden sie den Hang im Osten hinauf-

steigen. Die Schlafgemeinschaft aus 26 Schimpansen hat sich in mindestens fünf unterschiedlich große Gruppen aufgeteilt.

Auf der anderen Seite der Erde, vor der Küste von Yukatan, Mexiko, schwimmt frühmorgens – genau zur gewohnten Zeit – eine Gruppe Delfine an dem alten Landungssteg eines Fischers vorbei. Es sind Große Tümmler. Als Erstes taucht das stattliche Männchen Gordo aus dem Dunst auf, erkennbar an einer tiefen Kerbe in der Rückenfinne. Langsam schwimmt es nach Westen die Küste entlang. Gut 100 Meter dahinter folgen die anderen. Insgesamt sind es 14 Delfine, darunter ein Weibchen mit Kalb.

Vielleicht 20 Meter hinter dem Pier scharen sich alle nahe einer Stelle, auf der viele Meerbrassen zu finden sind. Einige der Tümmler tauchen ohne viel Hast ab, wohl um einen der Barsche zu erwischen, andere jagen gemächlich an der Ober-



Gruppen in wechselnden sozialen Zusammensetzungen sind für Menschenaffen typisch – genauso aber für Delfine, die den cleversten Tierprimaten an Klugheit nicht nachstehen.

Auch mit sprachlichen Symbolen lernen beide umzugehen. Der Bonobo Kanzi (links ein neueres Foto) lernte als junges Tier Lexigramme – abstrakte Symbolbilder – zu verstehen und selbst auf einer Tastatur zu kombinieren. Er selbst verwendet mindestens 300 Lexigramme und versteht mehr als 1000 gesprochene Wörter.

fläche. Ein zweiter Trupp Delfine stößt von der anderen Seite dazu. Insgesamt 23 der Meeressäuger, junge und alte, frühstücken nun gemeinsam. Nach einiger Zeit teilt sich der Trupp wieder, und es bilden sich zwei Ketten. Fünf Tiere schwimmen zügig am Kai vorbei, die übrigen verschwinden rasch in der Gegenrichtung. Was eben noch wie zwei und dann eine Gruppe aussah, hat sich in neue Einheiten umstrukturiert.

Mit Menschenaffen sind Delfine – und andere ihnen nahestehende Zahnwale, etwa die Schwertwale – ähnlich entfernt verwandt wie Elefanten mit Mäusen. Die beiden Evolutionslinien trennten sich vor rund 100 Millionen Jahren, und die heutigen Vertreter sehen völlig verschieden aus. Die einen besitzen Arme und Beine sowie nicht zuletzt geschickte Hände, mit denen sie Werkzeuge handhaben, anderen das Fell pflegen oder Zeichen geben können. Die anderen haben eine Stromlinienform und statt Gliedmaßen Flossen. Dennoch ist beiden Tiergruppen, obwohl sie an ganz unterschiedliche Umwelten angepasst sind, vieles gemeinsam. Die Ähnlichkeiten im Verhalten deckten erst jüngere Forschungen auf.

Wie stark sich Schimpansen und Große Tümmler in manchen ihrer sozialen und geistigen Leistungen entsprechen, verblüfft Experten immer wieder. So unwahrscheinlich es klingt – wir erkannten zwischen Delfinen und Menschenaffen in mancher Hinsicht mehr gleiche Verhaltenszüge, als beide jeweils mit Tieren gemeinsam haben, die ihnen von der Evolution her näherstehen. An diesen Verhaltensweisen fasziniert vor allem, dass viele davon sich auch beim Menschen finden. Vielleicht bringen solche Beobachtungen sogar neue Einsichten zur Herausbildung der menschlichen Intelligenz.



AUF EINEN BLICK

DAS LEBEN MIT VERSTAND MEISTERN

1 Delfine und Große Menschenaffen haben viel mehr gemeinsam, als es nach ihrer Lebensweise auf den ersten Blick erscheint.

2 Beide Tiergruppen zeichnet ein überdurchschnittlich großes Gehirn aus. Im Aufbau unterscheiden sich beider Denkkorgane zwar in manchen Einzelheiten, doch sie verhelfen den Tieren zu einem ähnlichen überragenden Intellekt.

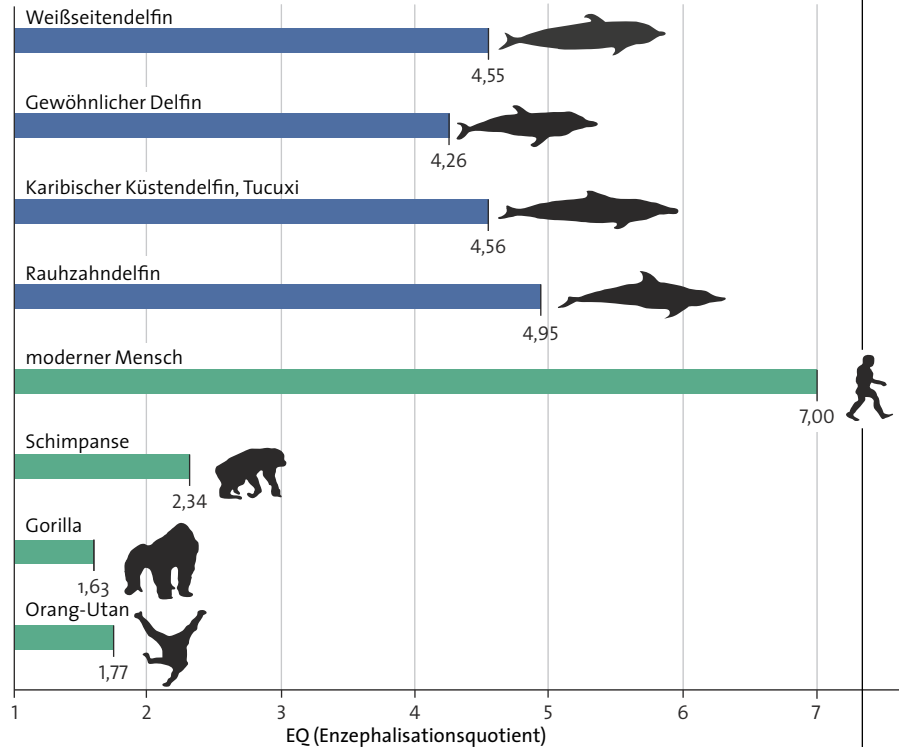
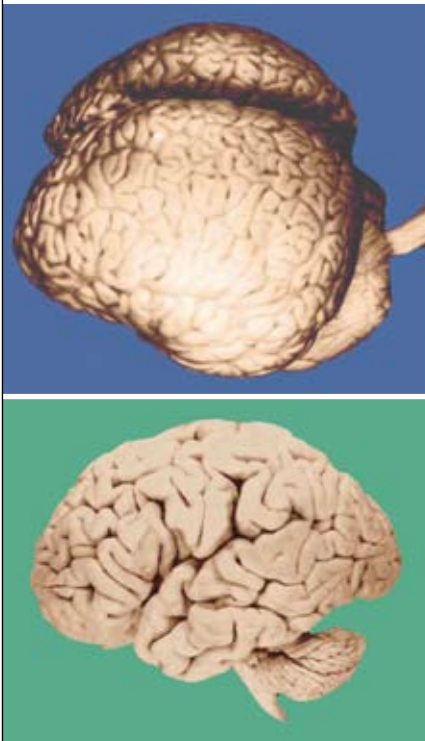
3 Im sozialen und strategischen Verhalten finden ihre Arten etliche gleiche Lösungen. Kooperation und Wechsel der Gruppierung sind bei Delfinen und Menschenaffen an der Tagesordnung – anders als bei vielen anderen höheren Säugetieren.

Gehirne im Vergleich

Auf den ersten Blick wirkt ein Walgehirn (oben links das eines Großen Tümmlers) anders als ein Menschengehirn (siehe Bild unten links). Trotzdem ähneln sie sich in manchen entscheidenden Aspekten. So ist bei beiden der Neokortex auffallend hoch

entwickelt und stark gefaltet. Bemerkenswert ist die Hirngröße von Walen im Verhältnis zur Körpergröße, die der EQ (Enzephalisationsquotient) als Maß für das relative Hirngewicht ausgedrückt (Grafik).

HIRNFOTOS: COMPARATIVE MAMMALIAN BRAIN COLLECTION / NATIONAL MUSEUM OF HEALTH AND MEDICINE (HTTP://BRANNUSEUM.ORG); EQ-DATEN: AMERICAN SCIENTIST, NACH: LORI MARINO, EMORY UNIVERSITY



Immer mehr spricht dafür, dass hohe Intelligenz in der Evolution mehrmals unabhängig voneinander entstand. Ganz hieb- und stichfest ist dieser Schluss zwar noch nicht, doch so viel scheint sicher: Zu einem überragenden Verstand gehört ein ungewöhnlich großes Gehirn. Dieses zeichnet nicht nur den Menschen aus, sondern auch die vier Großen Menschenaffen, also Bonobos, Schimpansen, Gorillas und Orang-Utans, und die diversen Delfinarten sowie andere Wale – neben wenigen weiteren besonders klugen Tieren unter den Säugetieren, etwa Elefanten.

Neurone für Sozialkompetenz

Oft wird die relative Hirngröße als so genannter Enzephalisationsquotient (EQ) angegeben – ein Maß, das die Körpergröße berücksichtigt, denn die größeren Arten innerhalb einer Verwandtschaftsgruppe besitzen in der Regel verhältnismäßig kleinere Gehirne (siehe Kasten oben). Nach ihrem hohen EQ zu urteilen, wuchs die relative Hirngröße von Delfinen wie Menschenaffen im Verlauf ihrer Evolution.

Gleiches gilt für die Hirnkomplexität. Ein Tümmlergehirn sieht zwar äußerlich anders aus als das eines Schimpansen. Es bildet viel mehr Falten, sogar noch deutlich mehr als ein menschliches Gehirn. Auch seine neuroanatomische Organi-

sation weicht von der bei Primaten teilweise ab. Insbesondere unterscheidet sich die Hirnrinde im Feinaufbau: Beim Delfin etwa sind die einzelnen Zelltypen nicht so vielgestaltig.

Aber neben der Hirngröße selbst hat sich auch bei diesen Meeressäugern der Neokortex, die auffälligste und jüngste Struktur der Großhirnrinde, stärker ausgebildet als bei den meisten Säugetieren. Erst kürzlich entdeckten Forscher zudem, dass Große Tümmler ebenfalls so genannte Spindelneurone besitzen, die ihre Signale weit durchs Gehirn senden. Diese Zellen, die auch bei Menschenaffen vorkommen, sollen zumindest beim Menschen unter anderem für Sozialkompetenz und Einfühlungsvermögen bedeutsam sein.

Welche Vorteile bringt ein hoch entwickeltes, großes Gehirn? Die Dinosaurier mit ihren eher kleinen Reptilienhirnen beherrschten 150 Millionen Jahre lang die Welt. Und so manche anderen in der Hinsicht mickrig ausgestatteten Tiere konnten sich trotzdem viele Jahrmillionen lang gut behaupten. Doch auch Intelligenz wirkt als biologische Anpassung, die genetisch fixierte Merkmale ergänzen kann. In einigen Entwicklungslinien, wie bei den Walen und den Primaten, ist die Gehirngröße in wenigen Millionen Jahren geradezu explodiert. Was das für diese Tiere im Einzelnen bedeutete, beginnen wir erst langsam zu verstehen.

So verdanken die Delfine und Menschenaffen ihrem Verstand Feinheiten der Kommunikation und des sozialen Umgangs, die Verhaltensforscher immer wieder erstaunen. Innerhalb ihrer Gemeinschaften können sie sich wechselnden Gruppenmitgliedern anschließen – was bei vielen Tieren, die in sozialen Verbänden leben, nicht üblich ist. Zugleich kennen sie ihre Beziehungen zu jedem der Artgenossen genau, vor allem aber auch die Freundschaften und Spannungen der anderen untereinander. Sie wissen, wer wem etwas angeht oder einen Gefallen schuldet. Sie bilden sogar soziale Pakte – und wechseln die Allianz, wenn ihnen eine andere besser passt.

Das Taktieren der Großen Menschenaffen bezeichnen einige Primatologen als geradezu machiavellistisch (SdW 6/2006, S. 50), in Anlehnung an die Ideen des italienischen Staatsmanns Nicolò Machiavelli (1469–1527). Es geht zu wie in einer Dienstleistungsgesellschaft, in der jeder die gegenseitigen Wohl- und Untaten genau verzeichnet. Männliche Schimpansen pflegen sich zu verbünden,

- um das Territorium zu patrouillieren, und manchmal auch, um Nachbarn vehement zu attackieren bis hin zu tödlichen Verletzungen – manche Forscher sprechen sogar von kriegerischen Unterfangen,
- um kleinere Säugetiere, auch andere Affen, zu erbeuten und deren Fleisch zu fressen,
- um den Alpha-Mann ihrer Gruppe zu stürzen oder
- um ein Weibchen sexuell zu erobern.

Je nach Zweck können sie dabei jeweils andere männliche Partner wählen. Genetische Studien zeigten, dass sich solche Koalitionen nicht unbedingt, wie früher angenommen, auf engere Verwandtschaft gründen müssen.

Zweckorientierte Männerbünde kommen auch bei manchen Delfinen vor, zum Beispiel um paarungsbereite Weibchen von der Gruppe abzusondern. David Lusseau von der University of Aberdeen (Schottland) beobachtete sogar, dass solche Männerkoalitionen gegeneinander operieren. Sie bestehen jeweils aus zwei oder drei Männchen, die eng abgestimmt zusammenarbeiten.

Hinterlistig zum Ziel

Hohe geistige Fähigkeiten liefern zudem die nötigen Voraussetzungen für gezielten Betrug. Täuschungsmanöver sind Delfinen denn auch nicht fremd. Stan Kuczaj von der University of Southern Mississippi in Hattiesburg und seine Kollegen erwischten ein in Gefangenschaft gehaltene Delfinweibchen bei einem offensichtlichen Schwindel. Kelly und einigen Artgenossen hatten die Forscher beigebracht, Gegenstände aus dem Bassin zu »apportieren« – zur Belohnung gab es jeweils einen Fisch. Nach dem Ende einer solchen Schulstunde schwammen alle anderen Delfine ihrer Wege. Nicht so Kelly. Sie erschien vor der Fischeisgabe mit einem weiteren, den Trainern nicht bekannten Gegenstand, und das wiederholte sich mit immer neuen Dingen. Erst nach längerem Suchen entdeckte Kellys Lehrerin das Versteck. Unter der Verkleidung eines Abflusses hatte das Delfinweib-

Parallelen bei intelligenten Strategien

Delfine benutzen viele ähnliche komplexe Verhaltensweisen wie Schimpansen.

DELFINEN

KOALITIONEN
Kooperation von Männchen, um Weibchen abzusondern und an der Flucht zu hindern

WERKZEUGGEBRAUCH
Schützen der Schnauze mit einem Schwamm beim Fressen am Boden

KOOPERATIVE JAGD
unter anderem Einkreisen und Zusammentreiben von Fischschwärmen, dann abwechselndes Fressen

VARIABLE SOZIALE GRUPPIERUNGEN
flexible Untergruppen in immer wieder anderer Zusammensetzung und Größe, abhängig etwa vom Nahrungsangebot oder von fortpflanzungsbereiten Weibchen

SCHIMPANSEN

KOALITIONEN
Territoriumspatrouillen in kleinen Männertrupps; Entführen fremder Weibchen; Männerallianzen für Dominanzzwecke

WERKZEUGGEBRAUCH
etwa Stochern nach Insekten mit zurechtgemachten Zweigen

KOOPERATIVE JAGD
Anpirschen an Beute, Umzingeln, abgestimmtes Angreifen

VARIABLE SOZIALE GRUPPIERUNGEN
flexible Untergruppen in immer wieder anderer Zusammensetzung und Größe, abhängig etwa vom Nahrungsangebot oder von fortpflanzungsbereiten Weibchen



Ein seltenes Foto: ein Kampf zwischen zwei Koalitionen von Delfinmännchen. Das Bild entstand 1983 vor Florida.



1962 lichtete Hugo van Lawick diese Grenzpatrouille von Schimpansenmännern ab.

chen Objekte gehört, die Besuchern ins Becken gefallen waren. Daraufhin beobachtete man sie genauer: Ganz klar passte Kelly gut auf, dass keiner ihrer Kumpane in der Nähe war, wenn sie ihr Versteck aufsuchte. Wer so etwas kann, vermag sich in andere hineinzusetzen und deren Gefühle und Bestrebungen in sich selbst wiederzuerkennen. Er besitzt eine Theory of Mind, eine Vorstellung vom Denken und Fühlen.

Geschichten von Schimpansen, die falsche Tatsachen vortäuschen, gibt es viele. Einer von uns (Stanford) wurde in Gombe Zeuge einer solchen Szene. Im Mittelpunkt standen der Chef der Gruppe, Wilkie, und Beethoven, ein tiefrangiges Männchen. Anfangs saßen beide mit einigen anderen Tieren auf einer Lichtung. Plötzlich vollführte Beethoven die typische Dominanzshow von Schimpansenmännern: Schreiend und lärmend, mit gestäubtem Fell und wilden Bewegungen stürmte er quer durch die Truppe und in den Wald. Das konnte Wilkie nicht dulden. Er raste hinter dem impertinenten Flegel her und steigerte sich in eine eigene Kraftshow hinein. Während er noch im Wald herumtobte, große Äste schwang und mit den Füßen auf Baumstämme trommelte, eilte Beet-

hoven still auf die Lichtung zurück – und paarte sich mit einem Weibchen, das dort offensichtlich gewartet hatte.

Der Werkzeuggebrauch von Schimpansen ist Legende, seit die britische Forscherin Jane Goodall in den 1960er Jahren erstmals »Termitenangeln« mit Hilfe von Stöckchen oder Halmen beobachtete. Die Insekten verbeißen sich in das Stäbchen und lassen sich daran aus ihrem Bau ziehen – woraufhin der Affe sie genüsslich verzehrt. Trotzdem hatte keiner erwartet, was die Primatologin Jill Pruetz von der Iowa State University in Ames und ihre Kollegen vor ein paar Jahren im Senegal sahen: Ein Affe spitzte einen Stock zu und stocherte dann damit in Baumhöhlen. Die ersten beiden Löcher waren anscheinend leer, doch aus dem dritten zog er einen aufgespießten Galago, auch Buschbaby genannt, einen kleinen Halbaffen. Ähnlich raffiniertes Verhalten kannte man bis dahin nur vom Menschen.

Werkzeugtradition im Meer

Delfine besitzen keine Hände. Dennoch verwenden sie Werkzeug. Die Meeresbiologin Rachel Smolker von der University of Vermont in Burlington und ihre Kollegen entdeckten solch ein Verhalten – erstmals für Wale überhaupt – in den frühen 1980er Jahren vor der Westküste Australiens bei Großen Tümmlern. Auch später beobachteten sie immer wieder, dass einige Weibchen große, kegelförmige Schwämme wie Masken vor die Schnauze nahmen. Offenbar schützten sie sich damit beim Fressen am Meeresboden vor stacheligen und stechenden Tieren oder vor rauem, die Haut abschürfenden Untergrund. Sie scheinen mit den Schwämmen auch Beute am Boden aufzulesen. Als Michael Krützen und seine Kollegen von der Universität Zürich später die Verwandtschaften der betreffenden Tiere mittels DNA-Analysen prüften, erkannten sie, dass dieses Verhalten anscheinend fast nur bei den Mitgliedern einer bestimmten weiblichen Linie auftritt und offenbar von den Müttern an die Töchter weitergegeben wird.

So erstaunlich solche Verhaltensweisen wirken – der entscheidende Vorteil, den ihr großes Gehirn den Menschenaffen und Walen verschafft, dürfte wohl weniger sein, dass sie ein Werkzeug zu verwenden wissen. Vielmehr zeigt sich der eigentliche Fortschritt darin, dass sie soziale Konstellationen wie auch technische Zusammenhänge oft schnell erfassen und dann in ihr eigenes Verhalten einbeziehen können. Das verhilft ihnen zusammen mit ihrem Lern- und Nachahmungsvermögen dazu, technische Neuerungen zu übernehmen und sogar Traditionen zu etablieren beziehungsweise im sozialen Umgang ein erhebliches strategisches Geschick zu entwickeln. Kurz – diese Tiere imitieren Artgenossen, begreifen Situationen und Zusammenhänge und lernen, die erworbenen Kenntnisse flexibel zu ihrem eigenen Besten zu gebrauchen.

In diesem Sinn verhilft der Werkzeuggebrauch Schimpansen zu einer reichhaltigeren und höherwertigen Ernährung. Einem Weibchen beispielsweise, das schwanger ist oder ein Junges säugen muss, kann die so verschaffte gehaltvolle Nahrung über magere Zeiten hinweghelfen und somit seinen Fortpflanzungserfolg steigern. Auch veränderte soziale Kon-

stellationen rasch zu begreifen und schnell darauf zu reagieren, bietet unermessliche Vorteile. Wechselnde Bündnisse und der flexible Umgang mit einer neuen sozialen Situation beschränken sich zwar nicht allein auf die höheren Primaten und die Delfine. Dennoch ist gerade dies bei vielen ihrer Arten markant. Und in jedem Fall beruhen solche Fähigkeiten auf jahrelanger Erfahrung – aber die zahlt sich aus.

Das Wissen über die Werkzeugkultur und andere tradierte Verhaltensmuster der Schimpansen rekrutierte sich zunächst hauptsächlich aus Zufallsbeobachtungen, Einzelschilderungen und unabhängigen Forschungen. Erst langsam kamen über die Jahre und von verschiedenen Orten Afrikas genügend Daten zusammen, um Traditionen bei diesen Affen übergreifend erfassen und vergleichen zu können. Andrew Whiten von der University of St Andrews (Schottland) und seine Kollegen sichteten 1999 die Erkenntnisse der sieben längsten Feldstudien. Sie ermittelten bei Schimpansen insgesamt mindestens 39 tradierte Verhaltensmuster (siehe SdW 4/2001, S. 30). Verglichen mit dem Menschen erscheint das dürftig – im Verhältnis zu den allermeisten Tierarten jedoch durchaus imposant. Tradierung bietet gegenüber Veränderungen auf genetischem Weg einige entscheidende Vorteile. Vor allem funktioniert die Weitergabe sehr viel schneller und direkter – und zuverlässiger – als die Übermittlung neuer Erbanlagen an die nächste Generation. Sexuelle Vermehrung stellt ja nicht automatisch sicher, dass die Nachkommen die betreffende Eigenschaft wirklich erben.

Werkzeuggebrauch beispielsweise wie hier geschildert hat keine unmittelbare genetische Grundlage. Doch wenn ein Tier so etwas dank seines Verstandes erfindet, die Nachkommen das Verhalten übernehmen und es ihnen im Leben hilft, bedeutet das für den Erfinder einen Fortpflanzungsvorteil. In



Dieser junge Schimpanse vom Gombe-Nationalpark in Tansania hat schon gelernt, mit einem eigens dafür zurechtgemachten Stöckchen Termiten aus ihrem Bau zu angeln.

dem Fall wird sich die neue Errungenschaft wohl im Lauf der Zeit in der Population verbreiten, selbst wenn sie nicht genetisch fundiert ist.

Außer den höheren Primaten bilden nur wenige Tiergruppen kulturelle Traditionen aus. Die Wale zählen auf jeden Fall dazu. Einige ihrer Arten bieten sehr gute Beispiele für soziales und sozial gestütztes Lernen. Die Meeressäuger vermitteln ihren Nachkommen nicht nur spezielle Ernährungsweisen und Jagdtechniken – darunter etwa ausgeklügeltes Jagen im Verband. Sie tradieren auch Lautäußerungen, manche sogar »Gesänge«. Zumindest in Gefangenschaft imitieren



Manche weiblichen Großen Tümmler im Indischen Ozean vor Australien benutzen Schwämme, um ihre Schnauze vor stacheligen Tieren am Meeresboden zu schützen. Den Trick geben sie an ihre Töchter weiter.

MICHAEL HEITHALS, FLORIDA INTERNATIONAL UNIVERSITY

Standbild aus einem Video-film der Forschungsstation in Honolulu. Eine Trainerin bedeutet dem Delfinweibchen Ake mit Zeichen: »linker Korb rechtes Frisbee hinein«. Das Tier muss sowohl die semantischen als auch die synthetischen Komponenten der Nachricht beachten.



LOUIS M. HERMAN, THE DOLPHIN INSTITUTE

ren Delfine offenbar gern fremde Laute. Sie können selbst Vokalisationen anderer Delfinarten erlernen. Für frei lebende Schwertwale – Orkas – der nordamerikanischen Westküste zeigten Forscher, dass ihre einzelnen Verbände über mehrere Jahrzehnte spezifische, nur jeweils einer Gruppe eigene Laute benutzten, die sie offenbar tradierten.

Die Forscher sind sich bisher jedoch nicht einig, ob Delfine die Begabung haben, Sprache zu lernen. Zu den eindrucksvollsten Studien, die nach Ansicht mancher Experten für ein Sprachtalent sprechen, zählen die Experimente des Tierpsychologen und Walforschers Louis Herman und seiner Kollegen am Kewalo Basin Marine Mammal Lab in Honolulu (Hawaii) aus den 1980er Jahren. Herman ließ Große Tümmler in zwei Kunstsprachen unterrichten: Die eine bestand aus computergenerierten Lauten, darunter auch hochfrequent abgespielten Wörtern menschlicher Sprache. Die andere war eine Zeichensprache aus Arm- und Handsignalen der Trainer.

Die beiden Delfine Ake und Phoenix erlernten tatsächlich verschiedene in Satzstruktur ausgedrückte Kommandos – zum Beispiel, eine Frisbee-scheibe in bestimmter Weise durch einen bestimmten Ring zu befördern oder unter einem anderen Tier durchzuschwimmen. Mehr noch: Sie bemerkten offenbar sinnlose Befehle, die den Trainern gelegentlich unterliefen. Ake etwa reagierte dann erst gar nicht. Die beiden Kunstsprachen reichten an menschliche Sprache und deren Möglichkeiten zwar keineswegs heran, doch immerhin enthielten beide Formen Grammatikregeln.

Dem Sprachtalent von Menschenaffen widmeten sich einige teils langjährige Studien. Nach Ansicht vieler Forscher deuten sie darauf hin, dass diese Primaten eine ganz einfache lautliche oder andere Sprache erlernen können und auch selbst mit Zeichensprache komplex zu kommunizieren vermögen. Besonders der junge männliche Bonobo Kanzi überzeugte viele, den die Primatologin

Sue Savage-Rumbaugh von der Georgia State University in Atlanta in einer Symbolbildersprache unterrichtete (siehe Bild S. 23). Mit der Zeit verstand das Tier anscheinend auch etwas gesprochenes Englisch. Vor allem aber erwies es sich als talentiert darin, mit Hilfe von Bildern einer elektronischen Tafel zu kommunizieren. Nach Schätzung der Forscherin konnte Kanzi schließlich über 1000 gesprochene Wörter verstehen und 300 Tafelzeichen selbst benutzen. Ihm vorge-sprochene Wörter zeigte er auf seiner Tafel, und er produzierte eigenständig kurze neue Wortfolgen, mit denen er etwa Wünsche äußerte.

Menschenaffen können demnach offenbar Wörter oder Zeichen als Symbole für Dinge begreifen und auch selbst so anwenden. Sie verstehen die Beziehung zwischen einem Zeichen und dem, was es repräsentiert. Des Weiteren vermögen sie solche »Wörter« spontan miteinander zu kombinieren – zu einer Frage, einer Mitteilung oder einer Bemerkung. Bisher erkannten die Primatologen bei Kanzis Sprachverständnis keinen wirklichen Unterschied zu menschlichen Kleinkindern.

Als ein wesentliches Kriterium für eine höhere geistige Entwicklungsstufe gilt, sich selbst als Individuum zu begreifen. Offenbar können das alle Großen Menschenaffen. Forscher erschließen dies etwa daraus, dass diese Tiere sich selbst im Spiegel zu erkennen scheinen – sie vollführen dann manchmal die merkwürdigsten Verrenkungen. Und sie begreifen offensichtlich, dass Farbflecken an ihrem Körper, die sie im Spiegel entdecken, von jemandem wohl dort hingemalt worden sein müssen.

Gleiches gilt für Große Tümmler. Auch sie betrachten sich besonders ausgiebig, wenn sie einen Farbflecks tragen. Ein Tier versuchte wiederholt eine Flosse in Augenschein zu nehmen, die ein Mitarbeiter nur berührt, aber gar nicht angemalt hatte. Ein Delfin mit markierter Zunge öffnete vor dem Spiegel



DIANA REISS, HUNTER COLLEGE

Dieses Delfinmännchen im Brooklyner Aquarium in New York erkannte sich offenbar im Spiegel. Auf seiner Haut angebrachte Farbflecke betrachtete es lange. Auch bewegte es vor dem Spiegel mehrmals eine Flosse, die von den Forschern nur scheinbar angemalt worden war. Und es öffnete, als seine Zunge markiert worden war, vor dem Spiegel die Schnauze.

immer wieder die Schnauze, als müsse er sich die Sache genauer ansehen. Ein dem menschlichen vergleichbares Bewusstsein von sich selbst beweist solches Verhalten zwar noch nicht. Doch zeigen die Experimente immerhin einen überragenden Grad an Verstand.

Und den können die Tiere in ihrer natürlichen Umwelt gut gebrauchen (SdW 7/2006, S. 26). So stellt dort etwa die Nahrungsbeschaffung hohe kognitive Ansprüche an sie. Menschenaffen wie Delfine durchstreifen dazu weite Gebiete. Essen findet sich längst nicht überall und schon gar nicht jederzeit. Die Affen ziehen umher zu Bäumen, die gerade reife Früchte tragen. Sie merken sich genau die viel versprechenden Standorte und suchen diese Stellen öfter gezielt auf, um den Reifezustand zu prüfen, damit sie den richtigen Zeitpunkt nicht verpassen. Delfine können auf der Suche nach einem Fischschwarm kaum Landmarken zu Hilfe nehmen, aber zur Ortung setzen sie ihr Sonar ein, und so fahnden sie oft den ganzen Tag nach einer ergiebigen Mahlzeit.

Gemeinsame Jagd nach Fleisch


Auch Schimpansen, die sich eigentlich größtenteils von Früchten ernähren, fressen bei Gelegenheit sehr gern Fleisch. Sie erbeuten kleinere Primaten, junge Schweine oder Antilopen. Manchmal erhascht ein Männchen oder Weibchen allein ein Beutetier, doch eher ist die Jagd bei Schimpansen eine Gemeinschaftsleistung mehrerer, meist der Männer – und dazu ein sozial höchst gewichtiges Ereignis. Auf den menschlichen Beobachter wirkt das Geschehen äußerst spannend und oft grausam, wenn ein Schimpansentrupp auf einem Streifzug einer Horde kleinerer Affen begegnet, sie umzingelt, ein Opfer überwältigt und es tötet.

Der Fang sorgt unter den Schimpansen stets für große Aufregung, denn nun geht es ans Betteln und Teilen, Rauben oder Stückeentreißen. Jeder möchte etwas abbekommen. Im Gombe-Nationalpark erlegen erwachsene und heranwachsende Männchen 90 Prozent der Beute. In ihrem Besitz ist oft nur ein Tier, und das teilt nur einzelnen anderen generös etwas zu. Die Männchen nutzen die Situation zum Beispiel, um eine neue Allianz zu schmieden, einen alten Feind zu ärgern oder ihren sozialen Status zu festigen. Obwohl die Weibchen gelegentlich auch selbst jagen, erhalten sie Fleischstücke eher von den Männchen: teils vom Jäger selbst, teils von einem Artgenossen, der dem Fänger einen Teil entwenden konnte.

Viele Delfinarten jagen ebenfalls gemeinschaftlich. Sie kooperieren dabei sehr geschickt und agil. Besonders zeichnen sich hierin die den Delfinen nahestehenden Schwertwale oder Orkas aus, die gern Killerwale genannt werden und an die zehn Meter messen können. Sie fressen praktisch alles, was sie erwischen, und lassen sich selbst von großen und wehrhaften Tieren nicht abschrecken: Zu den Opfern gehören Vögel und Fische, Schildkröten und Kalmare, große Robben, Delfine und selbst Blauwale. Seelöwen fangen sie nicht selten, indem sie sie ins flache Wasser treiben. Oder ein Trupp strandet absichtlich an einer Küste oder Eisscholle und überwältigt so blitzschnell dort liegende Robben. Vor Patagonien

scheint diese Überrumpelungstaktik zur Gewohnheit geworden zu sein – und ist sicherlich bester Anschauungsunterricht für einen jungen Schwertwal, der solch einen Beutezug miterlebt.

Unsere Forschungen lehren uns Respekt vor den beiden Tiergruppen, mit denen wir uns seit Jahren beschäftigen und die sich in vielem so ähneln, auch wenn sie äußerlich ganz unterschiedlich leben und aussehen. Gerade jetzt, da die Wissenschaftler deren Klugheit zu begreifen beginnen, sind nicht wenige dieser Arten ernstlich gefährdet. Menschenaffen gibt es in 100 Jahren voraussichtlich nur noch in ein paar kleineren Refugien und im Zoo, da ihr Lebensraum laufend schrumpft und sie vielerorts Verboten zum Trotz immer noch bejagt werden. Durch die Ausbeutung der Meere, Überfischung, Verschmutzung und andere Begleitfolgen drohen einige Delfinarten bald auszusterben. Dass die Tiere in großer Zahl als unbeabsichtigter Beifang in Netzen der Fischindustrie verenden, ist nur einer von vielen Missständen.

Die Menschenaffen und die Wale verdienen unseren Schutz – nicht nur wegen ihrer großen Intelligenz und ihrer faszinierenden Fähigkeiten, aber auch deswegen. 

DIE AUTOREN



Maddalena Bearzi ist Mitgründerin und Präsidentin der Ocean Conservation Society von Südkalifornien in Marina del Rey. Sie ist promovierte Biologin, Journalistin für Natur- und Reisetemen und erforscht Wale seit mehr als 20 Jahren

in verschiedenen Weltregionen. **Craig Stanford** hat eine Professur für Anthropologie und Biowissenschaften an der University of Southern California in Los Angeles. Er ist einer der Direktoren des dortigen Jane Goodall Research Center. Seit über 15 Jahren beobachtet er in Afrika Menschenaffen.

QUELLEN

Bearzi, M., Stanford, C.B.: Beautiful Minds: The Parallel Lives of Great Apes and Dolphins. Harvard University Press, Cambridge 2008

Krützen, M.J. et al.: Cultural Transmission of Tool Use in Bottlenose Dolphins. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A. 105, S. 8939–8943, 2005

Marino, L. et al.: Cetaceans Have Complex Brains for Complex Cognition. In: PLoS Biology 139, S. 966–972, 2007

LITERATURTIPPS

Gehirn und Bewusstsein. Spektrum der Wissenschaft Dossier 5/2009
Sammlung früherer Beiträge auch zur Tierintelligenz

Intelligenz. Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2000
Exklusiv zusammengestellte Artikel über Denken und Bewusstsein von Tieren

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1114583

© American Scientist
www.americanscientist.org

Proteine ohne Struktur

Nach gängiger Vorstellung muss jedes Protein eine ganz bestimmte starre Form annehmen, um seine Aufgaben in der Zelle zu erfüllen. Doch das trifft längst nicht immer zu.

Von A. Keith Dunker und Richard W. Kriwacki

Proteine sind der Stoff, aus dem das Leben ist. Die DNA mag unter allen biologischen Molekülen den größten Kultstatus innehaben, doch ist sie vor allem deshalb so wichtig, weil sie die Bauanleitungen für die Proteine enthält. Diverse Zelltypen unseres Körpers – Neurone, weiße Blutkörperchen, Geschmacksknospen und so weiter – unterscheiden sich vor allem darin, dass sie verschiedene Gruppen von Genen aktivieren und folglich verschiedene Proteinmixturen herstellen.

Angesichts der Bedeutung der Proteine sollte man meinen, dass die Biologen längst geklärt hätten, wie diese Moleküle funktionieren und ihre räumliche Gestalt annehmen. Viele Wissenschaftler haben aber jahrzehntelang mit einem unvollständigen Modell gearbeitet. Sie hatten zwar erkannt, dass Proteine aus Aminosäuren bestehen, die wie Perlen auf einer Schnur aufgereiht sind. Jedoch waren sie überzeugt davon, dass ein Protein nur dann korrekt funktioniert, wenn die Aminosäurekette sich zu einer ganz bestimmten, starren Struktur faltet. Mittlerweile wird immer klarer, dass viele Proteine ihre biologischen Funktionen erfüllen, ohne sich jemals vollständig zu falten; andere wiederum tun das nur bei Bedarf. Tatsächlich ist wohl ein Drittel aller menschlichen Proteine »intrinsisch unstrukturiert« – das heißt, sie enthalten Regionen, die sich aus sich selbst heraus nicht falten.

Selbstverständlich wissen die Biologen schon seit einiger Zeit, dass nicht alle Proteine starr sind. So haben sich die Polymerasen, die das Erbgutmolekül DNA kopieren oder es in RNA umschreiben, als komplizierte Nanomaschinen mit vielen beweglichen Teilen erwiesen. Aber diese Proteine werden oft als Konstrukte aus starren Segmenten und gelenkigen Verbindungsstücken angesehen, ähnlich einem Klappstuhl. Intrinsisch unstrukturierte Proteine muss man sich jedoch anders vorstellen, eher wie halbweiche Spaghetti, die fortwährend in einem Topf kochenden Wassers herumwabern.

Vor 15 Jahren noch wäre eine solche Beschreibung regelrecht ketzerisch gewesen. Inzwischen zeichnet sich ab, dass es wahrscheinlich diese Strukturlosigkeit und Flexibilität der Proteine war, die der Entstehung des Lebens auf die Sprünge half, und dass sie immer noch eine ganz wesentliche Rolle im zellulären Geschehen spielt – etwa bei der Zellteilung und dem Aktivieren von Genen. Wenn wir uns von dem Vorurteil

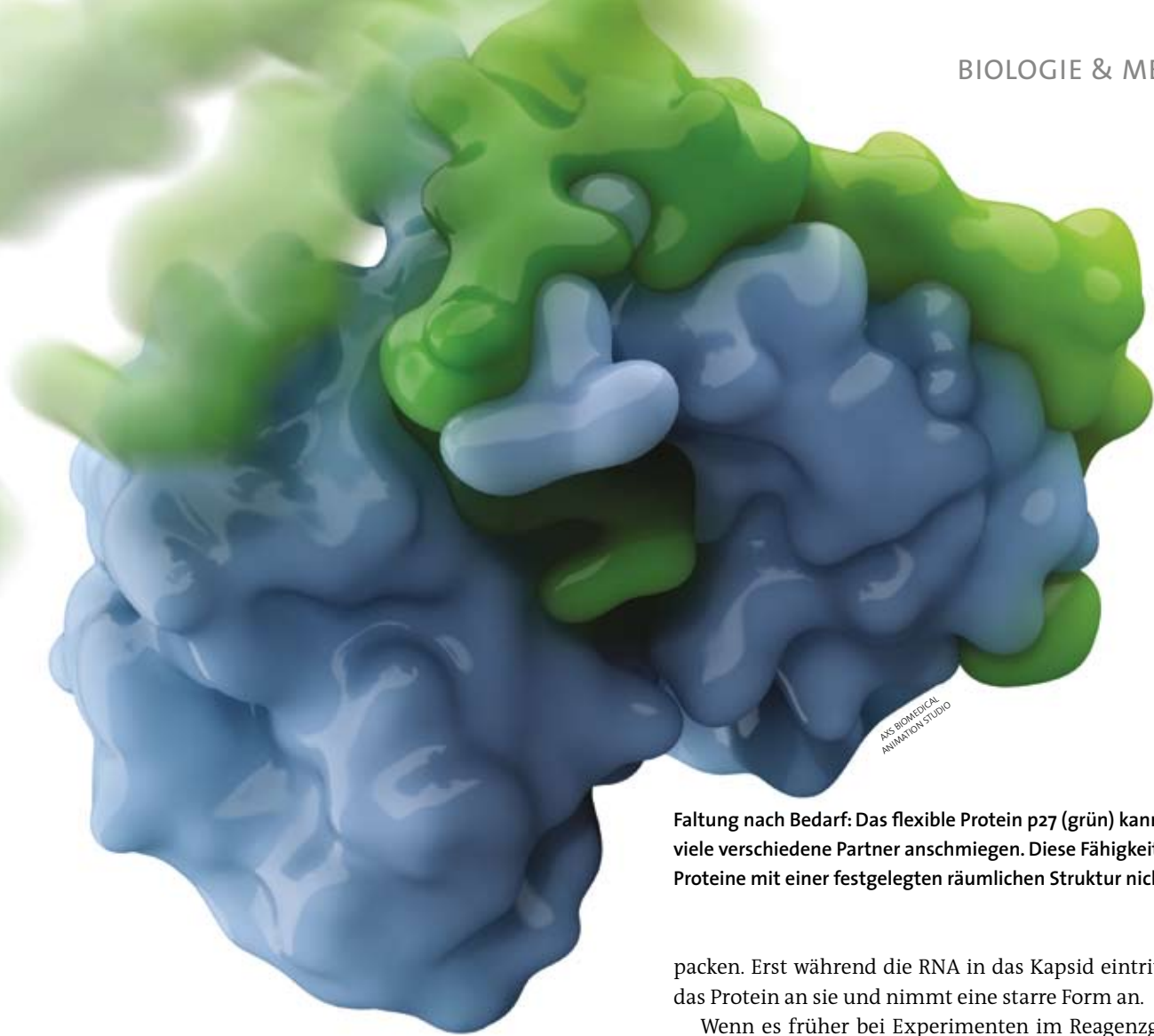
lösen, dass funktionierende Proteine immer auf ganz bestimmte Weise gefaltet sein müssen, gewinnen wir überraschende neue Einsichten in die Zellbiologie. Und wahrscheinlich ergeben sich daraus auch neue Ansätze, um Therapien gegen Krankheiten zu entwickeln, einschließlich Krebs.

Die Vorstellung, dass die Funktion eines Proteins von einer starren räumlichen Struktur (der so genannten Konformation) abhängt, stammt aus dem Jahr 1893. Entwickelt hat sie Emil Fischer, ein bedeutender Naturstoffchemiker des 19. und 20. Jahrhunderts und Träger des Chemie-Nobelpreises von 1902. Fischer vermutete, dass Enzyme – also Proteine, die biochemische Reaktionen katalysieren – mit anderen Molekülen wechselwirken, indem sie an spezifische Formen auf deren Oberflächen binden. Moleküle, deren Oberflächenform davon auch nur geringfügig abweiche, würden von den Enzymen komplett ignoriert, so Fischer. Anders ausgedrückt: Ein Enzym und sein Bindungspartner passen zueinander wie der Schlüssel zum Schloss.

50 000 Proteinstrukturen entschlüsselt

Als Fischer diese Ideen formulierte, war der chemische Aufbau der Proteine noch unbekannt. Während der folgenden 60 Jahre erkannten die Biologen, dass Proteine aus Aminosäureketten bestehen, und schlossen daraus, dass die Ketten sich zu einer bestimmten Konformation falten müssten, um ihre Funktion auszuüben. 1931 untermauerte der chinesische Biochemiker Hsien Wu diese Sicht, indem er zeigte, dass Proteine ihre Funktion vollständig verlieren, wenn man ihre natürliche räumliche Struktur zerstört. Seither haben Forscher die Struktur von mehr als 50 000 verschiedenen Proteinen aufgeklärt, angefangen mit dem Pottwal-Myoglobin im Jahr 1958. Meist ließen sie dazu die – starr gefalteten – Proteine kristallisieren und bestrahlten die Kristalle anschließend mit Röntgenlicht. Aus dem Beugungsmuster, das der Proteinkristall dem Röntgenlicht aufprägt, berechneten sie die dreidimensionale Gestalt des Proteins.

Doch schon im frühen 20. Jahrhundert erkannten Wissenschaftler, dass etliche Antikörper an mehrere Zielstrukturen binden – eine Beobachtung, die nicht recht zum Schlüssel-Schloss-Prinzip passen wollte. Der berühmte amerikanische Chemiker Linus Pauling spekulierte in den 1940er Jahren,



Faltung nach Bedarf: Das flexible Protein p27 (grün) kann sich an viele verschiedene Partner anschmiegen. Diese Fähigkeit besitzen Proteine mit einer festgelegten räumlichen Struktur nicht.

dass bestimmte Antikörper dazu in der Lage sind, verschiedene Konformationen anzunehmen – gesteuert durch die Anpassung des Antikörpers an sein jeweiliges Ziel.

Etwa von dieser Zeit an häuften sich Berichte, wonach einige Proteine auch ohne starre räumliche Struktur funktionieren können. Sie wurden meist als eigenartige Ausnahmen von der Regel interpretiert. Einer von uns (Dunker) gehörte zu den ersten Wissenschaftlern, die solche »Ausreißer« sammelten – und irgendwann erkannten, dass das Dogma von der starren Proteinstruktur korrigiert werden muss.

Um einige Beispiel zu nennen: 1953 stellten Forscher fest, dass das Milchprotein Kasein großteils unstrukturiert ist; wahrscheinlich erleichtert dies seine Verdauung im Magen-Darm-Trakt von Säugetierjungen. In den frühen 1970er Jahren fiel im Protein Fibrinogen eine große Region auf, die keine feste Struktur besitzt; diese Region ist sehr wichtig für die Blutgerinnung. Ebenfalls in den 1970ern gab es bemerkenswerte Erkenntnisse über das Protein, das beim Tabakmosaikvirus die äußere Hülle (Kapsid) bildet. Solange das Kapsid leer ist, hängen große unstrukturierte Proteinabschnitte lose in seinen inneren Hohlraum hinein. Diese Flexibilität ermöglicht es, die neue Virus-RNA, die während der Vervielfältigung des Virus in der Wirtszelle entsteht, in das Kapsid zu

packen. Erst während die RNA in das Kapsid eintritt, bindet das Protein an sie und nimmt eine starre Form an.

Wenn es früher bei Experimenten im Reagenzglas nicht gelang, Proteine zu falten, vermuteten die Forscher oft, sie hätten etwas falsch gemacht. Untersuchten sie beispielsweise gereinigte Proteine mit Hilfe der Kernspinresonanzspektroskopie (NMR-Spektroskopie) – einem wichtigen Verfahren in der Proteinforschung –, dann bekamen sie manchmal unklare Ergebnisse, aus denen sie schlossen, dass sich die isolierten Proteine nicht ordnungsgemäß gefaltet hätten. Im Zellinneren würden sich die Proteine gewiss in eine »korrekte« Konformation begeben, lautete dann die Erklärung für das vermeintlich misslungene Experiment.

Tatsächlich jedoch deuteten die Daten auf etwas weit Interessanteres hin als auf experimentelle Schwierigkeiten. Bei der NMR-Spektroskopie nutzt man starke Radiowellenpulse, um die Atomkerne bestimmter Elemente, meist von Wasserstoff, in einem äußeren Magnetfeld anzuregen, damit sie Signale aussenden. Die Resonanzfrequenzen der Atomkerne hängen dabei stark davon ab, wo innerhalb der Aminosäuren die Atome sitzen und welche Stellung die Aminosäuren zueinander haben. Aus diesen Frequenzen der Atomkerne können die Forscher somit ableiten, welche Struktur ein starres Protein besitzt. Wenn sich die Aminosäuren jedoch gegeneinander stark bewegen, wie es bei einem ungefalteten Protein der Fall ist, kommt es zu Unschärfen bei der Messung der Resonanzfrequenzen.

Im Jahr 1996 untersuchte einer von uns (Kriwacki, damals am Scripps Research Institute in Kalifornien) ein Protein namens p21, das bei der Zellteilung eine Rolle spielt. Die NMR-Spektroskopie brachte ein überraschendes Ergebnis zu Tage: p21 ist fast vollständig ungeordnet. Die Aminosäuren rotieren frei um die chemischen Bindungen, die sie zusammenhalten. Sie bleiben nie länger als Bruchteile einer Sekunde in einer bestimmten Konformation. Dennoch erfüllt p21 seine regulatorischen Aufgaben in der Zelle. Zum ersten Mal war nachgewiesen: Das Fehlen einer definierten räumlichen Gestalt macht ein Protein nicht zwangsläufig nutzlos.

Die NMR-Spektroskopie bleibt die Standardmethode, um herauszufinden, ob ein Protein gefaltet ist. Zusammen mit anderen Techniken hat sie mittlerweile belegt, dass zahlreiche Proteine intrinsisch unstrukturiert sind. Diese Moleküle verändern ihre Gestalt ständig, dafür sorgen die brownsche Molekularbewegung und ihr eigenes thermisches Zittern. Dennoch sind sie voll funktionstüchtig.

Das neue, erweiterte Konzept der Proteinstruktur lässt sich gut am Beispiel des Proteins p27 illustrieren, das bei den meisten Wirbeltieren vorkommt. Wie p21 spielt es eine wichtige Rolle bei der Regulation der Zellteilung und verhindert eine ungehemmte Vermehrung der Zellen. Laut NMR-Untersuchungen ist p27 höchst flexibel. Es enthält Abschnitte, die sich rasch falten und wieder entfalten, wobei kurzlebige Spiral- und Faltblattstrukturen entstehen. Die meisten menschlichen Krebszellen enthalten weniger p27 als gesunde Zellen, und je größer dieses Defizit, desto schlechter sind die Überlebenschancen des Patienten.

Das Molekül wirkt als Bremse der Zellteilung, indem es an mindestens sechs verschiedene Typen von Kinasen bindet und diese hemmt. Kinasen sind wichtige Regulatoren der DNA-Replikation und der Zellteilung. Sie heften Phosphatgruppen (PO_4^{3-}) an andere Proteine (»phosphorylieren« sie also) und setzen damit verschiedene Ereignisse in Gang. Das fadenförmige, bewegliche p27 legt sich um das Kinase-molekül, das eine weit gehend starre Struktur hat, und bedeckt so einen großen Teil von dessen Oberfläche, einschließlich der biochemisch aktiven Region (siehe Abbildung auf

S. 31). Das hindert die Kinase daran, andere Moleküle zu phosphorylieren, und stoppt dadurch die Zellteilung. Dank seiner hohen Flexibilität kann sich p27 an verschiedene Typen von Enzymen anschmiegen und sie hemmen. Proteine mit dieser Fähigkeit bezeichnet man als promiskuitiv.

Eiweiß mit eingebauter Bremse

Auf der Skala von vollständig starr gefaltet bis völlig unstrukturiert liegt p27 fast ganz am chaotischen Ende. Die Kinasen hingegen finden sich am entgegengesetzten Ende, im komplett geordneten Bereich. Andere Proteine liegen irgendwo dazwischen, da sie sowohl starr geformte als auch unstrukturierte Regionen besitzen. Das Protein Calcineurin, ein wichtiger Akteur des Immunsystems und Angriffspunkt verschiedener Immunsuppressiva, ist quasi das Gegenteil einer Kinase: Es entfernt Phosphatgruppen von bestimmten Proteinen, die zuvor phosphoryliert wurden. Die katalytisch aktive Domäne des Enzyms ist klar strukturiert und funktioniert nach dem klassischen Schlüssel-Schloss-Prinzip. Aber Calcineurin hat auch eine unstrukturierte Region, die an die eigene aktive Domäne bindet und sie inaktiviert, falls es gerade nicht erforderlich ist, Phosphatgruppen von anderen Proteinen zu entfernen. Calcineurin ist also gewissermaßen zwei Proteine in einem: Die strukturierte Region arbeitet als Katalysator, und die unstrukturierte steuert deren Aktivität.

Bei zahlreichen Proteinen gehört das Fehlen einer starren Konformation zum Arbeitsmechanismus. Zum Beispiel kann die Größe einer unstrukturierten Region dazu dienen, das Tempo zu kontrollieren, mit dem zwei Bindungsstellen zueinander finden: Je größer, desto länger dauert es, bis sie aufeinandertreffen. In anderen Fällen ermöglicht die ungeordnete, flexible Gestalt dem Protein, die enge Öffnung einer Zellmembran zu durchqueren. Auch in den langen Ausläufern (Axonen) von Nervenzellen finden sich unstrukturierte Proteine. Dort bilden sie bürstenähnliche Strukturen und verhindern so, dass die Axone kollabieren.

Strukturlose Proteine gibt es auch bei einfacheren Organismen und selbst bei Viren, etwa bei Bakteriophagen. Diese infizieren Bakterien, indem sie sich an deren Membran heften. Das geschieht mit Hilfe von Proteinen, die über bewegliche Gelenkstücke am Phagenkörper befestigt sind. Der Vorteil: Da das Bindungsprotein viel kleiner und beweglicher ist als der komplette Phage, kann es sich während des Andockvorgangs rasch umorientieren und seine Ausrichtung optimal anpassen.

Bis heute haben Forscher etwa 600 Proteine identifiziert, die ganz oder teilweise unstrukturiert sind, und deren Funktion aufgeklärt. Wir vermuten jedoch, dass es noch viel mehr davon gibt. Immerhin kommen allein im menschlichen Organismus etwa 100 000 verschiedene Proteine vor, und erst ein kleiner Teil davon ist strukturell erforscht. Zudem lassen neue bioinformatische Studien, an denen Dunker beteiligt ist, auf eine große Verbreitung von (zumindest partiell) unstrukturierten Proteinen schließen. Diese Untersuchungen fußen auf früheren theoretischen Studien an einzelnen Proteinen, denen zufolge sich Aminosäureketten entsprechend

AUF EINEN BLICK

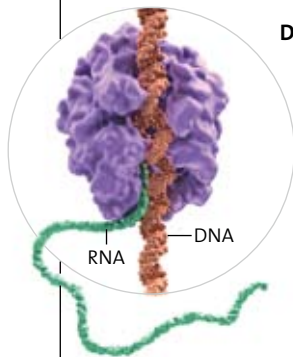
MOLEKULARE UNORDNUNG

1 Lange glaubten Forscher, **Proteine** müssten sich zu starr geformten Gebilden falten, um ihre Funktion auszuüben – etwa an ein bestimmtes Zielmolekül zu binden. Neuere Arbeiten deuten aber darauf hin, dass sogar jedes dritte menschliche Protein entweder teilweise oder vollständig ungeordnet ist.

2 Ein solcher **ungefalteter Zustand** muss die Funktion eines Proteins nicht beeinträchtigen. Oft ist er sogar notwendig, damit das Protein seine Aufgaben erfüllen kann.

3 **Unstrukturierte Proteine** haben in der biologischen **Evolution** vermutlich eine wichtige Rolle gespielt. Ein besseres Verständnis davon, wie sie funktionieren, kann eines Tages in die Entwicklung neuer Medikamente münden.

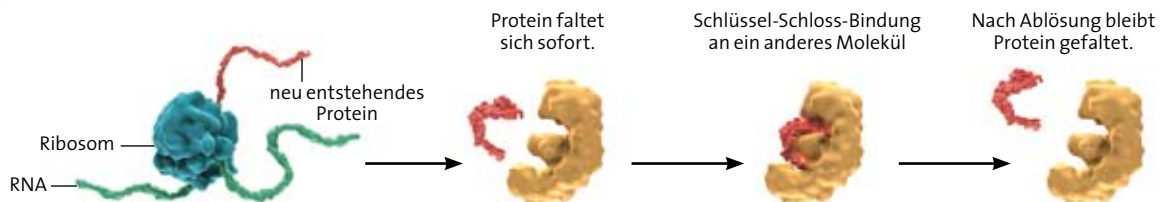
Eine erweiterte Sicht auf Proteine



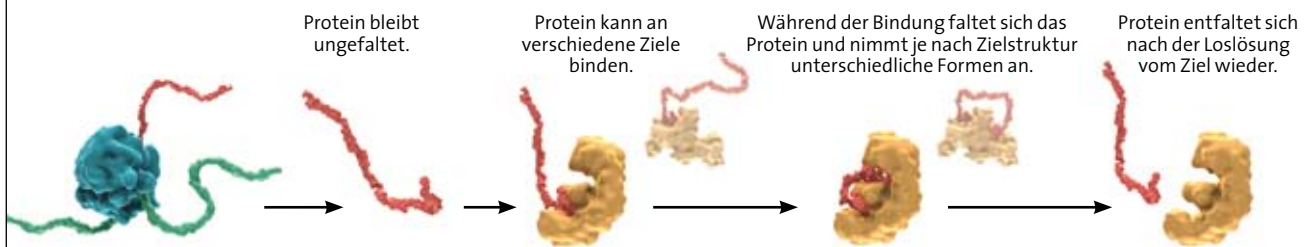
Die molekulare Maschinerie der Zellen schreibt die Information, die in der DNA-Sequenz – in den Genen – steckt, in RNA um. Anschließend nutzt sie die RNA als Bauanleitung, um lange Aminosäureketten herzustellen – das Material, aus dem die Proteine bestehen. Lehrbüchern zufolge muss sich die Aminosäurekette in eine ganz bestimmte Struktur falten, damit das Protein seine Aufgabe

korrekt erfüllen kann (obere Abbildungsreihe). Diese Aufgabe kann etwa lauten, an ein spezifisches Molekül zu binden, wie ein Schlüssel, der in ein Schloss einrastet. Viele Proteine bleiben tatsächlich jedoch ungefaltet, zumindest in einigen ihrer Regionen. Die Flexibilität ihrer unstrukturierten Abschnitte erlaubt es ihnen unter anderem, an verschiedene Moleküle zu binden (untere Abbildungsreihe).

DIE KLASSISCHE SICHT AUF PROTEINE



DER NEU ENTDECKTE MECHANISMUS



ihrer chemischen Zusammensetzung falten. Große, hydrophobe (Wasser abstoßende) Aminosäuren finden sich in wässriger Umgebung vor allem im Inneren des gefalteten Moleküls; auf seiner Oberfläche hingegen liegen meist kleine, hydrophile (Wasser anziehende) Aminosäuren.

Dunker hatte die Idee, die Aminosäuresequenz von intrinsisch unstrukturierten Proteinen mit der Sequenz von starr gefalteten Proteinen zu vergleichen. 1997 fand sein Team mit Hilfe von Computeralgorithmen heraus, dass unstrukturierte Proteine mehr hydrophile Aminosäuren enthalten. Somit erlaubt das Verhältnis von Wasser anziehenden zu Wasser abstoßenden Aminosäuren eine Vorhersage darüber, ob ein Protein sich nur teilweise oder vielleicht gar nicht faltet.

Im Jahr 2000 verglich Dunkers Arbeitsgruppe die Genome von Lebewesen aus unterschiedlichen Organismenreichen. Mit speziellen Algorithmen suchten die Forscher nach DNA-Abschnitten, die für lange Ketten aus hydrophilen Aminosäuren kodieren. Die entsprechenden Proteine sollten mit großer Wahrscheinlichkeit wenigstens teilweise unstrukturiert sein. Bei den einfachsten Organismen wie Bakterien und Archaeen, so ergab die Analyse, sind nur relativ wenige Proteine intrinsisch unstrukturiert. Aber bei Eukaryoten wie Hefen, Mäusen oder Menschen, deren Zellen Kerne besitzen, scheinen unstrukturierte Proteine viel häufiger vorzukommen.

Vier Jahre später nahm eine Forschergruppe um David T. Jones vom University College London ähnliche Analysen mit menschlichen Genomsequenzen vor. Dabei zeigte sich, dass möglicherweise 35 Prozent aller menschlichen Proteine große unstrukturierte Regionen besitzen. Anders gesagt: Mehr als ein Drittel unserer Proteine könnte ausgedehnte Abschnitte enthalten, für die das Schlüssel-Schloss-Konzept nicht gilt!

Warum das so ist, wissen wir nicht. Möglicherweise sind Proteine mit Schlüssel-Schloss-Prinzip für klar definierte Funktionen ausgelegt, etwa für enzymatische Aktivitäten, während unstrukturierte Proteine eher in der Signalgebung und bei der Regulation mitwirken. Bei den einfach aufgebauten Bakterien befindet sich der gesamte Zellinhalt in einem einzigen membranumschlossenen Raum. Eukaryoten hingegen besitzen zahlreiche intrazelluläre Teilräume, darunter den Zellkern, den Golgi-Apparat, die Mitochondrien und so weiter. Deshalb müssen sie mehr Signale zwischen den verschiedenen Kompartimenten austauschen und das aufwändiger regulieren. Mehrzellige Organismen benötigen darüber hinaus noch ausgeklügelte Signalmechanismen, um ihre verschiedenen Zellen und Gewebe zu koordinieren. Das Beispiel p27 zeigt, wie ein Protein dank seiner Flexibilität verschiedene chemische Botschaften in der Zelle weitergeben kann: Die Botschaften sind verschlüsselt in der Konformation des Moleküls, in

Die flexiblen Arbeiter der Zellen

Ob als Enzyme, Strukturelemente oder molekulare Maschinen – Proteine sind für nahezu alles verantwortlich, was eine Zelle tut. Drei Beispiele zeigen wichtige Proteine aus der menschlichen Zelle, die zum Teil oder ganz unstrukturiert sein müssen, um ihre Funktion zu erfüllen.

EINGLEISIGER TRANSPORTER

Zwei Kopien des Proteins Kinesin fügen sich zu einer molekularen Maschine zusammen, die auf Mikrotubuli entlangwandert, um Fracht von einem Teil der Zelle zum anderen zu transportieren (Mikrotubuli sind Proteinröhren, die die Zelle stabilisieren und als Transportwege in der Zelle dienen). Jeder Schritt verbraucht ein ATP-Molekül als Energielieferant. Das ATP reagiert mit dem vorderen »Fuß« des Proteins und zwingt ein ungefaltetes Verbindungsstück des Moleküls dazu, sich in Richtung dieses Fußes zu verformen. Dabei zieht das Verbindungsstück den hinteren Fuß nach und bringt ihn dazu, sich nach vorn zu drehen, wo er sich dem Mikrotubulus erneut anheftet.

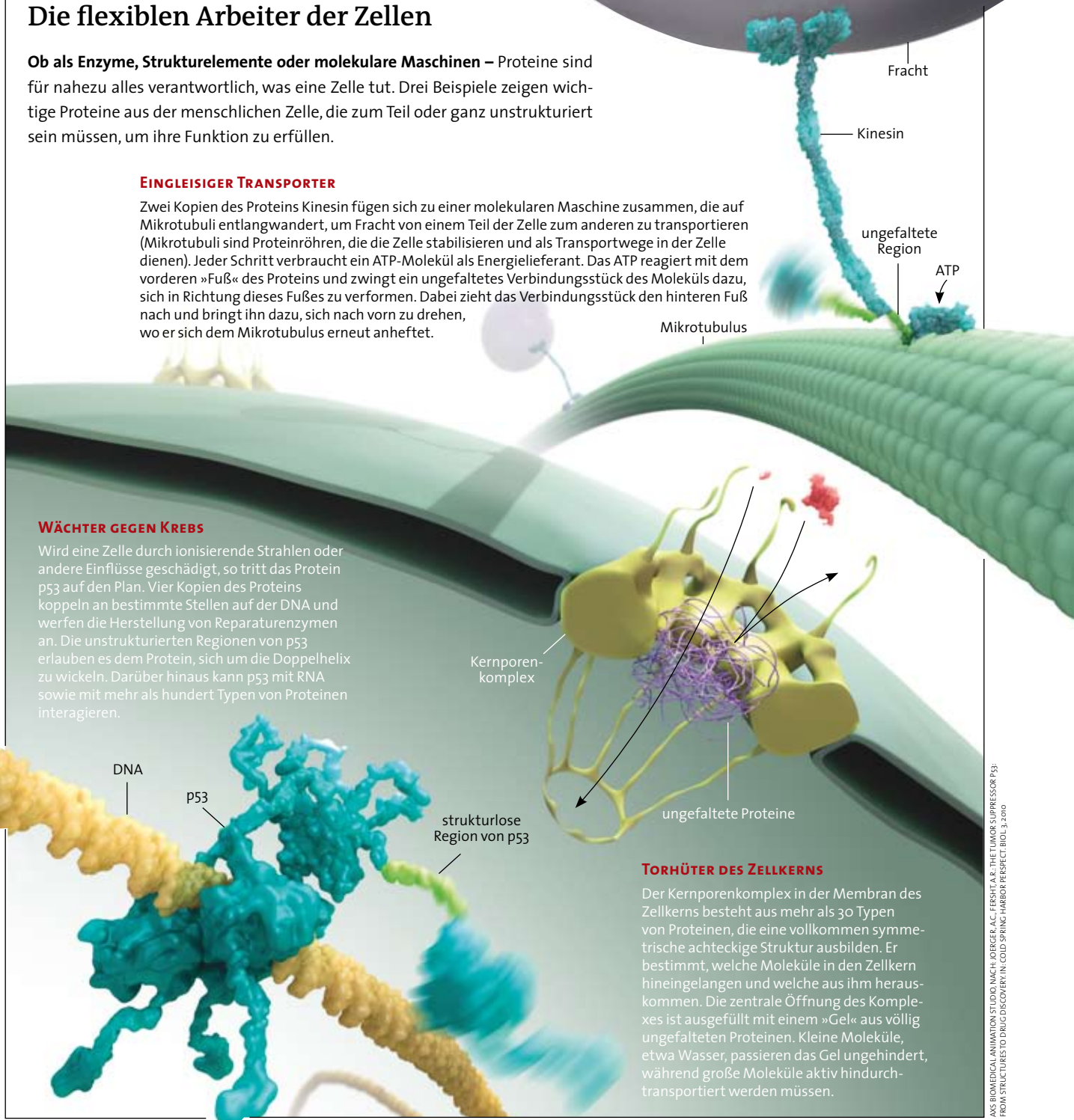
WÄCHTER GEGEN KREBS

Wird eine Zelle durch ionisierende Strahlen oder andere Einflüsse geschädigt, so tritt das Protein p53 auf den Plan. Vier Kopien des Proteins koppeln an bestimmte Stellen auf der DNA und werfen die Herstellung von Reparaturenzymen an. Die unstrukturierten Regionen von p53 erlauben es dem Protein, sich um die Doppelhelix zu wickeln. Darüber hinaus kann p53 mit RNA sowie mit mehr als hundert Typen von Proteinen interagieren.

TORHÜTER DES ZELLKERNS

Der Kernporenkomplex in der Membran des Zellkerns besteht aus mehr als 30 Typen von Proteinen, die eine vollkommen symmetrische achteckige Struktur ausbilden. Er bestimmt, welche Moleküle in den Zellkern hineingelangen und welche aus ihm herauskommen. Die zentrale Öffnung des Komplexes ist ausgefüllt mit einem »Gel« aus völlig ungefalteten Proteinen. Kleine Moleküle, etwa Wasser, passieren das Gel ungehindert, während große Moleküle aktiv hindurchtransportiert werden müssen.

ACS BIOMEDICAL LITERATURE STUDIOS/NACH J. JOBERG, A.C. FERESH, A.B. THEIET/IMMOK SUPPRESSOR P53 FROM STRUCTURES TO DRUG DISCOVERY: COD SPRING HARBOR PERSPECTIVE 2010:3



seinen chemischen Veränderungen (etwa seiner Phosphorylierung) und in der Auswahl seiner Bindungspartner.

Das weit gehende Fehlen von intrinsisch unstrukturierten Proteinen bei Bakterien könnte man als Hinweis darauf nehmen, dass diese Proteine sich erst spät in der Evolution entwickelt haben. Verschiedene Forschungsergebnisse deuten aber darauf hin, dass sie schon früh entstanden sind. Zum einen greifen wichtige Signalsysteme der Bakterien auf unstrukturierte Proteine zurück. Zum anderen enthalten stam-

mesgeschichtlich uralte molekulare Maschinen, die aus RNA und Proteinen bestehen, fast nur Proteine, die ganz oder teilweise unstrukturiert sind, solange sie nicht an ihre Partner-RNAs gebunden haben. Zu diesen alten Molekülkomplexen gehören das Spliceosom (ein Apparat, der in der Zelle bestimmte Abschnitte aus der RNA ausschneidet) und das Ribosom (das Aminosäuren zu Proteinen zusammensetzt).

Auch die Forschungen zum Ursprung des Lebens lassen vermuten, dass unstrukturierte Proteine sehr alt sind. Eine

weit verbreitete These besagt, dass die ersten Organismen auf RNA basierten. Die RNA funktionierte in ihnen sowohl als katalytisches Molekül als auch als Speicher für Erbinformationen, erfüllte also die beiden Funktionen, die in heutigen Zellen die Proteine und die DNA getrennt ausüben. Ein großes Problem dieser hypothetischen »RNA-Welt« besteht darin, dass sich RNA nur sehr wenig effizient in ihre katalytisch aktive Form faltet und oft in inaktiven Konformationen verharrt. Heutige Zellen besitzen so genannte RNA-Chaperone (»Gouvernanten«) – das sind Proteine, die der RNA helfen, sich korrekt zu falten. Andere Proteine stabilisieren die RNA in ihrer aktiven Gestalt. Es erscheint möglich, dass solche Proteine in stammesgeschichtlich früher Zeit entstanden und das Problem der langsamen RNA-Faltung lösten. Weder Chaperone noch stabilisierende Proteine haben vor der Bindung an die RNA eine stabile, geordnete Struktur.

Weitere Unterstützung erfährt die Hypothese von der frühen Evolution unstrukturierter Proteine aus Untersuchungen des genetischen Kodes. Dieses Regelwerk nutzen Zellen, um die in ihren Nukleinsäuren (RNA oder DNA) gespeicherten Erbinformationen in Aminosäureketten zu übersetzen. Viele Forscher nehmen an, dass bestimmte Aminosäuren schon früh während der Evolution im genetischen Code erfasst waren, andere Aminosäuren hingegen erst später aufgenommen wurden. Die großen hydrophoben Aminosäuren, die Proteine zur Faltung veranlassen, kamen wahrscheinlich erst später hinzu, so dass Proteine, die nur aus »frühen« Aminosäuren bestanden, ohne Bindungspartner wohl unstrukturiert blieben. Gemäß diesen Thesen waren die ersten Proteine auf der Erde gänzlich oder zum Teil ungefaltet. Die Aminosäuren, die später hinzukamen, erlaubten es den Proteinen, bestimmte Konformationen einzunehmen und enzymatisch aktive Regionen mit Schlüssel-Schloss-Funktion auszubilden. Das wiederum hatte zur Folge, dass die Proteine allmählich – im Lauf von Jahrmillionen – die RNAs als katalytische Werkzeuge der Zelle verdrängten.

Bedenkt man die zentrale Rolle der Proteine in der Biologie, so verwundert es nicht, dass viele von ihnen an Krankheiten beteiligt sind. Das neue Konzept der intrinsisch unstrukturierten Proteine wird deshalb unsere Sicht darauf, wie Krankheiten entstehen und behandelt werden können, stark beeinflussen. Beispielsweise können unstrukturierte Proteine bereits aus sich heraus zu gesundheitlichen Problemen führen: Produziert eine Zelle sie im Überschuss, können sie große Aggregate bilden, die sich als Plaques ablagern. Die Ansammlung solcher Plaques im Gehirn gilt als wahrscheinliche Ursache schwerer neurodegenerativer Erkrankungen wie Alzheimer, Parkinson und der Chorea Huntington. Es scheint, als müssten unstrukturierte Proteine streng kontrolliert werden, um Schäden im Organismus zu vermeiden. Vor drei Jahren zeigte eine groß angelegte Studie unter der Leitung von M. Madan Babu von der University of Cambridge, dass Zellen von Hefen, Mäusen und Menschen die Produktion von unstrukturierten Proteinen deutlich straffer regulieren als jene von gefalteten Proteinen.

All diese Erkenntnisse könnten auch zu neuen Therapieverfahren führen. Neue Medikamente zielen oft darauf ab, in Protein-Protein-Wechselwirkungen einzugreifen – bisher leider mit wenig Erfolg. Proteine, die mit unstrukturierten Proteinen interagieren, bieten ihren Partnern häufig Andockstellen. Diese lassen sich vielleicht als Angriffspunkte für neue Arzneistoffe nutzen. Moleküle etwa, die die Wechselwirkung zwischen einem bestimmten Tumorsuppressorgen und einem regulierenden Protein unterbinden, haben sich in Tierversuchen als wirksame Krebstherapeutika erwiesen, so dass sie jetzt in klinischen Studien am Menschen erprobt werden. Kriwacki und sein Team versuchen, mit diesem Ansatz auch das Retinoblastom zu behandeln, eine Krebserkrankung des Auges, die vor allem bei Kindern auftritt. Erste Tests an Tieren sind viel versprechend verlaufen. Andere Labors arbeiten an ähnlichen Projekten.

Auf diese Weise erweitern die Proteinforscher ihren Horizont systematisch über das Schlüssel-Schloss-Konzept hinaus. Das eröffnet uns eine neue Sicht auf elementare Lebensvorgänge und darauf, wie das Leben entstanden ist. Und vielleicht hilft es uns eines Tages sogar, Leben zu retten. ~

DIE AUTOREN



A. Keith Dunker (links) arbeitet als Biophysiker an der Indiana School of Medicine. Er leitet dort das Center for Computational Biology and Bioinformatics. **Richard W. Kriwacki** ist Strukturbiologe am St. Jude Children's Research Hospital in

Memphis. 1996 war er – damals am Scripps Research Institute in La Jolla, Kalifornien – daran beteiligt, als Forscher eines der ersten unstrukturierten Proteine entdeckten.

QUELLEN

Dunker, A. K. et al.: Identification and Functions of Usefully Disordered Proteins. In: *Advances in Protein Chemistry* 62, S. 25–49, 2002

Dyson, H.J., Wright, P.E.: Intrinsically Unstructured Proteins and Their Functions. In: *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 6, S. 197–208, 2005

Kriwacki, R.W. et al.: Structural Studies of p21 Waf1/Cip1/Sdi1 in the Free and Cdk2-Bound State: Conformational Disorder Mediates Binding Diversity. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 93, S. 11504–11509, 1996

Tompa, P. et al.: Structural Disorder Throws New Light on Moonlighting. In: *Trends in Biochemical Sciences* 30, S. 484–489, 2005

WEBLINKS

www.disprot.org

Online-Datenbank mit Angaben zu Struktur und Sequenz von unstrukturierten Proteinen und mit wissenschaftlichen Literaturverweisen

www.rcsb.org/pdb

Online-Archiv, das Informationen über makromolekulare Strukturen bereithält: Proteine, Nukleinsäuren und Molekülkomplexe

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1120979

Multiversum in Beweisnot

Viele Kosmologen fasziniert die Idee, es gebe unzählige Paralleluniversen mit jeweils eigenen Naturgesetzen. Doch das Problem ist: Niemand wird je nachprüfen können, ob ein solches Multiversum überhaupt existiert.

Von George F. R. Ellis

Seit einigen Jahren debattieren Kosmologen über eine kühne These: Außer dem expandierenden Universum, das wir wahrnehmen, sollen noch ungezählte weitere Universen existieren. Es gäbe demnach nicht nur einen Kosmos, sondern ein Multiversum. Der amerikanische Physiker Brian Greene bezeichnet diese Vorstellung als »super-kopernikanische Revolution«, da ihr zufolge nicht nur unser Planet einer unter vielen ist, sondern sogar unser gesamtes Universum in kosmischem Maßstab unbedeutend.

Was genau ist das, ein Multiversum? Zunächst einmal hat das Wort mehrere Bedeutungen. Astronomen vermögen bis zu einer Entfernung von rund 42 Milliarden Lichtjahren zu sehen; diese optische Grenze definiert unseren kosmischen Horizont. Es gibt aber keinen Grund, warum das All dort aufhören sollte. Jenseits des Horizonts dürften viele – sogar unendlich viele – Bereiche liegen, die dem für uns sichtbaren Kosmos gleichen. Zwar war die Materie anfänglich in jedem dieser Bereiche anders verteilt, aber in allen gelten dieselben Naturgesetze. Fast alle Experten akzeptieren diesen Typ des

Multiversums, den der amerikanische Kosmologe Max Tegmark »Ebene 1« nennt.

Doch manche Theoretiker gehen weiter. Sie postulieren völlig unterschiedliche Universen mit einer jeweils anderen Physik, mit einer eigenen Geschichte oder gar mit unterschiedlich vielen Raumdimensionen. Die meisten dieser hypothetischen Welten sind lebensfeindlich, doch einige wimmeln von Organismen. Ein Hauptvertreter dieses »Ebene-2«-Multiversums ist der russisch-amerikanische Physiker Alexander Vilenkin. Er entwirft das dramatische Bild einer unendlichen Menge von Universen mit unendlich vielen Personen darin, die Ihren Namen tragen und gerade diesen Artikel lesen.

Derlei Behauptungen sind in vielen Kulturen nichts Neues. Neu ist allein der Anspruch, das Multiversum sei eine wissenschaftliche, also mathematisch strenge und experimentell prüfbar Theorie. Ich bin da skeptisch und glaube nicht, dass die Existenz dieser anderen Universen bewiesen wurde – ja überhaupt beweisbar ist. Indem die Befürworter des Multi-



FOTO: LEVI BROWN

Das astronomische Jenseits

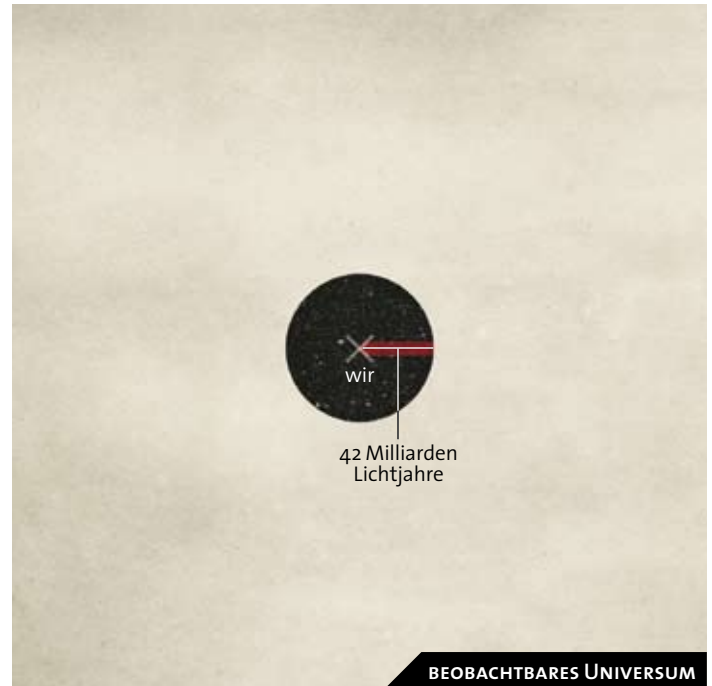
Wenn Astronomen ihre Teleskope auf den Himmel richten, können sie bis zu einer Entfernung von rund 42 Milliarden Lichtjahren sehen. Dieser kosmische Horizont gibt an, wie weit das Licht seit dem Urknall reisen konnte, während sich das Universum zugleich ausdehnte. Unter der plausiblen Annahme, dass der Raum dort nicht einfach aufhört, formulieren die Kosmologen Hypothesen über die Welt jenseits des Horizonts.

DAS EBENE-1-MULTIVERSUM: PLAUSIBEL

Die einfachste Annahme besagt, dass unser Raumvolumen ein repräsentatives Beispiel des Ganzen darstellt. Weit entfernte Außerirdische sehen andere Volumina, die sich aber alle gleichen – abgesehen von zufälligen Unterschieden der Materieverteilung. Insgesamt bilden die sichtbaren und unsichtbaren Gebiete eine einfache Art von Multiversum.

DAS EBENE-2-MULTIVERSUM: FRAGWÜRDIG

Viele Kosmologen gehen weiter und vermuten, dass in genügend großer Entfernung ganz andere Bedingungen herrschen. Unsere Umgebung ist demnach nur eine von vielen Blasen, die in einem ansonsten leeren Hyperraum treiben. In jeder Blase sollen jeweils eigene Naturgesetze gelten. Die anderen Blasen sind prinzipiell nicht direkt beobachtbar. Skeptiker halten diesen Typ des Multiversums für zweifelhaft.



versums unseren Begriff von physikalischer Realität ins Unermessliche erweitern, definieren sie stillschweigend die Bedeutung von Wissenschaft neu.

Über den Horizont hinaus

Die Vertreter eines weiten Multiversumbegriffs machen verschiedene Vorschläge, wie derart viele Universen entstehen könnten und wo sie alle sich aufhalten mögen. Liegen sie weit jenseits unseres Raumgebiets, wie das Modell der chaotischen Inflation von Alan H. Guth und Andrei Linde behauptet (siehe »Das selbstreproduzierende inflationäre Universum« von Andrei Linde, Spektrum der Wissenschaft 1/1995, S. 32)? Existieren sie zu unterschiedlichen Zeiten, wie das Modell des zyklischen Universums von Paul J. Steinhardt und Neil Turok vorsieht (siehe »Die Zeit vor dem Urknall« von Gabriele Veneziano, Spektrum der Wissenschaft 8/2004,

S. 30)? Oder existieren sie, wie der britische Physiker David Deutsch behauptet, sogar im selben Raum wie wir, aber in einem anderen Zweig der quantenmechanischen Wellenfunktion (siehe »Die Quantenphysik der Zeitreise« von David Deutsch und Michael Lockwood, Spektrum der Wissenschaft 11/1994, S. 50)? Vielleicht haben sie überhaupt keinen Ort, sondern sind von unserer Raumzeit völlig abgekoppelt, wie Max Tegmark und Dennis Sciama annehmen (siehe »Paralleluniversen« von Max Tegmark, Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34).

Die am meisten akzeptierte Variante ist die chaotische Inflation, auf die ich mich konzentrieren will, doch gelten meine Anmerkungen im Prinzip auch für die übrigen Vorschläge. Die Idee besagt, dass der Raum insgesamt eine ewig expandierende Leere darstellt, in der Quanteneffekte fortwährend neue Universen hervorbringen. Das Inflationsmodell stammt aus den 1980er Jahren, und Physiker haben es auf Grundlage der Stringtheorie – einer »großen Vereinheitlichung« der Naturkräfte mit Ausnahme der Gravitation – weiterentwickelt. Gemäß der Stringtheorie können die blasenförmig keimenden Universen ganz unterschiedlich aussehen. Jede Blase beginnt demnach nicht nur mit einer zufälligen Materieverteilung, sondern auch mit einem beliebigen Materietyp. Zum Beispiel enthält unser Universum Elektronen und Quarks, die elektromagnetisch wechselwirken; in anderen Universen könnte es ganz andere Teilchen und Kräfte geben – und somit andere physikalische Gesetze. Die Gesamtmenge der zulässigen lokalen Gesetze wird als Stringlandschaft bezeichnet. Laut einigen Interpretationen ist diese Landschaft riesig und erlaubt eine enorme Vielfalt von Universen.

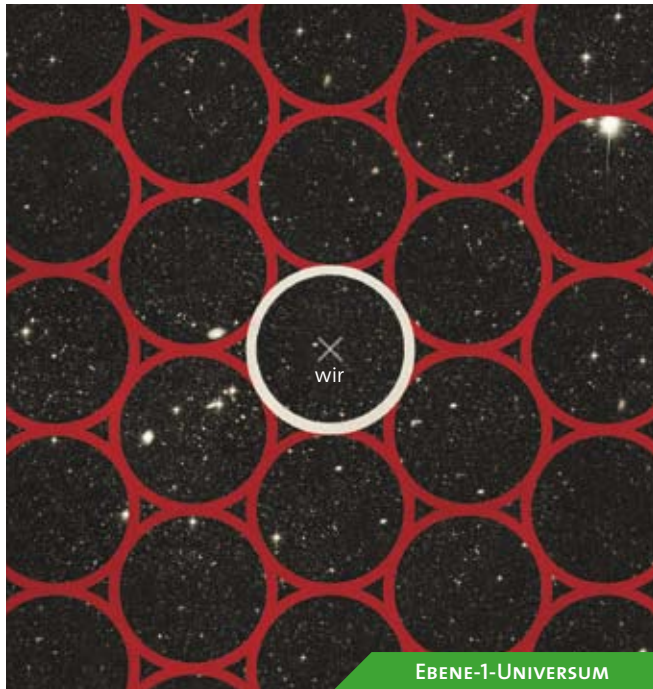
AUF EINEN BLICK

Unsichtbare Parallelwelten

1 Die Idee, es gebe jenseits unseres Weltalls noch **andere Universen**, war bis in die 1990er Jahre allein ein Thema für Science-fiction-Romane. Doch heute behaupten viele Forscher, außerhalb unseres Kosmos lägen unzählige weitere Welten.

2 All diese **Paralleluniversen**, in denen unter Umständen jeweils eigene physikalische Gesetze herrschen sollen, bilden zusammen das hypothetische **Multiversum**.

3 Allerdings wird eine **astronomische Beobachtung** dieser anderen Universen niemals möglich sein. Bestenfalls sprechen **indirekte Argumente** für das Multiversum – doch selbst wenn es existiert, bleiben grundlegende Naturrätsel ungelöst.



ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: CHAD HAGEN

Viele Physiker, insbesondere Befürworter der Stringlandschaft, interessieren sich eigentlich nicht besonders für Paralleluniversen. Einwände gegen den Begriff des Multiversums halten sie für unerheblich. Ihre Theorien stehen und fallen mit der inneren Widerspruchsfreiheit und werden, so hoffen sie, letztlich empirisch bestätigt. Das Multiversum betrachten sie nur als theoretischen Rahmen, während ihnen seine Entstehung ziemlich egal ist – anders als den Kosmologen.

Für diese bildet der kosmische Horizont das Grundproblem jeder Art von Multiversum. Weiter als bis zu diesem Horizont können wir nicht sehen – denn die mit Lichtgeschwindigkeit reisenden Signale hatten seit Beginn des expandierenden Universums keine Zeit, uns aus noch größeren Entfernungen zu erreichen. Sämtliche Paralleluniversen liegen jenseits unseres Horizonts und werden auch mit noch so raffinierter Zukunftstechnik für immer unsichtbar bleiben. Sie sind derart weit entfernt, dass sie niemals den geringsten Einfluss auf unser Universum ausüben können. Darum lässt sich keine Aussage über das Multiversum direkt bestätigen.

Die Anhänger der Vielweltheorie meinen, wir könnten aus den innerhalb des Horizonts gewonnenen Daten in groben Zügen folgern, was an Orten geschieht, die 1000, 10^{100} , $10^{1000000}$ oder unendlich Mal so weit entfernt liegen wie der kosmische Horizont. Das ist eine gewagte Extrapolation. Vielleicht schließt sich das Universum in sehr großem Maßstab, und es gibt da draußen keine Unendlichkeit. Vielleicht hört die gesamte Materie im Universum irgendwo auf, und danach kommt nur noch leerer Raum. Vielleicht enden Raum und Zeit an einer Singularität, die das Universum begrenzt.

Kurzum: Wir wissen einfach nicht, was wirklich der Fall ist, denn wir besitzen über diese Regionen keine Information – und das wird immer so bleiben.

Sieben fragwürdige Argumente

Die meisten Verfechter des Multiversums sind seriöse Wissenschaftler, die sich des Problems völlig bewusst sind; sie meinen aber, wir könnten dennoch fundierte Vermutungen über die Vorgänge dort draußen anstellen. Ihre Argumente lassen sich grob in sieben Klassen einteilen, die samt und sonders problematisch sind.

DER RAUM HAT KEIN ENDE. Kaum jemand bestreitet, dass der Raum sich über unseren kosmischen Horizont hinaus erstreckt und dass jenseits des für uns Sichtbaren viele andere Bereiche liegen. Wenn dieser eingeschränkte Typ von Multiversum existiert, können wir von dem, was wir sehen, auf Regionen außerhalb des Horizonts schließen, wobei die Ungewissheit mit wachsender Entfernung zunimmt. Man kann sich dann leicht in immer größerer Entfernung kompliziertere Variationen ausmalen – etwa eine andere Physik. Doch das Problem mit dieser Extrapolation vom Bekannten zum Unbekannten ist, dass niemand sie zu widerlegen vermag. Wie können Forscher entscheiden, ob ihr Bild einer unbeobachtbaren Raumzeitregion eine vernünftige oder abstruse Extrapolation darstellt? Haben andere Universen abweichende Anfangsverteilungen der Materie, oder gelten dort andere Werte für fundamentale Naturkonstanten, etwa für die Stärke der Kernkräfte? Beides wäre möglich.

DIE PHYSIK SAGT SEPARATE DOMÄNEN VORAUSS. Manche vereinheitlichte Theorien enthalten so genannte Skalarfelder – hypothetische Verwandte des Magnetfelds und anderer

raumfüllender Kraftfelder. Sie sollen die kosmische Inflation antreiben und unendlich viele Universen erzeugen. Die Modelle sind theoretisch gut begründet, aber das Wesen der hypothetischen Felder ist unbekannt: Ihre Existenz wurde noch nicht experimentell bestätigt, niemand hat je ihre mutmaßlichen Eigenschaften gemessen. Vor allem haben die Physiker nicht erklärt, warum die Dynamik dieser Felder in verschiedenen Blasenuniversen zu unterschiedlichen Naturgesetzen führen sollte.

DIE THEORIE, DIE UNENDLICH VIELE UNIVERSEN VORAUSSETZT, WIRD DURCH BEOBSACHTUNGEN BESTÄTIGT. Die kosmische Hintergrundstrahlung enthüllt, wie das Universum am Ende seiner anfänglichen, heißen Expansionsphase aussah. Aus dem räumlichen Verteilungsmuster der Strahlung geht hervor, dass es wirklich einst eine Periode der Inflation gab. Aber nicht alle Arten von Inflation setzen sich ewig fort und erzeugen unendlich viele Blasenuniversen. Aus den Beobachtungen lässt sich nicht auf einen bestimmten Inflationstyp schließen. Einige Kosmologen wie Paul J. Steinhardt meinen sogar, eine ewige Inflation würde nicht zu den tat-

sächlich beobachteten Mustern in der Hintergrundstrahlung führen (siehe »Kosmische Inflation auf dem Prüfstand« von Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 40). Andrei Linde und andere widersprechen. Wer hat Recht? Das hängt davon ab, welche Annahmen man über die Physik des inflationären Felds macht.

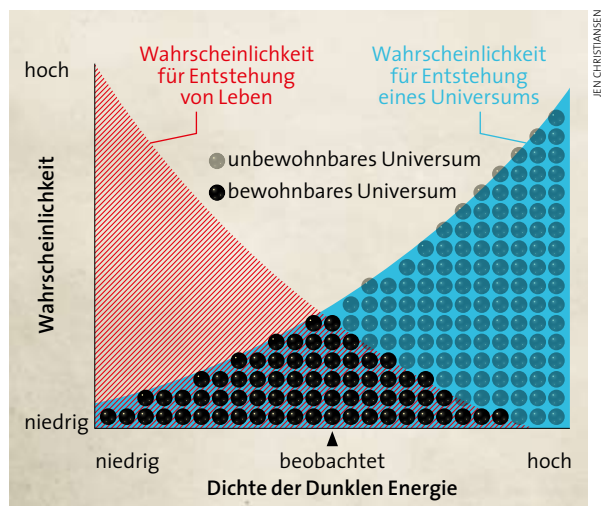
NATURKONSTANTEN SIND FEIN AUF DIE ENTSTEHUNG VON LEBEN ABGESTIMMT. Unser Universum hat die bemerkenswerte Eigenschaft, dass die physikalischen Konstanten just passende Werte haben, um komplexe Strukturen und insbesondere Leben zu ermöglichen. Wie Steven Weinberg, Martin Rees, Leonard Susskind und andere Theoretiker behaupten, liefert ein exotisches Multiversum eine gute Erklärung für diesen scheinbaren Zufall: Wenn in einer genügend großen Menge von Universen alle möglichen Werte vorkommen, müssen gewiss irgendwo lebensfreundliche Bedingungen herrschen. Dieses Argument wurde unter anderem bemüht, um die Dichte der Dunklen Energie zu erklären, von der man annimmt, dass sie die gegenwärtige Expansion des Universums beschleunigt. Ich gebe zu, dass das Multiversum möglicherweise diese Dichte erklärt. Jedenfalls haben wir derzeit keine bessere wissenschaftliche Erklärung – aber wir werden sie nie durch Beobachtungen überprüfen können. Außerdem unterstellen die meisten einschlägigen Analysen, die physikalischen Grundgleichungen seien überall gleich, nur die Konstanten variieren. Doch wenn man das Multiversum ernst nimmt, muss das nicht so sein (siehe »Leben im Multiversum« von Alejandro Jenkins und Gilad Perez, Spektrum der Wissenschaft 5/2010, S. 24).

NATURKONSTANTEN ENTSPRECHEN VORHERSAGEN DES MULTIVERSUMMODELLS. Dieses Argument verfeinert das vorherige, indem angenommen wird, das Universum sei nur gerade so weit auf die Entstehung von Leben abgestimmt wie unbedingt nötig. Die Befürworter ermitteln die Wahrscheinlichkeit für verschiedene Dichtewerte der Dunklen Energie. Je höher der Wert, desto wahrscheinlicher ist er, aber desto lebensfeindlicher verhält sich das Universum. Der Wert, den wir beobachten, sollte genau an der Grenze zur Unbewohnbarkeit liegen, und anscheinend trifft das in der Tat zu (siehe Kasten links). Der Haken ist nur, dass wir nicht mit Wahrscheinlichkeiten argumentieren dürfen, falls es gar kein Multiversum gibt, auf das der Wahrscheinlichkeitsbegriff anwendbar wäre. Das Argument setzt demnach voraus, was es beweisen will; wenn nur ein Universum existiert, gilt es schlicht nicht. Die Wahrscheinlichkeit ist ein Test für die Widerspruchsfreiheit des Multiversummodells, aber kein Existenzbeweis.

DIE STRINGTHEORIE SAGT EINE VIELFALT VON UNIVERSEN VORAUSS. Die Stringtheorie trat mit dem Anspruch an, alles zu erklären, erweckt aber eher den Anschein, in ihr sei alles möglich. In der gegenwärtigen Form besagt sie, dass viele wesentliche Eigenschaften unseres Universums pure Zufälle sind. Wenn es nur ein Universum gibt, erscheinen diese Eigenschaften unerklärlich. Wie sollen wir beispielsweise verstehen, warum die Physik just so beschaffen ist, dass sie

Passt die Dunkle Energie?

Als Indiz für das Multiversum zitieren Befürworter die Dichte der Dunklen Energie, welche gegenwärtig für die beschleunigte Expansion des Universums sorgt. Die ewige Inflation verleiht jedem Paralleluniversum einen zufälligen Dichtewert seiner Dunklen Energie. Nur wenige Universen haben niedrige Werte, die meisten höhere (blaues Gebiet). Doch allzu große Dunkle Energie zerreißt die komplexen Strukturen, die zur Entstehung von Leben nötig sind (rotes Gebiet). Darum sollte in den meisten bewohnbaren Universen eine mittlere Dichte Dunkler Energie herrschen (Spitze des schwarzen Gebiets) – und genau das ist in unserem Universum tatsächlich der Fall. Doch Skeptiker halten dieses Argument für einen Zirkelschluss: Es gilt nur, wenn man von vornherein das Multiversum unterstellt.





Leben ermöglicht? Doch falls das Universum bloß eines unter vielen ist, ergibt das – nach den oben erwähnten Argumenten – sofort Sinn. Nur ist die Stringtheorie weder empirisch bestätigt noch überhaupt vollständig. Erst wenn experimentell bewiesen wäre, dass sie zutrifft, wären ihre theoretischen Vorhersagen ein legitimes Argument für ein Multiversum. Ein solcher Beweis steht bislang aus.

ALLES, WAS GESCHEHEN KANN, GESCHIEHT TATSÄCHLICH.

Um zu erklären, warum die Natur gewissen Gesetzen gehorcht und anderen nicht, haben einige Physiker und Philosophen angenommen, die Natur treffe gar keine Wahl: Alle erdenklichen Gesetze gälten irgendwo. Die Idee wurde teilweise von der Quantenmechanik angeregt, die nach einem denkwürdigen Ausspruch des Theoretikers Murray Gell-Mann besagt, dass alles, was nicht verboten ist, zwangsläufig der Fall ist. Ein Teilchen nimmt alle Wege, die es nehmen kann, und was wir sehen, ist der gewichtete Mittelwert all dieser Möglichkeiten. Vielleicht gilt das Gleiche für das gesamte Universum – und schon landen wir beim Multiversum. Doch Astronomen haben nicht die kleinste Chance, dieses Multiversum von Möglichkeiten zu beobachten. Wir können nicht einmal wissen, von welchen Möglichkeiten die Rede ist. Die Idee ist nur dann sinnvoll, wenn wir ein unbeweisbares Organisationsprinzip voraussetzen, das entscheidet, was erlaubt ist und was nicht – zum Beispiel, dass alle möglichen mathematischen Strukturen in irgendeiner physikalischen Region verwirklicht sein müssen, wie Tegmark meint. Wir haben aber keine Ahnung, welche Arten von Existenz dieses Prinzip zur Folge hat – außer der Tatsache, dass es notwendigerweise die uns umgebende Welt einschließen muss. Auch können wir die Existenz oder das Wesen eines solchen Organisationsprinzips niemals überprüfen. Die Idee mag attraktiv sein, aber ihr angeblicher Bezug zur Wirklichkeit ist pure Spekulation.

Fehlende Indizien

Obwohl die theoretischen Argumente nicht ausreichen, haben Kosmologen mehrere empirische Tests für Paralleluniversen vorgeschlagen. Die kosmische Hintergrundstrahlung birgt vielleicht Spuren von anderen Blasenuniversen, falls unser Universum einst mit einer anderen Blase kollidiert ist,

die aus dem chaotischen Inflationsszenario hervorging. Die Hintergrundstrahlung könnte auch Überbleibsel von Universen enthalten, die vor dem Urknall in einem endlosen Zyklus von Universen existierten. Dies würde uns echte Indizien für andere Universen liefern. Alle Behauptungen, man hätte entsprechende Hinweise gefunden, sind freilich höchst umstritten, und viele der hypothetischen Universen würden keinerlei Spuren hinterlassen. Darum lassen sich nur spezielle Typen von Multiversummodellen auf diese Weise überprüfen.

Ein zweiter Test versucht, winzige Abweichungen einzelner Naturkonstanten aufzuspüren; das würde die Annahme bestätigen, dass die Naturgesetze doch nicht ganz unveränderlich sind. Einige Astronomen behaupten, sie hätten solche Variationen gefunden (siehe »Veränderliche Naturkonstanten« von John D. Barrow und John K. Webb, Spektrum der Wissenschaft 10/2005, S. 78). Doch den meisten Forschern erscheint die Beweislage zweifelhaft.

Ein dritter Test beruht auf der Raumkrümmung des beobachtbaren Universums: Ist es sphärisch (positiv gekrümmt), hyperbolisch (negativ gekrümmt) oder »flach« (nicht gekrümmt)? Im Allgemeinen besagen die Multiversumsszenarien, das Universum sei nicht sphärisch, denn eine Kugel hat nur ein endliches Volumen. Leider ist dieser Test nicht schlüssig. Jenseits unseres Horizonts könnte das Universum eine andere Form annehmen. Außerdem schließen nicht alle Multiversumtheorien eine sphärische Geometrie aus.

Ein besserer Test ist die Topologie des Universums: Ist es ringförmig geschlossen wie ein Torus oder eine Brezel? Dann wäre es endlich groß; das würde die meisten Versionen der Inflation – insbesondere die chaotische – definitiv widerlegen. Eine solche Gestalt würde wiederkehrende Muster am Himmel erzeugen, etwa riesige Kreise in der kosmischen Hintergrundstrahlung (siehe »Ist der Raum endlich?« von Jean-Pierre Luminet et al., Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 50). Astronomen haben vergeblich nach solchen Mustern gesucht, aber das ist noch kein Grund, einem Multiversum den Vorzug zu geben.

Schließlich könnten die Physiker versuchen, einige der Theorien, die ein Multiversum vorhersagen, zu bestätigen

oder zu widerlegen. Vielleicht finden sie empirische Indizien, die gegen die chaotische Inflation sprechen; vielleicht entdecken sie mathematische oder empirische Widersprüche im stringtheoretischen Landschaftsmodell. So etwas würde der Idee des Multiversums einen schweren Schlag versetzen.

Vages Konzept statt definierter Theorie

Alles in allem sind die Argumente für das Multiversum nicht überzeugend. Den Hauptgrund dafür bildet die extreme Schwammigkeit der Idee: Es handelt sich eher um ein vages Konzept als um eine definierte Theorie. Aus dem Mechanismus der ewigen Inflation folgt nicht automatisch, dass in jedem Teil des Multiversums eine andere Physik herrschen muss; dafür soll eine weitere spekulative Theorie herhalten. Zwar lassen sich beide kombinieren, aber das ist nicht zwingend.

Der entscheidende Schritt zur Begründung eines Multiversums ist die Extrapolation vom Bekannten zum Unbekannten, vom Überprüfbareren zum Unprüfbareren. Je nach Wahl der Extrapolation ergeben sich unterschiedliche Resultate. Da Theorien, die mit einem Multiversum operieren, fast alles zu erklären vermögen, kann jede Beobachtung zu irgendeiner Variante der Theorie passen. Die verschiedenen »Beweise« suggerieren eigentlich, dass wir eine theoretische Erklärung an Stelle einer empirischen Prüfung akzeptieren sollen. Doch bisher war Empirie die Grundvoraussetzung jeder wissenschaftlichen Forschung.

Zweifellos ist eine einheitliche Hypothese, die viele Phänomene erklärt, einem Sammelsurium von separaten Ad-hoc-Annahmen vorzuziehen. Dafür wäre man geneigt, sogar die Existenz unbeobachtbarer Paralleluniversen zu akzeptieren. Doch werden im Fall des Multiversums ungeheuer viele – oder gar unendlich viele – unbeobachtbare Gebilde postuliert, nur um ein einziges vorhandenes Universum zu erklären. Das passt schlecht zu der Maxime des englischen Philosophen William von Ockham (1285–1314), dass »Entitäten nicht unnötig vervielfacht werden sollen«.

Schließlich führen die Befürworter des Multiversums ein letztes Argument an: Es gebe keine guten Alternativen. Wissenschaftler fänden den Wildwuchs paralleler Welten vielleicht abstoßend, aber eine bessere Erklärung sei nicht in Sicht. Wer das Multiversum verwerfe, möge gefälligst einen brauchbaren Ersatz vorschlagen. Doch die Suche nach Alternativen hängt davon ab, was wir als Erklärung akzeptieren. Die Physiker hoffen seit jeher, dass die Gültigkeit der Naturgesetze unvermeidlich ist: Die Dinge sind, wie sie sind, weil sie gar nicht anders sein können. Aber anscheinend lässt sich so etwas nicht beweisen. Vielleicht ist das Universum ein bloßes Zufallsprodukt; es ist nun einmal so geworden, wie es ist. Oder vielleicht sollen die Dinge so und nicht anders sein; ihrer Existenz läge dann ein Zweck oder eine Absicht zu Grunde. Das sind aber keine wissenschaftlichen Fragen, sondern metaphysische Spekulationen, die keine physikalische Theorie zu entscheiden vermag – weder für ein einziges Universum noch für ein Multiversum.

Um neue Erkenntnisse zu gewinnen, müssen wir an der Idee festhalten, dass Empirie den Kern der Wissenschaft ausmacht. Ohne eine kausale Verbindung zu den Wesenheiten, die wir vorschlagen, verlieren wir uns in Hirngespinnsten. Diese Verbindung kann durchaus ein wenig indirekt sein. Wenn eine Entität zwar unbeobachtbar, aber absolut notwendig ist für andere, tatsächlich verifizierte Entitäten, kann sie selbst als verifiziert gelten. Aber dann muss das Netzwerk von Erklärungen die Beweislast tragen. Meine kritische Frage an die Befürworter des Multiversums lautet: Könnt ihr beweisen, dass unsichtbare Paralleluniversen nötig sind, um die sichtbare Welt zu erklären? Ist die Verbindung wesentlich und unausweichlich?

Bei aller Skepsis halte ich das Konzept des Multiversums für einen ausgezeichneten Anlass, um über das Wesen der Wissenschaft und den Grund unseres Daseins nachzudenken. Das führt zu neuen, interessanten Erkenntnissen und ist somit ein produktives Forschungsprogramm. Wir sollten den Begriff des Multiversums vorurteilsfrei betrachten, aber nicht voraussetzungslos. Wir begeben uns dabei auf unsicheres Terrain.

Ob Paralleluniversen existieren oder nicht, bleibt unentschieden. Mit dieser Ungewissheit müssen wir leben. Gegen eine philosophische Spekulation auf wissenschaftlicher Grundlage – um nichts anderes handelt es sich beim Multiversum – ist an sich nichts einzuwenden. Nur sollten wir dann das Kind beim Namen nennen. ~

DER AUTOR



George F. R. Ellis ist Kosmologe und emeritierter Mathematikprofessor an der University of Cape Town (Südafrika). Er ist ein führender Experte für Einsteins allgemeine Relativitätstheorie und hat 1975 mit Stephen Hawking das grundlegende Fachbuch »The Large Scale Structure of Space-Time« veröffentlicht.

QUELLEN

- Carr, B. (Hg.):** Universe or Multiverse? Cambridge University Press, Cambridge 2009
- Ellis, G. F. R.:** Issues in the Philosophy of Cosmology. In: Butterfield, J., Earman, J. (Hg.): Philosophy of Physics. Elsevier, Amsterdam 2006
- Greene, B.:** The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos. Knopf, New York 2011
- Kragh, H.:** Higher Speculations: Grand Theories and Failed Revolutions in Physics and Cosmology. Oxford University Press, Oxford 2011

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/article.cfm?id=does-the-multiverse-really-exist

Leserdebate, unter anderem über die Größe des kosmischen Horizonts (in englischer Sprache)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1120982

Für alle, die lesen, um zu handeln.

Wissen ist Macht. Aber eben nur, wenn man damit etwas macht. Deshalb bietet FOCUS eine konzentrierte Berichterstattung, kontroverse, klare Standpunkte prominenter Gastautoren und pointierte Analysen zu Politik, Wirtschaft und Kultur. Kurz: Informationen, mit denen Sie etwas anfangen können, wenn Sie lieber mitentscheiden und mitgestalten, als nur mitzureden.

Entscheiden Sie sich für Relevanz: Lesen Sie den neuen FOCUS.



FOCUS

Eingebildete Farben

Weil unser visuelles System uns gerne weiße Wände vorgaukelt, kommen gelegentlich unerwartete Farben zum Vorschein.

Von H. Joachim Schlichting

»Sie sind doch Physiker, Sie können uns sicher helfen!«, hieß es, als ich jüngst zu Besuch in einem Verlag war. Die Redakteure waren gerade in ein neues Gebäude umgezogen und konfrontierten mich mit einem unerwarteten Problem. Die Bildschirme ihrer Computer wiesen einen schwachen Orangeschimmer auf, der sich einfach nicht beseitigen ließ. Man habe bereits die Techniker kommen lassen, doch die hätten versichert, dass alles in Ordnung sei. Ein Rätsel!

Kurz zuvor war ich vor einem ähnlichen Problem gestanden. Ich hatte nach einer Methode gesucht, Studierenden einen anschaulichen Zugang zu Kegelschnitten zu verschaffen, und dazu eine Kerze in ein Wasserglas gestellt, das ich dann vor einer weißen Wand platzierte. Das Glas war grün gefärbt, damit es das Licht ein wenig dämpfte (Foto rechts). Die kleine Kerzenflamme sandte ihr Licht radial in alle Richtungen aus. Aus diesem Lichtkontinuum schnitt der obere Rand des Glases einen auf der Spitze stehenden Kegel heraus, der von ungefiltertem weißem Licht erfüllt war. Dort, wo dieses auf die Wand traf, hinterließ es eine hyperbelförmige Aufhellung (Grafik rechts). Das restliche Licht, grün gefärbt und stark gedämpft, erreichte die übrige Wand und den Tisch.

Dass die hyperbelförmige Aufhellung von dunkleren und helleren Streifen berandet erscheint, ist leicht einsichtig. Wie eine Sammellinse fokussiert die Krümmung des Glasrands nämlich einen Teil des Lichts und lenkt ihn ein wenig nach unten ab. Dort entstehen helle Streifen. An anderer Stelle fehlt dieses Licht hingegen, so dass dort dunkle Streifen auftauchen. Auch wa-

Dass man alles grünlich sieht, wenn man lange durch ein rotes Glas gesehen, und umgekehrt, rötlich, wenn man lange durch ein grünes gesehen hat, ist ein merkwürdiger Umstand.

Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

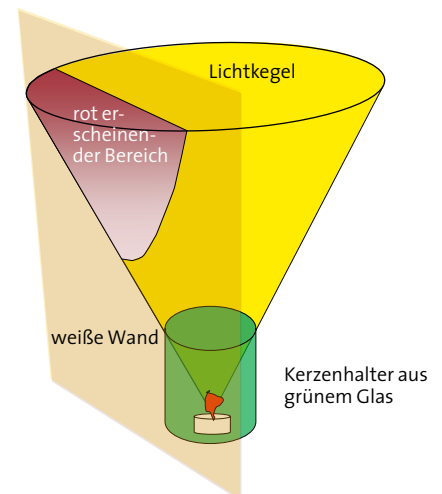
rum die Kerzenflamme weiß erscheint, obwohl sie durch das grüne Glas hindurchstrahlt, ist schnell erklärt. Hier spielt die so genannte Irradiation hinein, auch »Blooming« genannt. Bei Intensitäten, die im Vergleich zur übrigen Szenerie sehr hoch sind, können unsere Augen – ebenso wie Kamerasensoren – Farben nicht mehr unterscheiden.

Einen zufällig hinzukommenden Kollegen fesselte hingegen ein ganz anderes Phänomen. Sollte er wirklich an der Unbestechlichkeit seiner eigenen Augen zweifeln? Denn die »weiße« Wand erschien just in dem Bereich rötlich, der durch reines, ungefiltertes weißes Kerzenlicht ausgeleuchtet wurde! Das war in der Tat überraschend. Er war indessen nicht der Erste, den das Phänomen verblüffte. Ein verwandtes Experiment mit ebenfalls »merkwürdi-

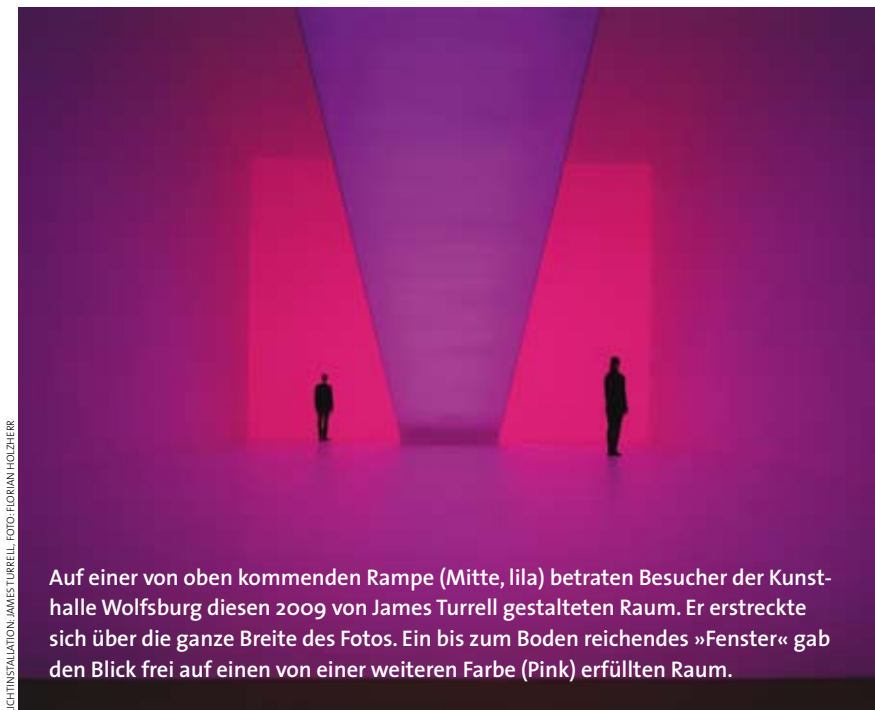
gem« Ergebnis beschrieb schon Georg Christoph Lichtenberg, der erste deutsche Professor für Experimentalphysik, in den oben zitierten Zeilen. Auch Lichtenbergs Zeitgenossen Graf Rumford (1743–1814) beschäftigte der Effekt. 1794 beleuchtete dieser ein zylinderförmiges Objekt mit dem Licht zweier Kerzen, so dass die entstehenden Schatten auf ein weißes Blatt Papier fielen. Als er vor eine der Kerzen einen Gelbfilter hielt, tönnte sich der von der anderen Kerze geworfene Schatten wie erwartet gelblich. Doch der ungefärbte Schatten, den die nun gelb leuchtende Kerze warf, erschien auf einmal bläulich.

Erhellender Blick in die Röhre

Die Verblüffung der Beteiligten ist verständlich, schließlich treten Farben auf, die objektiv gar nicht vorhanden sind.



Wo das Licht der Kerzenflamme direkt auf die weiße Wand fällt, erscheint uns diese überraschenderweise rötlich. Die optische Täuschung zeigt sich auch auf Fotografien, denn Kameras, zumindest wenn sie im Automatikmodus arbeiten, »verschieben« ein allzu grünes Bild ebenfalls in Richtung der Komplementärfarbe Rot. Ursprünglich sollte das Experiment Studierenden anhand der Kontur, die in der Schnittebene von Wand und Lichtkegel entsteht, die Entstehung einer Hyperbel vorführen.



LICHTINSTALLATION JAMES TURRELL. FOTO: FLORIAN HÖLZNER

Auf einer von oben kommenden Rampe (Mitte, lila) betraten Besucher der Kunsthalle Wolfsburg diesen 2009 von James Turrell gestalteten Raum. Er erstreckte sich über die ganze Breite des Fotos. Ein bis zum Boden reichendes »Fenster« gab den Blick frei auf einen von einer weiteren Farbe (Pink) erfüllten Raum.

Rumford überzeugte sich davon mit einem einfachen Hilfsmittel: Er betrachtete den vermeintlich bläulichen Schatten durch ein Rohr – und schon verschwand die Färbung.

Dieses auch als Simultankontrast bekannte Phänomen hat einen physiologischen Hintergrund. Betreten wir etwa ein grün erleuchtetes Zimmer, reduziert sich die Empfindlichkeit der für die Grünwahrnehmung zuständigen Zapfen unserer Augen im Verhältnis zur Empfindlichkeit des Auges für die anderen Farbanteile. Anschaulicher gesagt: Unser visuelles System »möchte« eine vermeintlich weiße Wand als möglichst weiß wahrnehmen. Infolge dieser chromatischen Adaption erscheinen uns die grünen Wände daher weniger grün, als sie »in Wirklichkeit« sind. Noch auffälliger ist der Effekt, wenn man aus dem grün erleuchteten Raum heraus in ein weiteres Zimmer blickt, dessen Wände weiß sind. Auch deren Grünanteile nehmen wir dann vermindert wahr und sehen stattdessen Rot, die Komplementärfarbe von Grün. Komplementärfarben ergänzen sich in der Mischung zu Weiß. Umgekehrt bleibt die Komplementärfarbe übrig, wenn man eine gegebene Farbe von Weiß »abzieht«.

Bei meinem Verlagsbesuch hatte ich all diese Überlegungen zum Glück noch frisch im Gedächtnis. Was also, wenn die Bildschirme in der Redaktion aus demselben Grund orange leuchteten, wie die Wand im Kerzenversuch rot erscheint? Dann müsste die weiße Wand einen Farbstich in der Komplementärfarbe dieses Orangetons haben, also ins Bläuliche changieren. Versuchsweise schlug ich vor, die Fenster zu öffnen – und tatsächlich flog die optische Täuschung sofort auf. Zunächst erschien uns die gesamte Umgebung in unnatürlichen Farben. Doch bald stellten sich unsere Augen um, und wir entdeckten, dass die Scheiben mit einer bläulich schimmernden Beschichtung versehen waren. Sie hatte auch die Zimmerwände bläulich gefärbt. Weil der Blauschimmer jedoch nur schwach war, war unserem visuellen System die Täuschung perfekt gelungen: Die Wände erschienen trotzdem weiß. Nur die Computermonitore hatten plötzlich einen Farbstich ...

Der Simultankontrast besitzt schon in Goethes Farbenlehre, die physikalischen und physiologischen Aspekten einen ähnlich hohen Rang beimisst, große Bedeutung. Auch in der modernen Malerei und Lichtkunst spielt er

eine wichtige Rolle, weil er in verschiedenen Farbumgebungen den Gesamteindruck eines Werks maßgeblich verändern kann. So schuf der Lichtkünstler James Turrell 2009 im Kunstmuseum Wolfsburg einen riesigen begehbaren Raum mit changierender Beleuchtung, der seine Besucher ebenso sehr beeindruckte wie irritierte. Über eine abwärtsführende Rampe betrat man das violett erleuchtete Zimmer und blickte an dessen Ende durch eine große, rechteckige Öffnung in einen weiteren hellen Raum (Foto links). Wie der Simultankontrast den Gesamteindruck beeinflusst, bleibt zwar das Geheimnis des Künstlers. Dass er aber eine erhebliche Rolle spielt, merkt man spätestens, wenn man sich draußen wieder an die alten Farbverhältnisse gewöhnen muss.

Mit ein wenig Glück erlebt man den Effekt übrigens auch ohne experimentelle Vorkehrungen. Wer bei Mondlicht an einer gelb leuchtenden Straßenlaterne vorübergeht, wird entdecken, dass der von der Laterne hervorgerufene eigene Schatten leicht ins Bläuliche changiert. Gelegentlich reicht es sogar, sich ans Fenster zu stellen. Denn der aufmerksame Beobachter wird schnell bemerken: Schon wenn der Mond mit dem Licht einer Glühbirne konkurriert, darf man seinen eigenen Augen nicht mehr vorbehaltlos trauen. ~

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.

QUELLE

Schlichting, H. J.: Lichtkegel und Schattenhyperbeln. In: MNU 56/6, S. 348–350, 2003

WEBLINK

www.youtube.com/watch?v=QWeklcZaKns
Markus Brüderlin führt durch James Turrells im Artikel vorgestelltes Werk.

Falltür, Jo-Jo und Billard

Kann etwas schneller fallen als im freien Fall, wenn nichts als die Gravitation wirkt? Die Antwort ist »Ja« – und die Umwandlung von Translations- und Rotationsenergie bietet noch andere Überraschungen.

VON NORBERT TREITZ

Heben Sie eine Falltür um ungefähr 30 Grad an und lassen Sie sie los. Ersatzweise können Sie eine Latte oder einen Besenstiel an einem Ende lüpfen und fallen lassen, während das andere Ende auf dem Boden ruht – oder ein bisschen zur Seite rutscht, was den Effekt nicht sonderlich beeinträchtigt. Kommt das obere Ende früher oder später am Boden an als eine kleine Kugel (Punktmasse), die man zur gleichen Zeit aus der gleichen Höhe fallen lässt?

Da die Sache sehr schnell abläuft, wäre eine Zeitlupenkamera geeignet, um Klarheit zu schaffen. Aber wir wollen unser Experiment möglichst »freihändig«, das heißt mit Hausmitteln, durchführen. Daher benutzen wir zur Wahrheitsfindung einen Trick: Wir legen zu Beginn eine Kugel in einen kleinen Napf auf der Oberseite der Latte, nahe dem äußeren Ende – und finden sie nach dem Fall in einem zweiten Napf wieder, der etwas näher zur Drehachse angebracht ist (Bild unten)! Da sie nur von oben dort hineingefallen sein kann, beweist das, dass sie etwas später unten angekommen ist.

Vielleicht haben Sie aus den Zeiten der Analogfotografie noch ein Plastik-

döschen von einem Kleinbildfilm übrig. Dessen Deckel und das verkürzte Unterteil geben hervorragende Näpfe ab. Sie müssen nur den Zielpf mit Watte oder einem anderen weichen Material auskleiden, damit die Kugel nach der Landung nicht gleich wieder heraushüpft.

Bei dem Experiment spielt der Startwinkel eine entscheidende Rolle. Ein Wert von rund 30 Grad gegen die Waagerechte erweist sich als optimal in dem Sinn, dass die Höhe der Kugel über dem Tisch zu dem Zeitpunkt, in dem die Latte aufschlägt, am größten ist.

Man kann die Latte auch wie eine Falltür mit einem Scharnier am Tisch befestigen. Aber das beeinträchtigt deutlich den Charme des beinahe Freihändigen.

Wo ist der Magnet versteckt?

Wie kann überhaupt die Schwerkraft etwas mit mehr als der Fallbeschleunigung g bewegen? Ein Zuschauer fragte mich einmal halb im Scherz, wo denn nun der versteckte Magnet sei.

Nein – es geht alles mit rechten Dingen zu. Denken wir uns die Latte aus einzelnen Klötzen bestehend, die vor dem Start gegeneinandergedrückt, aber dann losgelassen werden: Dann fällt jeder einzelne Klotz unbeeinflusst von den anderen mit gewöhnlicher Fallbeschleunigung. Da aber die Klötze in der Latte miteinander verbunden sind, fallen die inneren (unteren) langsamer und die äußeren (oberen) schneller als im unverbundenen, »freien« Fall. Die Verbindungen transportieren also Energie von innen nach außen; das geht zwangsläufig damit einher, dass eine Kraft auf sie wirkt. Diese Kraft kann die Verbindungen auch überfordern, zum Beispiel wenn diese aus Mörtel beste-

hen wie bei einem Schornstein, den man zum Abriss umstürzen lässt (Bild rechts).

In manchen Erklärungen des Versuchs wird behauptet, der Schwerpunkt falle mit g . Das verträgt sich aber nicht mit der Energiebilanz, denn nur wenn die Latte völlig frei fällt, also ohne Unterstützung – und damit Gegenkraft – vom Boden, setzt auch jedes ihrer Volumenelemente die dem Schwerefeld entnommene Höhenenergie in Bewegungsenergie um, nicht anders als bei der kleinen Kugel. Bei der Latte muss aber dieselbe Höhenenergie zusätzlich eine beschleunigte Rotation finanzieren. Also kann der gleiche Abstieg im Schwerefeld nur eine kleinere vertikale Beschleunigung »bezahlen«. Unsere Simulationen zeigen, dass sich bei hinreichend kleinen Startwinkeln das äußere Ende kurz vor dem Aufschlag mit maximal anderthalbfacher Fallbeschleunigung bewegt. Der Schwerpunkt hat genau die halbe Beschleunigung, in diesem Fall also $(3/4)g$.

Eigentlich ist unsere Falltür ein Pendel, nämlich ein starres Objekt, das an einem Punkt drehbar befestigt ist. Man bezeichnet sie traditionell als »physikalisches« Pendel, weil es nicht ganz so stark idealisiert ist wie das »mathematische«, das nur aus einer Punktmasse und einem masselosen starren Stab besteht. Dieses Pendel wird üblicherweise in der Nähe der stabilen Gleichgewichtslage betrieben und ist dann eine gute Näherung für einen harmonischen Oszillator. Wir haben es aber mit Auslenkungen von mehr als 90 Grad gegen die Gleichgewichtslage zu tun, und da ist die harmonische Näherung nicht hilfreich.

Für eine Rotationsbewegung wäre das klassische Gesetz »Kraft gleich



Im Lattenfallversuch ist die Kugel kurz davor, in den Zielpf zu fallen. Das Drei-Sekunden-Video, aus dem dieses Bild stammt, ist online unter www.spektrum.de/artikel/1121017 zu finden.



MIT FOTOS VON BURCHARD KREMER, ROBERT ZELLER, OMBIH & CO KG/ABBRUCH-BAGGERBETRIEB, OFFENBACH

Gemauerte Schornsteine brechen beim Umfallen meistens so durch, dass die Innenseite des Knicks nach oben zeigt.

Masse mal Beschleunigung« auf jeden Punkt der Latte einzeln anzuwenden, mit einer zusätzlichen Bedingung: Der Weg jedes dieser Punkte ist auf eine Kreisbahn eingeschränkt, weswegen von der Beschleunigung nur die Komponente wirksam ist, die tangential zur Kreisbahn liegt. Das ergibt einen Faktor $\cos \phi$, wobei ϕ der Winkel der Latte gegen die Horizontale ist. Man addiert gewissermaßen – korrekt ausgedrückt, man integriert – die Kräfte über alle

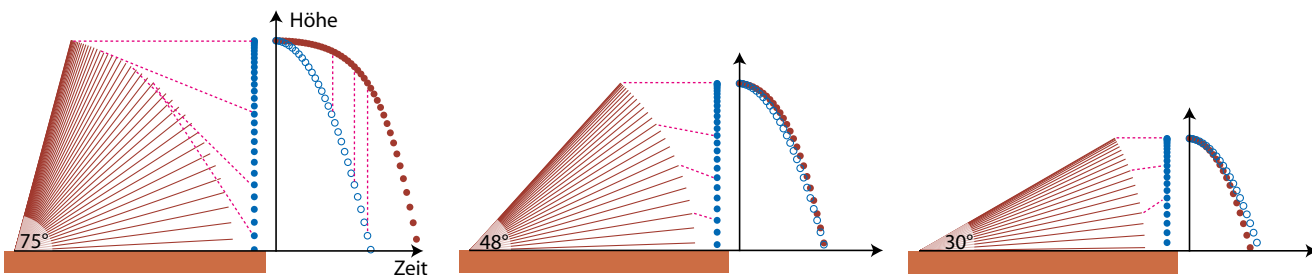
Punkte der Latte auf und erhält das Gesetz »Drehmoment gleich Trägheitsmoment mal Winkelbeschleunigung«. Dabei sind sowohl das Drehmoment M als auch das Trägheitsmoment J Integrale:

$$M = \frac{mg}{L} \cos \phi \int_0^L r dr, \quad J = \frac{m}{L} \int_0^L r^2 dr;$$

L bezeichnet die Länge der Latte, deren Drehpunkt im Nullpunkt liegt, und m

ihre Masse, die wir als gleichmäßig (homogen) verteilt annehmen dürfen. Beide Integrale kann man ausrechnen. Es ergibt sich $M = mg \cos \phi L/2$ (das Drehmoment ist vom Winkel abhängig) und $J = mL^2/3$. Wenn es um das Drehmoment geht, kann man sich die ganze Masse im Schwerpunkt vereinigt denken, nicht aber beim Trägheitsmoment!

Der Unterschied zwischen $1/2$ und $1/3$ ist entscheidend für das erstaun-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, MACH-NOBERT TRETZ

In dieser Computersimulation wird die Latte (braun) auf 75 Grad (links), 48 Grad (Mitte) und 30 Grad (rechts) gegen die Horizontale angehoben und losgelassen. Gleichzeitig mit der Latte beginnt eine Kugel (blau) von der Höhe des oberen Endes der Latte zu fallen. Für große Winkel eilt die Kugel der Latte voraus, bei 48 Grad holt die Latte die Kugel genau in dem Moment ein, in dem beide auf dem Boden aufschlagen. Bei 30 Grad ist die Latte von Anfang an schneller als die Kugel. Gestrichelte rote Linien verbinden gleichzeitig eingenommene Positionen.

liche Verhalten der Latte. Wäre ihre Masse nicht homogen verteilt, sondern zum Beispiel an einem ihrer Enden konzentriert, wäre das Ergebnis weniger spektakulär. Eine schwere punktförmige Masse am oberen Ende einer masselosen Latte würde die Fallbeschleunigung nicht übertreffen.

Aus dem Kraftgesetz für die Rotationsbewegung kann man eine Bewegungsgleichung (eine gewöhnliche Differenzialgleichung) für den Winkel ϕ herleiten und auch lösen. Da die Bewegung des physikalischen Pendels früher für die Ganggenauigkeit der Uhren von entscheidender Bedeutung war, hat man eigens für deren Beschreibung eine neue Funktionenklasse bereitgestellt, die »elliptischen Integrale«. Das kann man einfacher und nachvollziehbarer haben, indem man eine Iteration programmiert: Man rechnet alle Größen nur zu bestimmten Zeitpunkten aus und unterstellt, dass sie in den kurzen Zeitintervallen dazwischen unverändert bleiben (Bild S. 47; siehe auch die »Physikalischen Unterhaltungen« vom Mai 2005). Ein entsprechendes Programm in TurboPascal und mehrere damit produzierte Kurzfilme sind über www.spektrum.de/artikel/1121017 verfügbar.

Jakob Steiner und das rollende Spielzeug

Der Normalmensch nennt es Jo-Jo, der Experimentalphysiker im Anfängerpraktikum Maxwell-Fallrad: ein – meistens kreisrundes – Objekt, das an einem Faden oder zwei parallelen Fäden abrollt. Dabei bleiben seine Masse m , sein Trägheitsmoment J (bezüglich seiner hier waagrecht bleibenden Achse) und sein Abrollradius r (Radius der Achse plus halbe Schnurdicke) konstant.

Der Abrollradius ist typischerweise viel kleiner als der Radius des ganzen Jo-Jos, muss es aber nicht sein: Man kann auch einen Zylinder auf seinem Außenradius ablaufen lassen. Dabei kommt es auf die Massenverteilung im Inneren des Zylinders an. Im theoretischen Extremfall hat der Zylinder gar keine Masse außer in seiner Achse, sozusagen ein schwerer Draht in einem

Super-Styropor-Zylinder. Ihn in Rotation zu versetzen, kostet gar keine Energie. Deswegen rollt er so ab, dass sein Schwerpunkt mit normaler Fallbeschleunigung absteigt, wobei der Faden unbelastet ist.

Ein eher realistischer Spezialfall ist die Mantelfläche eines Zylinders, wohlfeil anzunähern durch eine leere Konservendose, deren Boden- und Deckelfläche man entfernt. Hat sie den Radius r und die Masse m , so ist ihr Trägheitsmoment bezüglich ihrer geometrischen Achse mr^2 , denn alle ihre Teile haben den Abstand r von dieser. Bezüglich der jeweils augenblicklichen Drehachse, an der die Fäden tangential anliegen, ist es aber mr^2 mehr, also insgesamt $2mr^2$. Das folgt aus dem Satz von Steiner. Sein Schöpfer ist derselbe Jakob Steiner (1796–1863), den wir im März 2010 in dieser Rubrik als den Entdecker eines besonderen Punkts im Dreieck kennen gelernt haben. Ein massiver Zylinder hat für seine geometrische Achse $mr^2/2$, für die dazu parallele Achse durch den Rand aber ebenfalls mr^2 mehr, also $(3/2)mr^2$.

Nun betrachten wir ein Objekt mit beliebigen Werten von Abrollradius r , Masse m und Trägheitsmoment J_0 (bezüglich der Achse durch den Schwerpunkt) beziehungsweise $J = J_0 + mr^2$ (bezüglich der aktuellen Rotationsachse, nach dem Satz von Steiner). Seine Gewichtskraft mg liefert ein Drehmoment $M = rmg$ und damit die Winkelbeschleunigung $\beta = M/J = (rmg)/(J_0 + mr^2)$. Der Schwerpunkt steigt dabei mit der Beschleunigung $a = \beta/r$ ab. Bei verschwindend kleinem J_0 (Super-Styropor mit Drahtachse) finden wir einfach $a = g$; bei allen positiven Werten von J_0 (negative gibt es nicht) ist der Betrag der Beschleunigung kleiner.

Nun stellen wir uns ein Rad vor, bei dem die radiale Massenverteilung wie bei der um eins ihrer Enden drehbaren Latte ist. Das ist keineswegs eine gleichmäßige Scheibe! Sie ist in der Mitte dicker, in der Achse sogar streng genommen unendlich dick. Jedenfalls hat sie $J_0 = mr^2/3$. Das gesamte J ist $(4/3)mr^2$, und die Beschleunigung, mit welcher der Schwerpunkt absteigt, ist $3g/4$.

Über die Massenverteilung unserer rotierenden Objekte müssen wir uns keine detaillierten Gedanken machen. Es genügt, die dimensionslose Größe $f = J/(mr^2)$ zu kennen, und ihre Verwendung vereinfacht die Formeln erheblich. Nennen wir f den »Formfaktor«. Für den idealisierten Hohlzylinder, dessen gesamte Masse sich auf dem unendlich dünnen (Konservendosen-)Mantel konzentriert, ist $f=1$, für die Latte gilt $f=1/3$. Aus $J/J_0 = 1+f$ folgt für die Beschleunigung $a = g/(1+f)$, und der Faden wird nur mit der Kraft $m(g-a) = mg(1-1/(1+f))$ belastet.

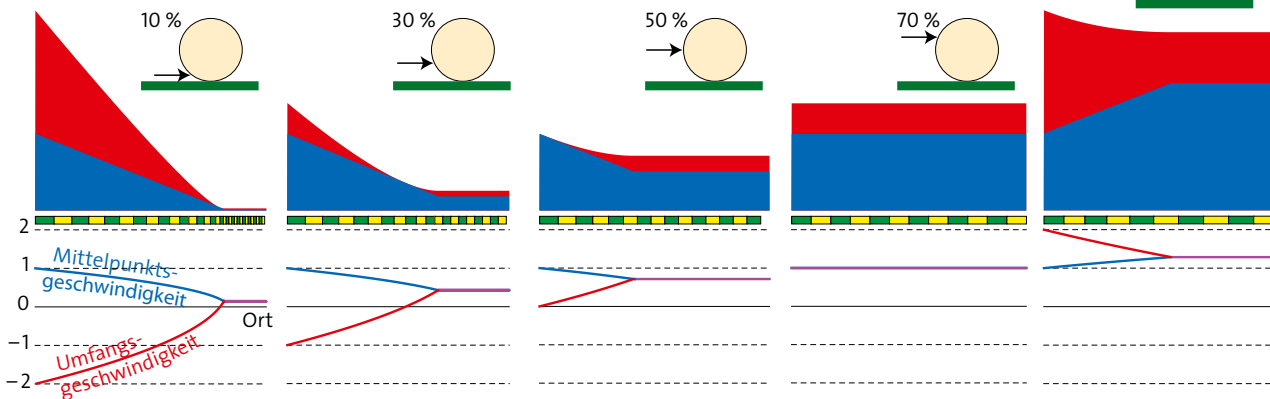
Hängt man ein ablaufendes Jo-Jo mit dem Faden an eine Waage, so zeigt diese also etwas weniger an als das Gewicht des Jo-Jos. Was ist aber, wenn es aufwärtsrollt? Wie beim senkrechten Wurf ist die Beschleunigung bei Auf- und Abwärtsbewegung gleichermaßen nach unten gerichtet, und die Waage zeigt dauernd das verminderte Gewicht an, auch wenn das Jo-Jo im oberen Scheitelpunkt zum Stillstand kommt und das Vorzeichen der Winkel- wie der Translationsgeschwindigkeit wechselt. Diese Umkehr spürt man nicht, wenn man ein aufwärtsrollendes Jo-Jo am Faden hält und nicht hinschaut.

Durch den unteren Scheitelpunkt läuft es dagegen mit voller Drehzahl, wechselt aber die Seite der Achse, auf der gewickelt wird. Es geht dann ein kräftiger Ruck durch den Faden, und die Waage zeigt diesen als eine kurzzeitige starke Erhöhung des Gewichts an. Im Zeitmittel zeigt sie das Gleiche an wie in Ruhe – nicht anders, als wenn man auf einer Personenwaage hüpfte: Dabei gibt es sogar relativ lange Zeiten mit der Anzeige null.

Auch auf dem Billardtisch bereitet die Umwandlung zwischen Transla-

	Trägheitsmoment bezüglich Achse durch	
	die Mitte: J_0	den Rand: $J_0 + mr^2$
Vollzylinder	$\frac{1}{2} mr^2$	$\frac{3}{2} mr^2$
Hohlzylinder	$\frac{2}{3} mr^2$	$\frac{4}{3} mr^2$
Vollkugel	$\frac{2}{5} mr^2$	$\frac{7}{5} mr^2$
Hohlkugel	$\frac{2}{3} mr^2$	$\frac{5}{3} mr^2$

Rollen und Gleiten der Billardkugel



Eine Billardkugel, waagrecht in verschiedenen Höhen (ausgedrückt in Prozent des Kugeldurchmessers) mit jeweils demselben Vorwärtsimpuls angestoßen, setzt sich zunächst mit einer Mischung aus Gleiten und Rollen in Bewegung. Durch Reibung an der Unterlage geht diese Bewegung in gleitfreie Rollen über: Mittelpunkts- und Umfangsgeschwindigkeit werden gleich (blaue und rote Kurve vereinigen sich zum violetten Strich). Alle Größen sind nicht über der Zeit, sondern über dem Weg aufgetragen; jedes gelbe oder grüne Rechteck im »Zeitmaßstab« steht für die gleiche Zeitspanne. Die Translations-

energie nimmt linear mit dem Weg zu oder ab, weil die Reibungskraft konstant ist.

Bei einem sehr tiefen Stoß (links) dreht die Kugel zunächst rückwärts durch und rollt am Ende sehr langsam. Auch der zentrale Stoß (Mitte) ist insofern ein Tiefstoß, als er zu Gunsten des Rollens langsamer wird. Bei 70 Prozent des Durchmessers rollt die Kugel von Anfang an, ohne zu gleiten; beim extremen Hochstoß (rechts) dreht sich die Kugel anfangs zu schnell, nimmt dann Fahrt auf und verlangsamt dabei die Drehung, bis sie das gleitfreie Rollen erreicht.

tions- und Rotationsenergie einige Überraschungen.

Eine Billardkugel, die mit waagrechttem und auf den Kugelmittelpunkt gerichtetem Queue angestoßen wird, hat zunächst einmal keinen Grund, sich zu drehen. Sie rutscht in Stoßrichtung geradeaus, verlagert dann aber wegen der Reibung auf dem Tisch einen Teil ihrer Bewegungsenergie in eine Rollbewegung. Deren Orientierung wollen wir »vorwärts« nennen; wir denken dabei an einen Menschen, der beim Laufen stolpert und daraufhin einen Purzelbaum schlägt. Andere Effekte wie Luft- und Rollreibung sollen hier unbeachtet bleiben; sie machen die Sache zwar komplizierter, aber nicht wirklich interessanter.

Wenn man mit dem Queue dezentral stößt, also am Mittelpunkt der Kugel vorbeizieht, gibt man ihr zugleich mit einem gewöhnlichen Impuls noch einen Drehimpuls. Der beeinflusst den Lauf der Kugel auch noch nach dem Stoß auf Grund der Gleitreibung auf dem Tisch: Billardspieler nennen das Effet. Und zwar kann die Kugel einen

gekrümmten Weg laufen, wenn der Stoß seitwärts versetzt ist. Ist er nach unten versetzt, nimmt die anfängliche Vorwärtsbewegung mehr oder weniger stark an Tempo ab, während die Kugel vorwärtszurollen beginnt. Beim Hochstoß dagegen wandert Energie aus der Rotation in die Vorwärtsbewegung. In diesem Fall dreht sich die Kugel also zunächst zu schnell, beim Tiefstoß zu langsam oder gar in die falsche Richtung, verglichen mit dem nicht gleitenden Rollen, das sich danach einstellt (Kasten oben).

In welcher Höhe muss man stoßen, damit die Kugel von Anfang an rollt, ohne zu gleiten? Der halbe Durchmesser (entsprechend dem zentralen Stoß) kann es nicht sein, denn dabei gleitet sie ja, ohne zu rollen, wie oben erwähnt.

Wieder hilft die Berechnung der Trägheitsmomente (Tabelle links unten). Da für eine Vollkugel das Trägheitsmoment $J_0 = (2/5)mr^2$ ist, ergibt sich eine Stoßhöhe von 70 Prozent des Kugeldurchmessers, bei nach wie vor waagrechttem Stoß. \curvearrowright

DER AUTOR



Norbert Treitz ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

QUELLE

Treitz, N.: Physik in bewegten Bildern (CD). In: Brücke zur Physik. Harri Deutsch, Frankfurt am Main 2003

LITERATURTIPPS

Kuhn, W. et al.: Handbuch der experimentellen Physik Sekundarbereich II, Band 1: Mechanik. Aulis Deubner, Köln 2006

Beiträge von Norbert Treitz zur fallenden Latte und allgemein zu beschleunigten Rotationen

Sommerfeld, A.: Vorlesungen über Theoretische Physik, Band 1: Mechanik. Nachdruck der 8. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt am Main 1994
Mehr über die Mechanik des Billardstoßes

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121017

Das Jahrhundert der Hundertjährigen

Heute sterben die Menschen im Durchschnitt zehn Jahre später als noch vor 40 Jahren – und zwar nicht, weil ihr körperlicher Verfall sich über eine längere Zeit hinzöge, sondern weil sie bei besserer Gesundheit alt werden.

Von James W. Vaupel

Sofern nicht revolutionäre wissenschaftliche Erfolge gelingen, werden die Menschen auch weiterhin altern müssen. Doch wir stehen diesem Prozess keineswegs machtlos gegenüber. Unsere durchschnittliche Lebensdauer hat bereits beträchtlich zugenommen, und ein Ende der Entwicklung ist nicht abzusehen. Die jahrtausendealte Vorstellung, dem Menschen sei eine unveränderliche natürliche Lebensspanne beschieden, gerät ins Wanken. Wahrscheinlich wird den heute lebenden jüngeren Menschen ein sehr langes Leben beschieden sein. Sollte sich der Trend der beiden letzten Jahrhunderte fortsetzen, dann werden viele der seit dem Jahr 2000 geborenen Kinder ihren 100. Geburtstag feiern.

Zwar riet der amerikanische Mediziner und Schriftsteller Oliver Wendell Holmes (1809–1894) allen, die alt werden wollen, sich »per Anzeige um ein Paar Eltern zu bemühen, die aus einer langlebigen Familie stammen«, doch tatsächlich hängt die Lebensdauer eines Menschen nur in geringem Maß von genetischen Faktoren ab. Vielmehr sind es die me-

dizinischen Fortschritte, die Verbesserungen des Gesundheitswesens, höherer Lebensstandard, bessere Bildung sowie gesündere Ernährungs- und Lebensweisen, die uns immer älter werden lassen. Allenfalls für die Zukunft könnten Fortschritte in der Genetik und der Grundlagenforschung – an Menschen und anderen Lebewesen – hilfreich sein.

Wie viele sterben im nächsten Jahr?

Es ist naturgemäß schwierig, die Lebenserwartung eines Menschen zu bestimmen. Exakte Daten hat man nur von denen, die bereits gestorben sind. Von ihnen auf die heute Lebenden zu schließen, erscheint gerade in den gegenwärtigen Zeiten rapiden Wandels problematisch. Und selbst die Sterbezahlen aus den Einwohnerstatistiken reichen häufig nicht weit genug in die Vergangenheit – von speziellen Populationen wie mormonischen Hohen Priestern abgesehen.

Die bei Weitem am verlässlichsten zu bestimmende Maßzahl für die Lebenserwartung ist die Mortalität. Sie gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für einen Menschen eines bestimmten Alters ist, im nächsten Jahr zu sterben.

Der erste schlüssige Nachweis, dass die Menschen immer später sterben, stammt aus einer Analyse schwedischer Sterblichkeitsdaten. Schweden war ein Wegbereiter der systematischen Datensammlung über Sterbefälle und verfügt seit den 1750er Jahren über ein gutes und seit 1861 über ein nahezu perfektes landesweites Erfassungssystem.

Anhand dieser Daten ließ sich ermitteln, ab welchem Alter die weitere Lebenserwartung auf zehn oder fünf Jahre fiel und wie sich dieses Stichdatum X_{10} beziehungsweise X_5 im Lauf der Zeit veränderte (Kasten S. 55). Die Untersuchungen ergaben, dass die Mortalität bei den Angehörigen hoher Altersgruppen gesunken ist und sich der Todeszeitpunkt deutlich nach hinten verschoben hat. Studien in anderen Ländern haben diesen Trend bestätigt.

Das Ergebnis überraschte Demografen und Versicherungsmathematiker gleichermaßen. Die meisten dieser

AUF EINEN BLICK

GESUND IM ALTER

1 Die **Lebenserwartung** der Menschen in den Industrieländern ist in jedem der letzten Jahrzehnte um 2,5 Jahre gestiegen. Alles spricht dafür, dass dieser Trend sich fortsetzt. Dann werden von den heute geborenen Kindern die meisten ihren 100. Geburtstag feiern können.

2 Der **körperliche und geistige Verfall** zieht sich jedoch nicht über eine längere Zeitspanne als früher hin. Vielmehr treten die Menschen dank hohem Lebensstandard und guter medizinischer Versorgung gesünder ins Greisenalter ein.

3 Mit der Verlängerung der durchschnittlichen Lebensspanne wächst auch die Gesamtmenge an Arbeit, die ein Mensch in seinem Leben zu leisten hat. **Neue Arbeitszeitmodelle** werden nötig, und eine längere Lebensarbeitszeit schafft vielleicht Raum für eine kürzere Wochenarbeitszeit.



FOTO: MATEUSZ ZAGORSKI

Dank gesicherter Lebensumstände und guter medizinischer Versorgung erfreuen sich heutige Senioren meist noch lange guter Gesundheit.

Fachleute, deren täglich Brot die Vorhersage von Sterblichkeitstrends ist, waren überzeugt, dass sich die menschliche Lebenserwartung einer festen Obergrenze näherte. Sie analysierten umfangreiches Datenmaterial zur Entwicklung der Sterbeziffern. Dabei stellten sie zwar fest, dass die Sterberaten sanken, ließen aber die Zahlen jenseits der 85 Jahre außer Acht. Sie konnten sich derartige Fortschritte schlichtweg nicht vorstellen.

Insbesondere vertraten die pessimistischen Forscher die weit verbreitete Ansicht, dass es im hohen Alter nur eine Todesursache gebe: das hohe Alter – und dagegen sei kein Kraut

gewachsen. Jede Spezies habe eine für sie typische maximale Lebensspanne, eine Vorstellung, die sich bis auf den antiken Denker Aristoteles und seine Unterscheidung zwischen vorzeitigem und altersbedingtem Tod zurückführen lässt. Andere Gelehrte hingegen – vom griechisch-römischen Arzt Galen im späten 2. Jahrhundert n. Chr. über den Renaissance-denker Luigi Cornaro (1467–1565), den fast 100-jährig gestorbenen Verfasser eines Traktats »Vom mäßigen Leben und der Kunst, ein hohes Alter zu erreichen«, bis zu Zeitgenossen – waren und sind der Überzeugung, man könne die Lebensdauer durch eine eingeschränkte Nahrungszufuhr

Wie altert eine Bevölkerung?

Eine heterogene Bevölkerung setzt sich aus einzelnen Untergruppen mit verschiedenem Sterbeverhalten zusammen, die unterschiedliche Alternsmuster und Sterberaten aufweisen.

Zur Verdeutlichung zwei der Darstellung halber überzeichnete hypothetische Szenarien einer Kohorte von Menschen desselben Geburtsjahrgangs: Entweder altern alle mit konstanter Geschwindigkeit, aber verschiedene Untergruppen haben unterschiedliche Sterberaten (linke Grafik); oder die Untergruppen unterscheiden sich nicht nur in den Sterberaten im Alter von 80 Jahren, sondern auch in deren Veränderung mit zunehmendem Alter (rechte Grafik).

»Altern« bezeichnet hier ausschließlich den Anstieg der Mortalität mit zunehmendem Alter. »Mortalität« ist die Wahrscheinlichkeit für einen Menschen eines bestimmten Alters, im nächsten Jahr zu sterben.

Die Angehörigen der Untergruppen im linken Szenario haben unterschiedliche Mortalitäten im Alter von 80 Jahren; diese steigen jedoch für jede Untergruppe um denselben Faktor pro Jahr. Der exponentielle Anstieg erscheint im (logarithmischen) Dia-

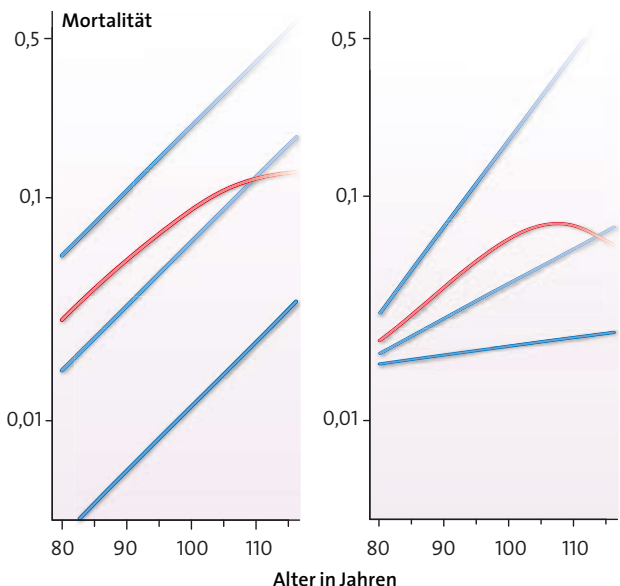
gramm als Gerade (blaue Linien). Da die gebrechlichste Untergruppe als erste ausstirbt (angedeutet durch das frühe Verblasen der obersten blauen Linie), bestimmen zunehmend die »rüstigen« Teile der Bevölkerung (mittlere und untere blaue Linie) das Bild. Im Endeffekt kann sich die Sterblichkeit der Gesamtbevölkerung (rote Linie) auf einem konstanten Niveau einpendeln.

Daran ändert sich nichts Wesentliches, wenn die Bevölkerung nicht aus klar unterscheidbaren Teilgruppen, sondern (eher der Realität entsprechend) aus einem Kontinuum mit einer gewissen Verteilung der Mortalität im Alter von 80 Jahren besteht.

Im rechten Szenario hat die gebrechlichste Teilgruppe nicht nur die höchste Sterbewahrscheinlichkeit mit 80 (wenngleich in dieser Beziehung die Unterschiede geringer sind als im linken Szenario), sondern altert auch wesentlich schneller. In diesem Fall tritt der Effekt, dass die Mortalität der Gesamtbevölkerung langsamer ansteigt als die jeder Teilgruppe, verschärft auf: Im hohen Alter kann die Mortalität sogar sinken.

Allem Anschein nach erreicht die Mortalität beim Menschen jenseits der 110 Jahre tatsächlich ein Plateau, ähnlich wie in der linken Grafik dargestellt. Außergewöhnlich langlebige Menschen erreichen offenbar nicht deshalb ein so hohes Alter, weil sie langsamer altern als andere (unterste blaue Kurve des rechten Diagramms), sondern weil sie bei besserer Gesundheit in den Lebensabend eintreten (unterste blaue Kurve im linken Diagramm).

Es gibt zwar – sehr selten – Mutationen, die vorzeitiges Altern auslösen (wie etwa bei Patienten mit so genannter segmentaler Progerie), aber allem Anschein nach keine, die das Altern beim Menschen verlangsamen. Daher vermutet der Autor, dass alle älteren Menschen (mit Ausnahme der Progeriepatienten) eine ähnliche, vielleicht sogar dieselbe altersabhängige Sterblichkeitskurve aufweisen. Das stimmt mit dem Befund überein, dass die linke Grafik der Realität näher kommt als die rechte. Insbesondere nimmt die Langlebigkeit zu, weil sich die blauen Kurven im linken Diagramm nach unten verschieben (oder, was auf dasselbe hinausläuft, nach rechts), und nicht, weil sich die Steigung der blauen Kurven im rechten Bild abflacht.



verlängern (Spektrum der Wissenschaft 10/2006, S. 34). Im Lauf der Geschichte kursierten zahlreiche weitere Vermutungen über die Geheimnisse der Langlebigkeit.

Evolutionsbiologen gingen davon aus, dass der mit dem Alter einhergehende Verfall bei mehrzelligen Lebewesen unvermeidlich sei, dass jedoch genetische und andere Maßnahmen ihn verlangsamen könnten. Demografen arbeiten statt mit dem kaum messbaren Verfall selbst mit der so genannten Seneszenz, definiert als Anstieg der Mortalität mit zunehmendem Alter. In der vergleichsweise kurzen Zeit von 200 Jahren können derartige Effekte jedoch kaum eine Rolle gespielt haben. Überdies waren viele Wissenschaftler von folgendem Zusammenhang überzeugt: Wenn durch medizinischen Fortschritt in jüngerem Alter mehr Leben gerettet werden, dann erreichen mehr kränkelige Personen ein höheres Alter. Damit ist der durchschnittliche Alte kränker als vor den Zeiten des Fortschritts; entsprechend schwieriger wird es, noch etwas für sein längeres Leben und seine Gesundheit zu tun.

Die Suche nach Langlebigkeitsgenen

Doch Forschungsergebnisse haben diese Vorstellungen widerlegt. So ergab beispielsweise eine Untersuchung von ab 1870 geborenen eineiigen Zwillingen aus Dänemark keinen Anhaltspunkt für eine angeborene maximale Lebensdauer. Nur etwa 25 Prozent der Schwankungen in der Lebensdauer bei Erwachsenen konnten auf genetische Variation zwischen den Individuen zurückgeführt werden.

Zudem hat die Suche nach »Langlebigkeitsgenen« beim Menschen bisher nur wenige Erfolge zu verzeichnen. Zwei Varianten des Apolipoprotein-E-Gens (*ApoE*) erwiesen sich in mehreren Studien als Faktoren, welche die Mortalität im höheren Alter um etwa 10 bis 20 Prozent gegenüber dem Durchschnitt erhöhen oder senken. Beim Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* sieht es anders aus. Hier haben Forscher hunderte Gene künstlich verändert, um die Lebensspanne zu verlängern, zuweilen mit enormer Wirkung. Die Entdeckung des ersten dieser Gene, *age-1*, war ein bedeutender Fortschritt, der unser Wissen über die Genetik des Alterns revolutionierte. Beim Menschen haben jedoch Hunderte, vielleicht sogar Tausende von Genen an verschiedenen Orten jeweils einen geringen Anteil an unserem Alternsprozess. Um die Mortalität und die Morbidität – die Sterbewahrscheinlichkeit und die Krankheitshäufigkeit – im hohen Alter zu verändern, müsste man also an sehr vielen Stellen im Genom gleichzeitig angreifen.

Bei allen Spezies tragen sämtliche aktiven Gene direkt oder indirekt zur Fruchtbarkeit, zum Überleben oder zu beidem bei. Die Evolutionstheorie und einige empirische Studien sprechen dafür, dass genetische Varianten, welche die Langlebigkeit erheblich steigern, unter natürlichen Bedingungen selten vorkommen, da sie auf Kosten der Nachkommenszahl gehen.

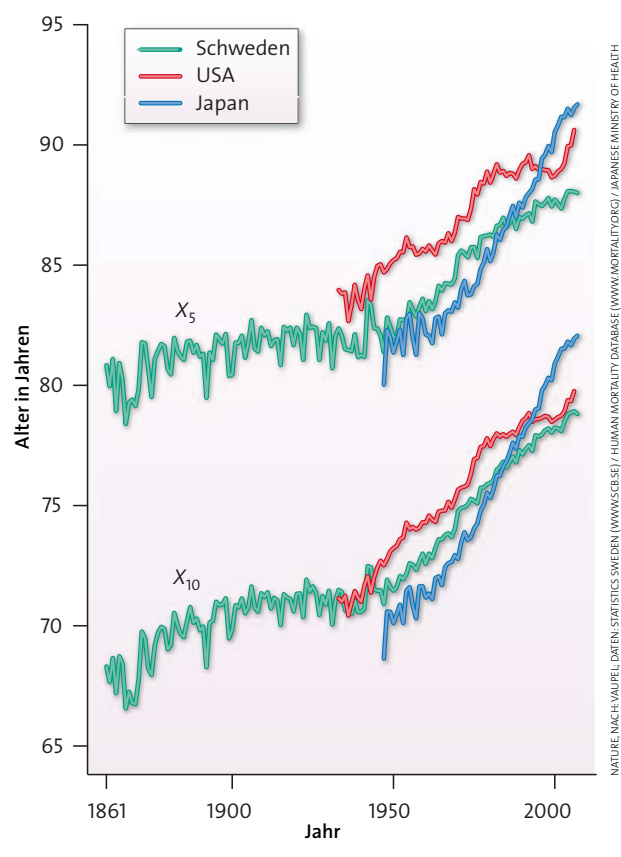
Die Evolutionstheorie des Alterns ist lange Zeit so gedeutet worden, dass alle vielzelligen Arten einer unausweichli-

Der Tod wird verschoben

Die Werte X_5 und X_{10} geben das durchschnittliche Alter an, bei dem die weitere Lebenserwartung noch fünf beziehungsweise zehn Jahre beträgt. Die Beispiele zeigen die historische Entwicklung dieser Werte für Frauen aus Schweden (1861–2008), den USA (1933–2006) und Japan (1947–2008).

Bei Schwedinnen hat sich seit 1950 der Eintritt ins Greisenalter, der hier durch den Wert X_{10} definiert sei, um etwa acht Jahre verschoben, bei Japanerinnen um etwa zwölf Jahre. Sowohl X_5 als auch X_{10} zeigen eine geringe Steigung zwischen 1980 und 2000, das heißt, der Eintritt ins Greisenalter bei Frauen in den USA schritt in dieser Zeit nur langsam voran. Möglicherweise holen die US-Amerikanerinnen neuerdings auf: Ihre Kurven X_5 und X_{10} sind in den letzten Jahren stark angestiegen.

In allen drei Ländern nimmt die Kurve für X_5 denselben Verlauf wie die für X_{10} , doch mit einem ungefähr konstanten Abstand von etwa einem Jahrzehnt.



chen Seneszenz unterliegen. Gemäß der noch jungen Biodemografie aber sollte die Theorie eine größere Variation der Alternsmuster zulassen, darunter auch den Extremfall der so genannten inversen Seneszenz – Abnahme der Mortalität und Verbesserung der Gesundheit während des gesamten oder des Großteils des Erwachsenenlebens. Tatsächlich kann

bei manchen Spezies die Mortalität mit dem Alter abnehmen: Wenn die kränklichen Mitglieder einer Population ausgestorben sind, haben die verbleibenden noch etliche Jahre mehr vor sich als der Durchschnitt zuvor.

Überschätzter Gesundheitszustand

Anders als der Tod lässt sich der Gesundheitszustand nur schwer messen, und häufig sind die Angaben hierüber unzuverlässig, da sie gewöhnlich auf Umfragedaten beruhen. Generell führen Umfragen zu einer Überschätzung des Gesundheitszustands und der kognitiven Fähigkeiten, da die Leute, denen es in dieser Beziehung schlecht geht, oft gar nicht erst teilnehmen. Immerhin erheben Demografen und Epidemiologen verschiedene Gesundheitsindizes und gewinnen daraus brauchbare Informationen über die zeitliche Verschiebung der Seneszenz.

Bei nach wie vor unbefriedigender Datenlage gibt es trotzdem greifbare Fortschritte zu verzeichnen. In den Vereinigten Staaten hat sich vor allem in Bezug auf körperliche Beeinträchtigungen die Situation in den 1990er Jahren merklich verbessert. In Dänemark konnte man die 100-Jährigen der Geburtsjahrgänge 1895 und 1896 einerseits und 1905 andererseits vergleichen. Die jüngere Kohorte war – bei vergleichbarem Allgemeinzustand – 50 Prozent umfangreicher als die ältere, hauptsächlich weil sich die Überlebenschance in dem Altersintervall zwischen 80 und 100 Jahren deutlich erhöht hatte. In Schweden ist ein vergleichbarer Trend zu

verzeichnen: Seit den 1950er Jahren ist die Zahl der über 100 Jahre alten Frauen dort dramatisch angestiegen (Grafik links unten).

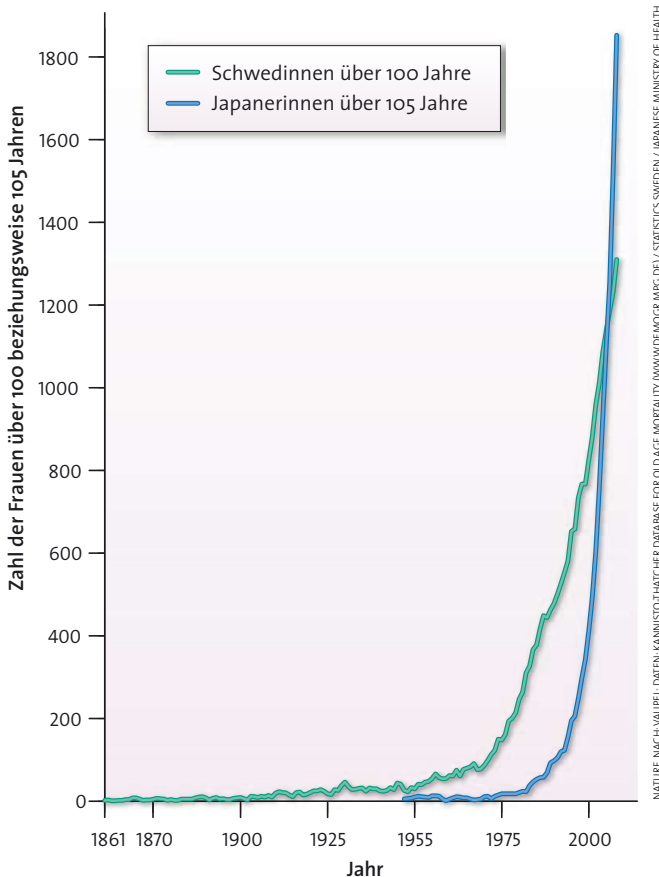
Es scheint allerdings so, als nehme die Häufigkeit von Krankheiten bei alten Menschen mit der Zeit zu. Paradoxerweise ist das eine gute Nachricht. Beispielsweise wird Prostatakrebs, eine häufige Erkrankung älterer Männer, heute dank besserer Diagnostik früher erkannt. Diese Patienten stehen also eine längere Zeit ihres Lebens in der Krankenstatistik, ohne dass es ihnen deswegen schlechter geht. Im Gegenteil: Dank Früherkennung leben sie im Durchschnitt länger (und stehen entsprechend länger in der Statistik), was sie selbst als erfreulich empfinden dürften, zumal das qualvolle letzte Stadium dadurch nicht länger ausfällt. Ähnliches gilt für andere Krebsarten ebenso wie für Altersdiabetes, Herz-Kreislauf-Krankheiten und rheumatische Beschwerden.

Obendrein nimmt allgemein – bei erheblichen Unterschieden zwischen einzelnen Ländern – die Anzahl leichter Beeinträchtigungen zu und die der schweren ab. Auch das ist eher eine gute Nachricht: Ein Schlaganfallpatient, der durch Physiotherapie eine gewisse Bewegungsfähigkeit wiedergewinnt, erhöht zwar die Zahl der Patienten, doch das ist allemal besser als eine krankheitsbedingte Schwerstbehinderung oder der Tod.

Bis mehr Daten zur Morbidität vorliegen, helfen auch indirekte Einschätzungen weiter. Die meisten Gebrechen führen zu höheren Sterberaten; wenn es den Alten jenseits der 85 Jahre nicht besser ginge als früher, wäre kaum zu erklären, warum die Mortalität nach dieser Altersgrenze so deutlich gesunken ist.

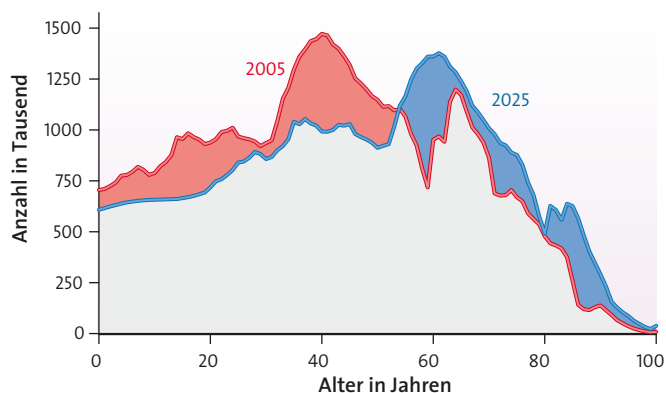
Mit zunehmendem Alter machen Frauen einen wachsenden Anteil der Bevölkerung aus. In Schweden waren zwar im Jahr 2008 fast 52 Prozent der Neugeborenen männlich, und noch bis zum Alter von 60 Jahren übertraf die Zahl der Männer trotz höherer Sterberaten die der Frauen. Mit 80 aber kamen auf jeden Mann drei Frauen und unter den 100-Jährigen sechs. Das ist ein paradoxer Befund: Männer sind anscheinend gesünder als Frauen; trotzdem sterben sie früher. Soziale und biologische Faktoren spielen hierbei sicher eine Rolle, doch über die genauen Mechanismen weiß man noch nicht viel. Männer neigen eher zur Überschätzung ihres Gesundheitszustands. Sie gehen seltener zum Arzt, müssen aber häufiger notfallmedizinisch versorgt werden. Auch die Tendenz zu risikoreichem Verhalten könnte teilweise genetisch begründet und auf die geschlechtsspezifischen Reproduktionsstrategien zurückzuführen sein.

Während unseres gesamten Lebens repariert unser Körper die biologischen Schäden an unseren Zellen, die zum Bei-



NATURE/MACH-VAUREL/DATEN KANNISTO/HATCHEE/DATABASE FOR OLD AGE MORTALITY (WWW.BEACR.MRC.DE) / STATISTICS SWEDEN / JAPANESE MINISTRY OF HEALTH

Bis vor etwa 50 Jahren wurden nur sehr wenige Menschen 100 Jahre und älter. Seither hat sich die Zahl der 100-jährigen Frauen in Schweden stark erhöht, und die Zahl der über 105 Jahre alten Japanerinnen ist seit 1975 praktisch senkrecht in die Höhe geschneilt.



Das Durchschnittsalter der deutschen Bevölkerung wird in den kommenden Jahren ansteigen. Daher ähnelt die prognostizierte Altersverteilung für 2025 (blaue Kurve) zwar der von 2005 (rote Kurve), allerdings ist sie um 20 Jahre nach rechts verschoben. Die Unterschiede zwischen beiden Verteilungen sind hauptsächlich auf Sterbefälle zurückzuführen; Ein- und Auswanderung fallen in Deutschland relativ wenig ins Gewicht. Die rot gefärbte Fläche stellt den Verlust von Menschen unter 54 Jahren von 2005 bis 2025 dar; die blaue Fläche den Zuwachs an Menschen über 54 Jahren.

spiel durch zufällige Mutationen oder Umwelteinflüsse entstehen. Im Alter nimmt die Anzahl dieser Schäden jedoch zu, und der Körper kommt mit dem Reparieren nicht mehr nach. Dadurch häufen sie sich an, und es kommt zum »Verfall« des Körpers. Wer ihn aufhalten will, hat dementsprechend zwei Optionen: Schäden einzudämmen, beispielsweise durch Verbesserung der Lebensbedingungen und durch Krankheitsprävention, sowie die Reparaturen zu verbessern, etwa durch medizinische Eingriffe.

Konstante Sterbewahrscheinlichkeit bei Uralten

Man möchte meinen, Fortschritte auf diesen Gebieten würden den Verfall verlangsamen, so dass etwa das alterstypische Nachlassen der Kräfte nicht im Alter von 70 bis 80, sondern von 70 bis 85 Jahren stattfindet und der spätere Abbau statt von 80 bis 90 im Alter von 85 bis 100 Jahren. Bemerkenswerterweise scheint dies nicht der Fall zu sein. Die vorliegenden Daten sprechen dafür, dass sich der körperliche und geistige Verfall nach hinten verlagert, statt sich in die Länge zu ziehen. Sterberaten und Gesundheitsindizes, die einmal für ein Alter von 70 Jahren typisch waren, charakterisieren jetzt das Alter von 80 Jahren; und die Daten, die früher die 80-Jährigen kennzeichneten, finden sich heute eher bei den 90-Jährigen.

Für die Uralten ergibt sich ein weiterer überraschender Befund. Im Alter zwischen 110 und 114 Jahren – und darüber hinaus, soweit die spärlichen Beobachtungen das hergeben – liegt die Sterbewahrscheinlichkeit konstant bei 50 Prozent pro Jahr. Der Verfallsprozess beim Menschen läuft also zumindest im sehr hohen Alter stets mit derselben Geschwindigkeit ab (Kasten S. 54).

Die beiden treibenden Kräfte dieses Trends sind offenbar gesicherte Lebensumstände und eine gute medizinische Versorgung. Ältere Menschen sind gesünder, wenn sie in gut isolierten Wohnungen leben, angemessene Kleidung tragen, appetitliches Essen verzehren, ihr Leben genießen und sich im Notfall eine neue, teure Behandlung leisten können. Darüber hinaus sind die Einwohner reicherer Länder meist gebildet, und Gebildete erfreuen sich größtenteils eines gesünderen und längeren Lebens.

Medizinischer Fortschritt und Lebensstandard

Es ist unklar, ob der Faktor Lebensstandard oder der Faktor Medizin bedeutsamer ist, teilweise weil beide miteinander verknüpft sind. Wohlstand sorgt für Fortschritte, auch weil mehr Geld für biomedizinische Forschung und Weiterbildung der Ärzte ausgegeben wird. Umgekehrt sind gesündere Bevölkerungen auch wirtschaftlich produktiver und somit vermöglicher. Trotzdem können zwei Länder mit gleichem Pro-Kopf-Einkommen verschiedene Lebenserwartungen aufweisen, und manche Länder mit geringem Lebensstandard sind diesbezüglich genauso erfolgreich wie wesentlich reichere Länder.

Viele verschiedene Faktoren beeinflussen die individuelle Lebenserwartung eines Menschen. Trotz gründlicher Forschung weiß man kaum Genaues etwa über den Einfluss von Familienstruktur, sozialen Netzwerken und Fettleibigkeit. Kurioserweise zeigen manche Ereignisse vor der Geburt oder im Kleinkindalter Konsequenzen für die Gesundheit im hohen Alter, unter anderem die Jahreszeit der Geburt. So lebten in Europa um 1900 im November geborene Kinder nach ihrem 50. Lebensjahr mehrere Monate länger als solche, die im Mai zur Welt gekommen waren. Der Umstand, sich die Gebärmutter mit einem Zwilling geteilt zu haben, scheint hingegen auf lange Sicht folgenlos zu bleiben. Andererseits ist bekannt, dass Zigarettenrauchen sich noch Jahrzehnte später gravierend auf die Gesundheit auswirkt.

Die Hauptfaktoren medizinischer Fortschritt und Wirtschaftsleistung entfalten ihre Wirkung jedoch auch noch im fortgeschrittenen Alter. Augenfällig war das nach der deutschen Wiedervereinigung vor 20 Jahren, nach der die Sterberaten der hochbetagten Bürger der ehemaligen DDR rasch sanken und sich denen der Westdeutschen anglich.

Ein Mensch hat nur eine geringe Chance, ein sehr hohes Alter zu erreichen, wenn er raucht, sich wenig bewegt und starkes Übergewicht hat. Aber darüber hinaus sind individuelle Faktoren relativ unbedeutend gegenüber den gesellschaftlichen. Anfang der 1890er Jahre feierten in Schweden jedes Jahr etwa drei Menschen – überwiegend Frauen – ihren 100. Geburtstag, 2007 waren es schon über 750. Das ist eine Zunahme um das 250-Fache (Bild links). Im Jahr 2107 könnten 50 000 oder 60 000 Menschen – mehr als die Hälfte der 2007 geborenen Kohorte – 100 Jahre alt werden, das wäre ein weiterer Anstieg um den Faktor 75.

Selbst in egalitären Gesellschaften schwanken die Lebensspannen beträchtlich: Aus den Sterblichkeitsmustern in



FOTOLIA / CONTRASTWERKSTATT

Wegen der veränderten Bevölkerungsstruktur werden die Menschen wohl künftig auch im Alter vermehrt erwerbstätig sein.

Schweden im Jahr 2008 geht hervor, dass zwar die meisten Menschen länger als 84 Jahre leben – einer von sechs aber stirbt vor dem 70. Lebensjahr.

Zukünftige medizinische Fortschritte zeichnen sich bereits ab: Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Neubildung bösartiger Tumoren werden sich viel wirksamer verhindern und behandeln lassen. Durch genetische Untersuchungen werden wir vermutlich die Mechanismen, die das Altern verursachen, besser verstehen und sogar individualisierte Therapien auf der Grundlage des eigenen Genoms finden (Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 60, und 2/2011, S. 34). Spezielle Ernährungsformen könnten den Menschen ein längeres Leben bescheren. Mit Hilfe der regenerativen Medizin können wir vielleicht in den kommenden Jahrzehnten Organen und Geweben ihre jugendliche Frische wiedergeben. Auch die Nanotechnologie birgt Potenzial.

Was bringt ein längeres Leben mit sich?

Demografen sagen die Entwicklung der Mortalität voraus, indem sie Trends aus der Vergangenheit extrapolieren. Dabei berücksichtigen sie auch mögliche Trendänderungen wie

wirtschaftliche oder ökologische Katastrophen und medizinische Durchbrüche. Allerdings hatten solche Ereignisse während der vergangenen 170 Jahre in den reichen Ländern keinen Einfluss auf die Lebenserwartung: Sie wuchs konstant um 2,5 Jahre pro Jahrzehnt oder sechs Stunden pro Tag.

Zwar erhöht sich die Lebenserwartung nicht radikal durch die erfolgreiche Bekämpfung einer einzelnen Krankheit, wohl aber durch kleine Fortschritte bei vielen verschiedenen Krankheiten. Deren positive Wirkungen verstärken sich gegenseitig, weil alte Menschen sehr oft an mehreren Krankheiten zugleich leiden. Dieser Effekt erhöht die Lebensdauer alter Menschen derzeit um mehrere Monate pro Jahr. Wenn der Fortschritt im selben Tempo weitergeht, wird sich der durchschnittliche Todeszeitpunkt in 30 oder 40 Jahren um weitere sieben Jahre nach hinten verschoben haben.

Wenn ein junger Mensch sich bewusst wäre, dass er wahrscheinlich mehr als 100 Jahre leben wird und davon 90 oder 95 Jahre in guter kognitiver und körperlicher Verfassung, würde er sein Leben wohl anders gestalten als die meisten Menschen heutzutage. In vielen Ländern, insbesondere solchen mit hoher Lebenserwartung, sind die Menschen genau dann am stärksten von Erwerbsarbeit in Anspruch genommen, wenn sie Kinder bekommen. In den Ruhestand gehen sie meist erst, wenn ihr Nachwuchs nicht mehr auf sie angewiesen ist. Es scheint jedoch erstrebenswerter, die Phasen

Ausbildung, Arbeit, Kindererziehung und Ruhestand insgesamt über mehr Lebensjahre zu strecken.

Im Jahr 2025 wird das Durchschnittsalter der Deutschen etwa 20 Jahre höher sein als noch 2005 – ebenso in anderen reichen Ländern (Bild S. 57). Im Jahr 2005 arbeitete ein Deutscher umgerechnet aufs ganze Leben durchschnittlich 16,3 Stunden pro Woche. 20 Jahre später werden es bei gleich bleibender Lebensarbeitszeit nur noch 14,9 Stunden sein – allein wegen der größeren Lebensdauer.

Da aber die Menschen umso mehr konsumieren, je länger sie leben, muss auch entsprechend mehr Arbeit geleistet werden. Daher versuchen Politiker, vermehrt Menschen ab 60 in Beschäftigung zu halten. Dagegen regt sich jedoch Widerstand: Menschen, die fast ihr ganzes Leben lang hart gearbeitet haben, wollen das nicht noch länger tun. Eine vernünftige Alternative wäre es, Jüngeren einen Ausgleich für eine längere Lebensarbeitszeit zu bieten, etwa in Form einer kürzeren Wochenarbeitszeit während ihres gesamten Lebens. Die Menge der Arbeit bliebe erhalten, wenn die Menschen zwar weniger Wochenstunden, aber entsprechend mehr Jahre arbeiteten.

Das 20. Jahrhundert war geprägt von der Umverteilung des Reichtums; das 21. wird wahrscheinlich ein Jahrhundert der Umverteilung von Arbeit sein.

Das Rätsel der Langlebigkeit

Mit der Verlängerung der durchschnittlichen Lebensspanne hat die Varianz des Sterbealters abgenommen: Die Länder mit den höchsten Lebenserwartungen weisen die geringsten Unterschiede in der Lebensdauer auf. Den meisten Menschen in den reicheren Ländern und einem wachsenden Anteil der Einwohner von Entwicklungsländern ist somit ein langes, überwiegend gesundes Leben vergönnt. Darin liegt die wohl bedeutendste Errungenschaft der modernen Zivilisation.

Obwohl viele Politiker erkennen, dass die Weltbevölkerung altert, sind das Tempo dieses Wandels sowie dessen soziale, wirtschaftliche und gesundheitsrelevante Auswirkungen noch nicht angemessen ins öffentliche Bewusstsein gedrungen. Auch die meisten biomedizinischen Forscher ermessen die Tragweite dieser Entwicklung noch nicht ganz, möglicherweise weil die Entdeckung nicht aus Laborexperimenten oder klinischen Tests hervorging.

Der jahrtausendealte Streit darüber, ob sich das Leben alter Menschen verlängern lässt, hat nun eine bemerkenswerte Auflösung erfahren. Im fortgeschrittenen Alter lässt sich der Tod hinauszögern – aber nicht weil sich der altersabhängige Anstieg der Sterberate abflacht, sondern weil die Menschen gesünder alt werden. Bisher hat sich kein Weg gefunden, den Verfallsprozess selbst zu bremsen. Der Gesundheitszustand alter Menschen hingegen lässt sich durchaus beeinflussen.

In ihrer Gesamtheit sind die Ergebnisse so verblüffend, dass ich sie das »Rätsel der Langlebigkeit« nenne. Warum gestatten es die Evolutionskräfte, die den menschlichen Alternsprozess formten, dass wir die Gesundheit, jedoch nicht das Verfallstempo beeinflussen können? In diesem Zusam-

menhang stellt sich auch die Frage, warum Menschen aller Altersstufen sich in ihrem Gesundheitszustand, nicht aber in ihrer Alternsgeschwindigkeit deutlich voneinander unterscheiden (Kasten S. 54).

Die Forschung sollte sich in der näheren Zukunft auf folgende Themen konzentrieren: das Schicksal der sehr Hochbetagten, den Unterschied in der Gesundheit zwischen alten Männern und Frauen sowie die Einflüsse des Gesundheitszustands im jugendlichen Alter auf die Langlebigkeit. Meiner Überzeugung nach stellt nicht die Mortalität selbst, wohl aber deren Anstieg mit zunehmendem Alter eine biologische Grundkonstante dar, die von der Einzelperson und von der Zeit kaum bis gar nicht abhängt. Die Überprüfung dieser Hypothese wird unser Wissen darüber, wie und warum wir altern, bedeutend voranbringen. ~

DER AUTOR



James W. Vaupel ist Direktor am Max-Planck-Institut für Demografische Forschung in Rostock. Er ist Professor unter anderem am Institut für öffentliche Gesundheit der Süddänischen Universität in Odense sowie am Center on the Demography of Aging der Sanford School of Public Policy der Duke University in Durham, North Carolina.

LITERATURTIPPS

- Baudisch, A.:** Inevitable Aging? Contributions to Evolutionary-Demographic Theory. Springer, Berlin, Heidelberg 2008
Evolutionstheoretische und demografische Studie zur Seneszenz
- Christensen, K. et al.:** Ageing Populations: the Challenges ahead. In: Lancet 374, S. 1196–1208, 2009
Zur Verlängerung der Lebensdauer und gleichzeitiger Verbesserung der Gesundheit im hohen Alter
- Jeune, B.:** Living Longer – But Better? In: Aging Clinical and Experimental Research 14, S. 72–92, 2002
Historischer Überblick der Ideen und Theorien zur Langlebigkeit
- Oeppen J. et al.:** Broken Limits to Life Expectancy. In: Science 296, S. 129–1031, 2002
Studien zur Steigerung der Lebenserwartung
- Sierra, F. et al.:** Prospects for Life Span Extension. In: Annual Review of Medicine 60, S. 457–469, 2009
Überblick über Möglichkeiten und Herausforderungen der Altersforschung
- Vaupel, J.W. et al.:** Longer Life Expectancy? Evidence from Sweden of Reductions in Mortality Rates at Advanced Ages. In: Wise, D.A. (Hg.): Studies in the Economics of Aging, S. 79–104, University of Chicago Press, Chicago 1994
Zur Entdeckung der zeitlichen Verschiebung der Mortalität anhand von Sterblichkeitsdaten aus Schweden
- Vaupel, J.W. et al.:** Heterogeneity's Ruses. In: American Statistician 39, S. 176–185, 1985
Über das Altern einer heterogenen Bevölkerung

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1120984

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 464, S. 536–542, 25. März 2010



CLARYS - 11.

BENOIT CLARYS

Wikingen landeten Ende des 9. Jahrhunderts auf der Seineinsel Oissel. Statt wie andernorts zu plündern, verzichteten sie hier vermutlich auf jede Gewalt. Archäologen nehmen an, dass auf dem Eiland ein Stützpunkt entstand.



MITTELALTER

Friedliche Berserker

Die Wikingen galten bei ihren Zeitgenossen als mordgierige Krieger. Doch jene, die unter Häuptling Hrolf das Seinetal besetzten, zeigten sich offenbar von einer ganz anderen Seite: Sie integrierten sich in die fränkische Gesellschaft und begründeten so das Herzogtum Normandie.

Von Vincent Carpentier

AUF EINEN BLICK

WIKINGER AN DER SEINE

1 Um das Jahr 900 landeten Wikingen unter ihrem **Häuptling Hrolf** im Mündungsgebiet der Seine. Archäologen finden **kaum Hinweise auf eine gewaltsame Landnahme**.

2 Skandinavische **Relikte in der französischen Sprache** sowie Berichte von Chronisten lassen vermuten, dass die berühmten Eroberer um **Integration in die karolingische Gesellschaft** bemüht waren.

3 Tatsächlich kamen die Nordmänner den westfränkischen Königen gut zupass: Das kampferprobte Heer in der Normandie **verteidigte die Grenzen** gegen andere Invasoren.

»Der sehr duldsame König Karl will dir dieses Land nahe der Küste, das von Astignus und von dir über alle Maßen verwüstet wurde, zu Lehen erteilen; auch wird er dir seine Tochter Gisela zur Frau geben.« Diese Worte soll der westfränkische König Karl III. an den Wikingerfürsten Hrolf gerichtet haben, so berichtete es der Chronist Dudo von St. Quentin, der im 10. Jahrhundert eine Geschichte der Normannen verfasste.

841 wurde die Stadt Rouen noch von Wikingern gebrandschatzt, und das passte zum Feindbild der wilden Berserker, als die sich die skandinavischen Krieger seit dem Überfall auf das britische Kloster Lindisfarne 793 immer wieder gebärdet hatten. Doch im Jahr 911 sprach Karl der Einfältige einem ihrer Anführer im Vertrag von Saint-Clair-sur-Epte ein stattliches Lehen an der Seinemündung zu. Natürlich nicht ohne Gegenleistung: Mit seinen Kriegern sollte Hrolf die fränkische Küste fortan schützen. Das Abkommen hatte Bestand, Einheimische und Nordmänner verschmolzen zum Volkstamm der Normannen, aus der Wikingerkolonie entwickelte sich die Normandie.

Man würde nun erwarten, dass die neuen Herren dem Land ihren Stempel aufdrückten. Tatsächlich aber brachten wissenschaftliche Grabungen kaum Zeugnisse einer skandinavischen Eroberung ans Licht. Überspitzt gesagt wäre aus

Baggerarbeiten in der Seine förderten dieses Langschwert zu Tage, eine typische Waffe fränkischer Reitersoldaten. Es stammt aus dem 9. bis 10. Jahrhundert, der Zeit der Wikingerraubzüge. Ob ein Franke es führte – und vielleicht bei einem Gefecht am Ufer ums Leben kam – oder ob die Waffe einem Nordmann gehörte, lässt sich nicht sagen. Die Wikinger schätzten diesen Schwerttyp und kopierten ihn sogar.

archäologischer Sicht zu fragen: Hat diese Landnahme überhaupt stattgefunden?

So gilt die etwa 15 Kilometer vor der Seinemündung im Atlantik gelegene Insel Oissel als Operationsbasis der Nordmänner. Doch förderten Ausgrabungen dort jüngst typische Überreste einer karolingischen Siedlung aus der fraglichen Zeit zu Tage. Weder die Bauweise der Häuser noch ihr Inventar weisen skandinavische Charakteristika auf; zudem fehlen Kampfspuren oder Hinweise auf die den Wikingern nachgesagte Brutalität.

Was für Oissel gilt, lässt sich auf die gesamte Normandie übertragen: Gerade eine Hand voll Streitäxte, Schwerter (siehe Bild rechts oben) und Speerspitzen wurden meist bei Baggerarbeiten in der Seine rund um Rouen, Elbeuf, Pîtres und eben auch Oissel gefunden. Etwa die Hälfte davon ist nordischen Ursprungs und stammt vom Übergang des 9. zum 10. Jahrhundert, also aus der Epoche der großen Wikingereinfälle in Rouen und Paris. Die übrigen Waffen wurden andernorts in Europa geschmiedet, doch lässt sich nicht ausschließen, dass Nordmänner sie mit sich führten.

Dann wären da noch vereinzelte Metallobjekte mit mutmaßlich skandinavischem Ursprung zu nennen: ein Bronzearmreif, wahrscheinlich aus dem 10. Jahrhundert; einige Amulette in Form eines Thorhammers, die leider schwer zu datieren sind. Dazu noch eine Ansammlung von Münzen und Schmuckstücken, die den Stämmen der Britischen Inseln beziehungsweise allgemein den Nordseeländern zugeordnet werden. Diese geringe Ausbeute ist wirklich verblüffend, waren der Hafen von Rouen und die Gestade der Normandie doch schon seit prähistorischen Zeiten in den Seehandel eingebunden.

Wenn Schriftquellen wie die Chronik Dudos stimmen, wonach ein Wikingerfürst namens Hrolf, latinisiert Rollo, von Karl dem Einfältigen um das Jahr 911 die Herrschaft über die Grafschaft Rouen erhielt, müssten sich zumindest Gräber ausmachen lassen, in denen die fremden Krieger beziehungsweise ihre Angehörigen zur letzten Ruhe gebettet wurden. Doch ein 1865 entdecktes Frauengrab in Pîtres, unweit

Solche »Schildkrötenpanzer«-Fibeln wurden in einem mittelalterlichen Grab nahe Pîtres gefunden. Der typisch skandinavische Gewandschmuck legt die Vermutung nahe, dass dort eine aus Nordeuropa stammende Frau mit all ihrer Habe beigesezt wurde. Es wäre dann einer der wenigen archäologischen Nachweise für die Anwesenheit von Wikingern in der Normandie.



HISTORISK MUSEUM OSLO / FOTO: M. KUJIER



von Oissel (siehe Karte S. 64), ist derzeit das einzige seiner Art. Ein Paar Bronzefibeln im skandinavischen Stil (siehe Bild links) gehörten zweifellos zum Gewandschmuck einer dort in der zweiten Hälfte des 9. Jahrhunderts bestatteten Angehörigen der nordischen Aristokratie.

Wikingerhäuptlinge ließen sich unter einem Erdhügel bestatten (siehe Bild unten), häufig in einem hölzernen Grabboot, mitunter wurde auch nur mit Steinen der Umriss eines Boots gelegt. Das bislang einzige solche »Wikinger-Schiffsgrab« in Frankreich wurde 1906 auf der Insel Groix vor der bretonischen Küste entdeckt und frei gelegt. Zwei weitere Kandidaten, unlängst inmitten einer vermutlich hochmittelalterlichen Nekropole bei Réville auf der Halbinsel Cotentin nahe Cherbourg entdeckt, hatte man voreilig diesem Typus zugeordnet: Statt der Schiffsform bildeten die Steine lediglich Kreise, ein auf dem Gebiet der Normandie von der späten Bronzezeit bis in die frühe Eisenzeit – also mehr als 2000 Jahre vor der fraglichen Zeit – verbreiteter Bestattungsbrauch. Inzwischen wurde diese Datierung der Fundstätte bestätigt.

Eine Vase, die in einem der beiden Gräber gefunden wurde, verweisen Archäologen mittlerweile ebenfalls in die Bronzezeit, nachdem sie ihr zuvor eine nordische Machart zugeschrieben hatten (siehe Bild S. 66). Gleiches gilt für die vermeintliche »Wikingerfestung« Hague-Dike – ein vier Kilometer langer Erdwall am Cap de la Hague. Auch wenn sein im Hochmittelalter geprägter Name nordische Wortelemente aufweist: Die ältesten Abschnitte ließen sich mit der Radiokohlenstoffmethode ebenfalls auf die Bronzezeit datieren.

Aus Sicht eines Archäologen gehören Berichte über die normannische Eroberung also eigentlich in den Bereich der Mythen und Legenden. Tatsächlich entdecken aber andere

Schiffsgräber unter Erdhügeln gehörten zur Begräbniskultur der Wikinger (im Bild zwei Hügel bei Staraja Ladoga nahe Sankt Petersburg, Russland). Ein Toter wurde in einem Boot verbrannt und trat so symbolisch die Reise ins Jenseits an. Das einzige derartige Grab in Frankreich wurde auf einer Insel vor der bretonischen Küste entdeckt.





Obwohl skandinavische Seefahrer auch schon in früheren Zeiten zu Beutezügen aufbrachen, markiert der Überfall auf das britische Kloster Lindisfarne 793 den Beginn der so genannten Wikingezeit; sie endete nach Rechnung der Historiker 1066 mit der Schlacht von Hastings. Dass die gefürchteten Krieger in der Normandie eine Strategie der Integration verfolgten, zeigen linguistische Relikte. Insbesondere nahe der Küste enthalten beispielsweise viele geografische Bezeichnungen (Toponyme) skandinavische Anteile (rot). In größerer Entfernung schrumpft die Zahl (beige); im größten Teil der heutigen Normandie findet man ausschließlich gallofränkische Toponyme.

Wikingen in England

Als Danelag (englisch Danelaw) bezeichnen Experten eine ausgedehnte Region nördlich von London, die einst dänischem Recht unterworfen war. Nach der Einsetzung eines Wikingerkönigs entstanden dort zahlreiche dänische Dorfgemeinschaften neben angelsächsischen Siedlungen. Noch heute ist der Einfluss der Wikingen in regionalen Dialekten deutlich erkennbar, insbesondere in den Ortsnamen: Alle Namen, die auf »by« (dänisch »Stadt«, »Dorf«) oder »thorp« (aus dem Altnordischen, verwandt mit dem deutschen »Dorf«) enden, sind nordischen Ursprungs. Sehr häufig findet man auch Ortsnamen vom Typ Kirby oder Kirkby (Kirchdorf), vergleichbar mit normannischen Orten wie Criquetot (*crique* ist verwandt mit dem deutschen Wort Kirche; *tot* = »Siedlung«).

Disziplinen der Altertumsforschung reichlich nichtmaterielle Spuren der Nordmänner – vor allem sprachliche.

Da wären natürlich etliche mittelalterliche Texte zu nennen, insbesondere von normannischen Chronisten wie dem eingangs erwähnten Dudo. Hinzu kommen altnordische Sagensammlungen und Chroniken wie die »Heimskringla«, die um 1225 auf Island entstand. Vor allem aber gibt es zahlreiche »linguistische Fossilien«, also aus dem Altnordischen oder aus dem Angelsächsischen stammende Hinterlassenschaften, die in Dialekte, Orts- und Personennamen der Normandie eingegangen sind. Bezeichnungen wie »Robert der Däne« sprechen für sich. So genannte Vaternamen (Patronymie), die angeben, wie der Vater des Namensträgers mit Vornamen hieß, bezeugen Mischehen zwischen Wikingern und Einheimischen: Der Vater des Anquetil war wohl ein Skandinavier namens Asketill, der des Osmont hieß Osmund. So wurde aus dem gegen Ende des 9. Jahrhunderts dort gesprochenen Franco-Picard, einer Variante des Altfranzösischen, im Lauf weniger Generationen ein Frankonormannisch.

Linguistische Fossilien nahe der Küste

Skandinavisch geprägte geografische Bezeichnungen (Toponyme) sind in manchen Gebieten der Normandie sehr häufig zu finden (siehe Karte links). Etliche Wasserläufe und Hafenflecken tragen beispielsweise Namen, die auf »bec« oder »fleur« enden (etwa die Gemeinden Caudebec-en-Caux oder die Hafenstadt Honfleur), abgeleitet vom altnordischen *bekkr*, zu Deutsch »Bach«, beziehungsweise *floi*, »Bucht«. Die Bezeichnung *toft* für Wohnung und *both* für Hütte haben sich in Ortsnamen erhalten, die mit »tot« und »beuf« abschließen wie im Fall der Gemeinden Yvetot und Elbeuf. Andere Toponyme enthalten ein »le-Homme« oder ein »la-Hogue«, was sich auf Besonderheiten der einstigen Landschaft zurückführen lässt: Als *holmr* bezeichneten die Wikingere eine grasbewachsene Insel, als *haugr* eine kleine Anhöhe.

Auch bilden Personennamen mitunter das Stammwort in Ortsnamen, die auf »ville« enden wie Mondeville: Einem mittelalterlichen Text zufolge befand sich in dieser Gegend das Landgut – lateinisch *villa* – eines skandinavischen Edelmanns namens Amundi.

Viele Toponyme enthalten nicht nur altnordische, sondern auch altsächsische Begriffe oder Namen. Sprachforscher schließen daraus, dass mit dem Häuptling Hrolf eine bunte Mischung aus Skandinaviern, Sachsen und Angloskandinaviern im Frankenreich an Land ging – Letztere waren aus der früheren Kolonisierung der Britischen Inseln durch die Wikingere hervorgegangen. Beispielsweise findet sich das altenglische, also angelsächsische Wort *aepfel* (deutsch »Apfel«) in dem Namen des Dorfs Auppegard im französischen Departement Seine-Maritime wieder. Der Ort hieß um 1160 noch »Appelgart«, was nichts anderes als »Apfelgarten« oder »Apfelhof« auf Altsächsisch bedeutete. Be-

merkenswerterweise entsprach dem in Yorkshire, dem Siedlungsschwerpunkt der englischen Wikingerkolonie, ein Ort Applegarth. Im Namen der Gemeinde Flottemanville im Departement La Manche verbirgt sich der *Floteman* (wörtlich »Fährmann«) – die altenglische Bezeichnung für Wikinger.

Bezeichnenderweise finden sich zahlreiche linguistische Spuren in der Terminologie der Seefahrt (siehe Bild S. 67): In der französischen *équipage* (zu Deutsch: »Schiffsbesatzung«) findet sich das altnordische *skipa* wieder, was »ein Schiff ausstatten« bedeutete; der Schiffsrumpf *carlingue* wurde in den skandinavischen Ländern als *kerling* bezeichnet; dem Verb *cingler* für »einen Kurs steuern« entsprach dort das *sigla* (das sich auch im deutschen Begriff »Segel« findet); der Achtersteven *étambot* leitete sich von *stafnbord* her; das Oberdeck *tillac* von *thilja*, dem Wort für »Planke« (das in das deutsche »Diele« einging).

Fischer standen mit den »Invasoren« im Austausch, wie das Krabbennetz *haveneau* zeigt: Es basiert auf der altnordischen Kombination *háfr-net*, zusammengesetzt aus »Angelgerät« und »Netz«. Der Dialektforscher René Lepelley von der Université de Caen Basse-Normandie wies überdies nach, dass die Namen etlicher Landmarken, die den Wikingern vermutlich einst als Orientierungspunkte entlang der Küste dienten, häufig skandinavische Einflüsse aufweisen.

Vermutlich war Rollo ein aus Norwegen verbannter Adliger. Viele seiner Gefährten kamen aus England

Altenglische und altenglische Elemente hielten ab dem 11. Jahrhundert auch in der Schriftsprache Einzug, und zwar in latinisierter Form. Dazu mussten sie bereits allgemein gebräuchlich und für jeden verständlich gewesen sein. Beim so genannten Normanno-Picard handelte es sich also nicht um das Idiom einer fremdländischen Elite, die sich durch ihre Sprache von der einheimischen Aristokratie abzugrenzen suchte, sondern vielmehr um ein Patchwork aus Neuem und Altem – wobei sich das Alte aus der Sprache der alteingesessenen gallorömischen Bevölkerung und den ab dem 5. Jahrhundert n. Chr. herrschenden Franken gebildet hatte.

Importiertes Vokabular entdeckten Sprachforscher dementsprechend auch im Rechtswesen jener Zeit. So regelte die Institution des *warec* (das sich im deutschen »Wrack« wiederfindet) die Verwertungsrechte auf Treibgut. Demzufolge stand dem Grundherrn alles zu, was das Meer an seinen Küsten anspülte. Darin eingeschlossen waren Schiffswracks (altnordisch *hvrac* oder *hvrec*) und gestrandete Wale. Was Letztere anbetraf, war alles bis ins Kleinste geregelt.

Wir können anhand dieser linguistischen Befunde annehmen, dass die skandinavische Kolonie, aus der das Herzogtum Normandie hervorging, anfangs nicht mehr als ein paar tausend Menschen zählte. Die Einwanderer stammten überwiegend aus Dänemark, wenngleich Rollo selbst den Quellen nach anscheinend ein norwegischer Adliger war, den man aus seiner Heimat verbannt hatte. Zahlreiche Gefährten kamen aus England oder dem Danelaw, dem von Dänemark kontrollierten Teil Englands (siehe Kasten links). Besonders

konzentriert treten skandinavische und angelsächsische Begriffe und Toponyme entlang bestimmter Abschnitte der Küsten und größeren Flüsse auf. Der fränkische Ausdruck *mansloth* basiert auf dem altnordischen *mannshlutr*, wörtlich »Anteil eines Mannes«, der schon im Danelaw als Agrarmaß verwendet wurde. Dass er in zwei Gesetzestexten der Normandie aus dem Jahr 1030 auftaucht, könnte ein Hinweis auf eine Neuordnung der Besitzverhältnisse durch den »Eroberer« Rollo sein. Des Weiteren findet man gerade am Unterlauf der Seine zahlreiche Toponyme mit einem »tuit« wie in Le-Thuit-Anger, die auf eine »Rodung« oder sonstige Urbarmachung von Land hindeuten.

Der Mangel an skandinavisch geprägten materiellen Hinterlassenschaften könnte zunächst einmal einen ganz einfachen Grund gehabt haben: Rollos Mannschaft war mit leichtem Gepäck unterwegs gewesen, besaß also bei der Landung kaum mehr als Waffen, Schiffe und das, was man am Leib trug. Dass auch Frauen an Bord fehlten, schließen Experten daraus, dass die Neuankömmlinge wenig zum Alltagswortschatz von Heim, Hof und Sozialleben beigetragen haben (zu den wenigen Beispielen gehören das Federbett *duvet*, das aus *dunn* für »Daune« hervorgegangen sein dürfte, sowie das Flanieren *flâner* mit dem Ursprung in *flana*, »ziellos herumlaufen«). Vermutlich bevorzugten es die Nordmänner, einen Haushalt mit einheimischen Frauen zu gründen.

Alles deutet darauf hin, dass sie sich rasch an Sprache und Gebräuche anpassten. Ihre Hochrangigen nahmen das Christentum der fränkischen Elite an und positionierten sich inmitten oder gar an erster Stelle der schon bestehenden Herrschaftsbereiche – Rollos Nachfahren bezeichneten sich als Herzöge. Im Übrigen erleichterten Ähnlichkeiten in den Bräuchen einen solchen Wandel. So war beispielsweise das



MUSÉE DE NORMANDIE, CAEN

Von den Erfahrungen der Nordmänner im Schiffsbau profitierten auch die Franken. Daher finden sich auf dem Ende des 11. Jahrhunderts gestickten Teppich von Bayeux nur Werkzeuge, die Archäologen aus Skandinavien kennen: Mit einem Breitbeil (a) wurden Planken zugerichtet; Verzierungen der Bordwände formte man mit einem kleinen Schaber (b); Bolzen, Dübel und Nägel trieb man mit einem Hammer in die Beplankung (c); ein Löffelbohrer (d) schuf die Eintiefungen für die Dübelbefestigung der Schiffswrange; die Dechsel (e) gab der Bordwand den letzten Schliff.

Konkubinats den fränkischen Adligen jener Zeit keineswegs fremd. Im Unterschied zu den Christen erkannten die Normannen aber auch die mit einer Konkubine gezeugten Nachkommen als legitime Erben an.

Schon die zweite Generation war vermutlich weitgehend in die Gesellschaft des westfränkischen Reichs integriert. Mag sein, dass die Geschichte auch hätte anders verlaufen können, denn wie das Zitat Dudos darlegt, scheuten Rollos Männer keineswegs davor zurück, sich mit Gewalt zu nehmen, was sie benötigten.

Kolonisation durch Einbettung

Als Karl der Einfältige den Wikingern 911 Zugang zur fränkischen Aristokratie gewährte, machte er gefürchtete Feinde zu kampferfahrenen Verbündeten. Immer wieder rannten die auf dem Gebiet der heutigen Bretagne ansässigen keltischen Bretonen gegen die Grenzen an, immer wieder drangen marodierende Wikinger ins Land ein. Das westfränkische Königshaus, damals noch in Händen der Karolinger, hatte zu dieser Zeit bereits den Zenit überschritten (987 begann mit Hugo Capet die Zeit der Kapetinger). Rollos Krieger schützten fortan das Reichsgebiet. Dabei nutzten sie ihrerseits den Rückzug der Gegner 924 und 933, um ihr Territorium nach Westen hin auszudehnen. Anhand dieser Überlegungen entwickelte der auf das skandinavische und normannische Mittelalter spezialisierte Historiker Lucien Musset (1922–2004) das Konzept einer »Kolonisation durch Einbettung«, das sich deutlich von der von fränkischen Chronisten überlieferten »Schreckensdramaturgie« der Wikingerüberfälle unterscheidet.

Dank dieser Bereitschaft zur Integration überdauerte das normannische Fürstentum an der Seinemündung, während beispielsweise eine 919 gegründete Wikingerkolonie an der Loire nach 18 Jahren von den Karolingern besiegt und ausgelöscht wurde.

Schon unter Rollos Sohn Wilhelm Langschwert, der 924 die Nachfolge antrat, war die Neuausrichtung der Region abgeschlossen. Aus Piraten waren Gutsherren geworden. Die einfacheren Besatzungsmitglieder fanden ihren Platz in der

Diese kleine Vase aus einem Grab im Bereich der Sairemündung galt lange Zeit als ein Mitbringsel der Wikinger aus der Heimat, da man den Fundplatz für ein Schiffgrab hielt. Nach neueren Erkenntnissen stammt das Gefäß aber aus der Bronzezeit.



AVIC BERLIN (DAPS DE BAYEUX, DARSTELLUNG DES BAUS DER NORMANNISCHEN FLOTTE, 1066, MUSEE DE LA TAPISSERE BAYEUX)

einheimischen Bevölkerung, wahrscheinlich bevorzugt in küstennahen Gebieten, die ihnen vertraut waren. Die Einwanderer übernahmen die fränkische Sprache und Religion wie auch das Rechtssystem. Strategische Heiraten verbanden ihre Führungsriege mit der einheimischen Aristokratie, so dass Experten ab Mitte des 10. Jahrhunderts von einer »normannisch-fränkischen« Elite sprechen, deren Lebensstil sich nicht mehr von dem anderer Oberschichten im Reich unterschied.

Auch wenn spätere Chronisten vor allem die militärischen Erfolge rühmten und dabei das Bild übermächtiger, wie im Rausch kämpfender Berserker zeichneten, entsprachen die Streitkräfte der Seine-Wikinger seit dem Ende des 9. Jahrhunderts wohl eher einer gut organisierten Armee, die der Normandie Macht und Einfluss im Frankenreich sicherte. Wie erfolgreich diese Integration der nordischen in die fränkische Kultur funktionierte, zeigt die Heirat des englischen Königs Æthelred mit Emma, der Tochter Richards I. von der Normandie, im Jahr 1002 und schließlich die Karriere des normannischen Herzogs Wilhelm der Bastard, der am Weihnachtstag 1066 als Wilhelm I., genannt der Eroberer, zum König von England gekrönt wurde. ~

DER AUTOR



Der Archäologe **Vincent Carpentier** arbeitet am INRAP (Institut national de recherches archéologiques préventives) in der französischen Region Basse-Normandie.

QUELLEN

- Boyer, R.:** Die Piraten des Nordens – Leben und Sterben als Wikinger. Klett-Cotta, Stuttgart 1996
- Deuve, J.:** La Fondation du duché de Normandie. Editions Charles Corlet, Condé sur Noireau 1997
- Musset, L.:** Nordica et Normannica: Recueil d'études sur la Scandinavie ancienne et médiévale, les expéditions des Vikings et la fondation de la Normandie. Société des études nordiques, Paris 1997
- Riedel, E.:** Les Vikings et les mots: L'apport de l'ancien scandinave à la langue française. Errance, Paris 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1120983

Üppige Vielfalt trotz Nahrungsmangel

Der Boden der Tiefsee, lange Zeit als riesige Ödnis angesehen, hat sich als ein biologisch komplexes Ökosystem entpuppt, dessen Schicksal eng mit den obersten Meeresschichten verknüpft ist.

Von Craig R. McClain

Darf ich Ihnen den Planeten Erde einmal aus einem ganz neuen Blickwinkel vorstellen? Fast 64 Prozent seiner Oberfläche, rund 208 640 000 Quadratkilometer, liegen mehr als 200 Meter unter der Meeresoberfläche. Das Fehlen von Licht in diesen Tiefen erlaubt keine Fotosynthese, die energetische Grundlage der meisten Ökosysteme. Unsere Welt mit ihren ausgedehnten Meeren wird demnach von Lebensräumen dominiert, in denen es nur sehr wenig Nahrung gibt. Die Folgen dieses Man-

kos sind dort überall zu spüren – allerdings anders als lange Zeit vermutet.

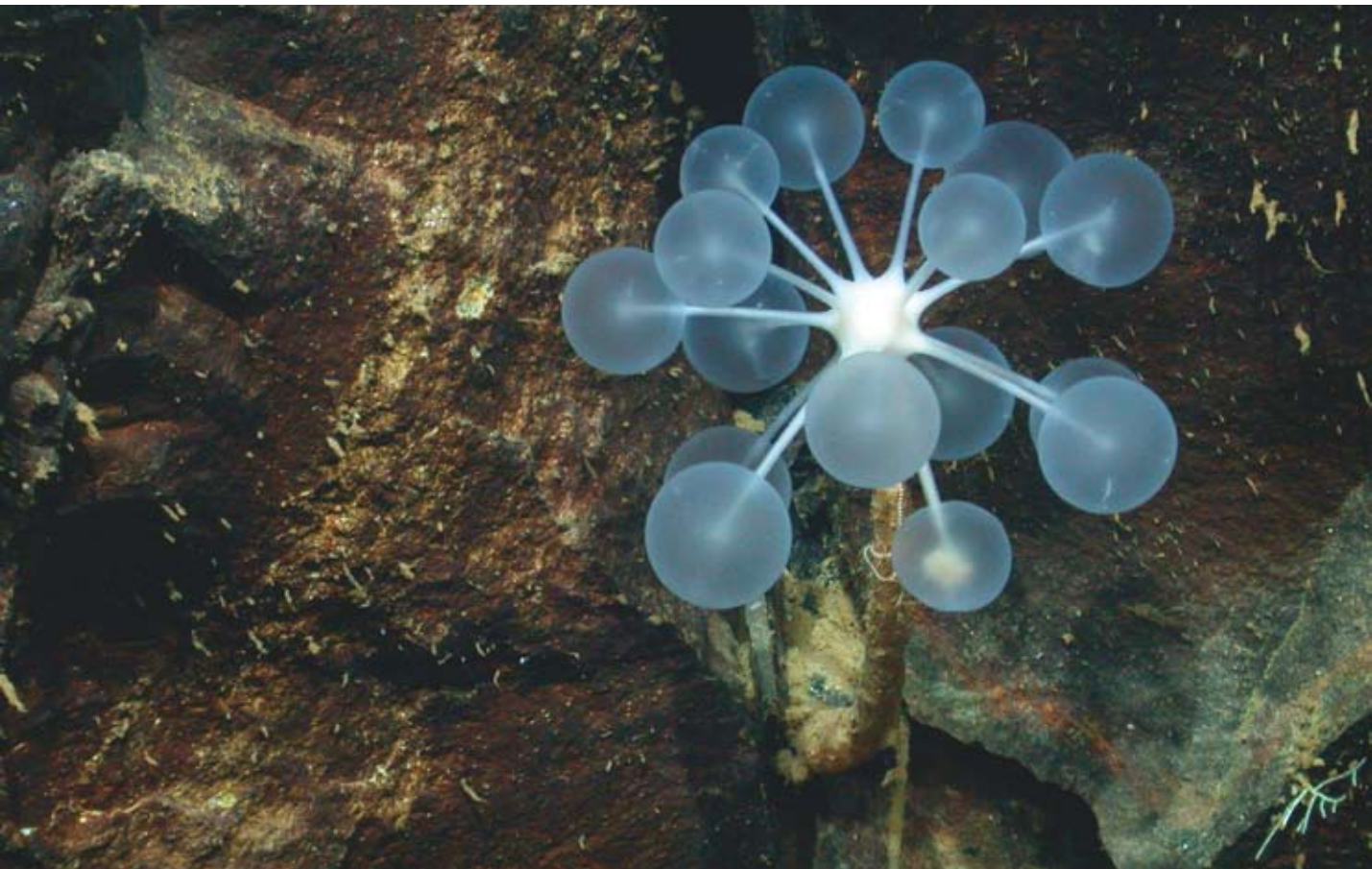
Zwei Jahrhunderte lang glaubte die Wissenschaft, dass mangels Fotosynthese – und somit auch mangels Pflanzen – tierisches Leben in den tiefsten Meeresregionen, dem so genannten Abyssal, ausgeschlossen sei. Der Tiefseeboden sollte aus weiten, öden Flächen bestehen, nur hier und da bedeckt von einem Schiffswrack oder Gerippe. Doch ist das, was tatsächlich dort existiert – und was man dank verbesserter technischer Möglichkeiten auch endlich sehen kann –, weitaus komplexer, als irgendjemand vermutet hat. Und alles fängt mit jenen Organismen an, die nicht etwa ganz unten, sondern in den lichtdurchfluteten Schichten dicht an der Meeresoberfläche leben.

Alljährlich versinken schätzungsweise 16 Gigatonnen Kohlenstoff, vom Phytoplankton gebunden, in den Tiefen der Ozeane. Das entspricht allerdings nur etwa drei Prozent der Gesamtmenge an organischem Material, das an der Meeresoberfläche entsteht. Zum Vergleich: Drei Prozent eines Pfunds Zucker ist gerade einmal ein gehäufte Esslöffel. Diese geringe Menge an gebundenem Kohlenstoff, den der so genannte Meeresschnee mitführt, überzieht wie eine Puderschicht den Boden der Ozeane und stellt die einzige Nahrungsquelle für das Gros der Tiefseebewohner dar. Dennoch konnte sich in diesem kargen Lebensraum eine Fülle unterschiedlichster, zum Teil recht bizarrer Organismen entwickeln. In der Tat

AUF EINEN BLICK

WUNDERWELT TIEFSEE

- 1** Mangels **Sonnenlicht** ist in den Tiefen der Ozeane keine **Fotosynthese** und damit kein Aufbau organischen Materials möglich. Das Leben dort muss also von den Brosamen leben, die von der reich gedeckten Tafel an der **Meeresoberfläche** abfallen.
- 2** Trotzdem hat sich in der Tiefsee eine vielgestaltige und durch Anpassung an den Nahrungsmangel teils bizarre Fauna entwickelt. Grundlage der **Artenvielfalt**, die an die tropischer Flachwasserzonen heranreicht, sind unzählige **Mikrohabitate**.
- 3** Zu den Besonderheiten der Tiefseetiere zählt der Einsatz von **Biolumineszenz** sowohl als Köder zum Beutefang als auch für die Partnersuche. Wie auf Inseln gibt es eine Tendenz zur **Verzweigung**, aber auch **Riesenwuchs**, weil ein großer Körper bei der Suche nach den raren ergiebigen Futterquellen von Vorteil ist.



MONTEREY BAY AQUARIUM RESEARCH INSTITUTE

Was an eine moderne Skulptur aus blauen Glaskugeln erinnert, ist in Wirklichkeit ein etwa 30 Zentimeter großer Organismus, der in der Tiefsee lebt und den wissenschaftlichen Namen *Chondrocladia lampadiglobus* trägt. Er zählt zu den Schwämmen, filtert aber anders als diese nicht Kleinstlebewesen als Nahrung aus dem Wasser. Vielmehr packt er seine Beute mit feinen Häkchen auf der Außenhaut. Die auch als Pingpongbaumschwamm bekannte räuberische Art wurde 2006 erstmals wissenschaftlich beschrieben und illustriert die Vielfalt der Tiefseefauna.

birgt das Abyssal eine verblüffende Artenvielfalt, mit teilweise unerwarteten Anpassungen hinsichtlich Körpergröße oder anderen anatomischen Besonderheiten – ein weiterer Beleg dafür, dass sich Leben auch unter extremen Bedingungen nicht nur behaupten, sondern reich entfalten kann.

Irrtum mit einem Quäntchen Wahrheit

Edward Forbes (1815–1854, siehe Foto S. 70) war in der Biologie der Tiefsee das, was Jean-Baptiste Lamarck (1744–1829) für die Evolutionslehre bedeutete. Letzterer ist heute vor allem bekannt durch die fälschliche Annahme, dass ein Organismus seinen Körperbau im Verlauf seines Lebens modifizieren und diese Änderungen an seine Nachkommen weitergeben könne. Weil also etwa Giraffen ihre Hälse recken, um an Früchte und Blätter in höheren Baumregionen zu gelangen, soll der nächsten Generation dieser Tiere ein längerer Hals wachsen. Ungeachtet seines Irrtums, was den Mechanismus der Evolution betrifft, lag Lamarck mit seiner Überzeugung,

dass Organismen sich durch Anpassung an Umweltbedingungen weiterentwickeln, aber durchaus richtig.

Edward Forbes' großer Fehler war die von ihm im Jahr 1841 aufgestellte so genannte Abyssus-Theorie, wonach die Tiefsee unterhalb von 300 Faden Tiefe (etwa 550 Metern) eine unbelebte Zone sei. Angesichts des damaligen Kenntnisstands schien die Vermutung einleuchtend, dass kein Organismus unter den dort herrschenden extremen Bedingungen wie hohem Druck, Lichtmangel und niedrigen Temperaturen existieren könne. Daher überrascht es kaum, dass Forbes' Idee rasch Anerkennung in Wissenschaftlerkreisen fand. Letztlich stellte sich die Abyssus-Theorie freilich als falsch heraus. Dennoch enthielt sie, ähnlich wie bei Lamarck, ein Quäntchen Wahrheit. Forbes betonte zu Recht die enorme Bedeutung von Nahrung für Meeresbewohner; weil in den lichtlosen Tiefen keine Pflanzen gedeihen, sah er das Leben dort seiner Grundlage beraubt. Ihm schien es undenkbar, dass das von der Meeresoberfläche herabsinkende



Der britische Naturforscher Edward Forbes stellte 1841 seine berühmte, aber falsche Hypothese auf, wonach in der Tiefsee unterhalb von 550 Metern kein Leben mehr möglich sei. Er bezeichnete diese Gewässerschicht als »azoische Zone«.

Material genug Kohlenstoff liefern könne, um die Basis einer Nahrungspyramide zu bilden.

An der Meeresoberfläche wandelt das Phytoplankton mittels Fotosynthese Kohlendioxid in biologisch verfügbaren Kohlenstoff um. Andere Organismen fressen das Phytoplankton und werden ihrerseits gefressen. Auf jeder Stufe dieser Nahrungskette entstehen organische Abfälle, und auch Lebewesen, die keinem anderen zum Opfer fallen, sterben irgendwann einmal. Deshalb sinken fortlaufend Exkremente, Kadaver und anorganische Substanzen zum Tiefseeboden hinab. Ausscheidungen von Bakterien, aber auch Teile des Phytoplanktons verklumpen mit den Schwebeteilchen und bilden auf diese Weise den Meeresschnee.

Dessen Menge ist regional sehr unterschiedlich. In Küstennähe fördern nährstoffreiche Wasserschichten, die zur Meeresoberfläche aufsteigen, das Wachstum des Phytoplanktons. Dadurch entsteht dort viel Meeresschnee, von dem auch ein großer Teil den Boden erreicht. Mit zunehmender Entfernung von der Küste nimmt die Biomasseproduktion in den oberen Wasserschichten jedoch ab. Zudem muss das absinkende Material nun größere Strecken bis zum Boden zurück-

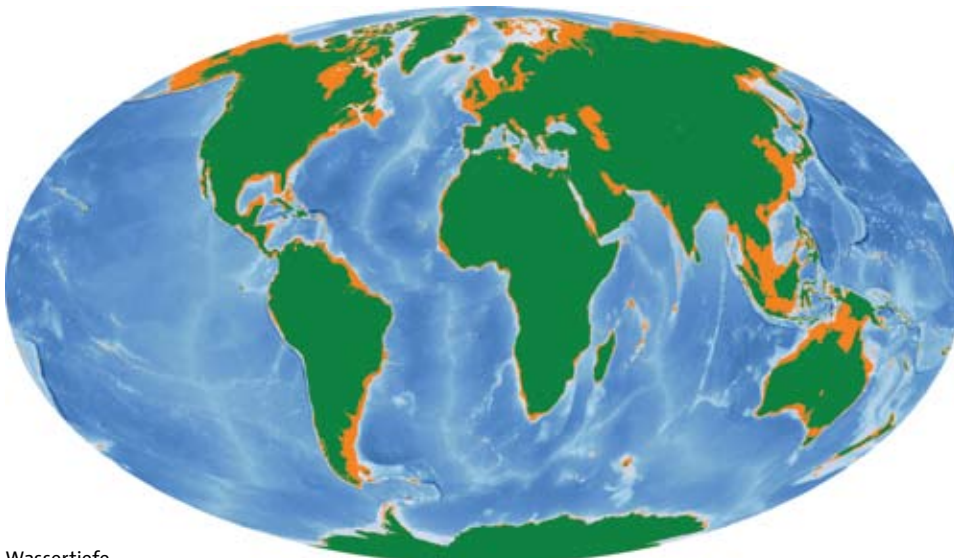
legen und kann so leichter unterwegs von anderen Organismen – von Bakterien bis hin zu Fischen – gefressen werden.

Fairerweise bleibt anzumerken, dass Forbes bei seinen Überlegungen den Meeresschnee nicht berücksichtigen konnte, weil dieser noch unbekannt war. Ebenso wenig wusste er, dass die Biomasse im Abyssal eng mit der Kohlenstoffmenge in den oberen Wasserschichten zusammenhängt. Über dem Tiefseeboden des Nordatlantiks nimmt sie beispielsweise laut 2007 publizierten Beobachtungsergebnissen meines Teams parallel mit Schwankungen der Planktonbildung an der Meeresoberfläche zu oder ab. Unglücklicherweise nahm Forbes Tiefseeproben ausgerechnet an einer Stelle im östlichen Mittelmeer, von der man heute weiß, dass hier nur sehr wenig Plankton entsteht.

Außerdem ließen sich mit den damaligen Dredgen – Schleppnetzen zum Aufsammeln von Lebewesen am Meeresboden – so gut wie keine Kleinorganismen fangen. So entging Forbes ein wesentlicher Teil der reichhaltigen Tiefseefauna. Nur wenige Jahrzehnte nach der Veröffentlichung seiner Abyssus-Theorie schrieb der britische Naturforscher Henry Nottidge Moseley (1844–1891): »Manche Tiere scheinen unter Tiefseebedingungen zu verzwergen.« Rund ein Jahrhundert später lieferte der Meeresbiologe Hjalmar Thiel von der Universität Hamburg den Beweis dafür: In einer grundlegenden Arbeit von 1975 zeigte er, dass mit zunehmender Wassertiefe kleinere Lebewesen dominieren.

Paradoxe Mixtur aus Verzweigung und Riesenwuchs

Biologen teilen die Bewohner der Tiefsee nach deren Größe in vier Gruppen ein. Zur Megafauna zählen Fische, Krabben, Hummer, Seesterne, Seeigel, Seegurken, Schwämme und Korallen – alles Tiere, die groß genug sind, um fotografiert oder mit Schleppnetzen gefangen zu werden. Die Makrofauna umfasst kleinere Polychäten (Vielborster-Ringelwürmer), Krebstiere und Mollusken, die man mit feinmaschigen Net-



Wassertiefe

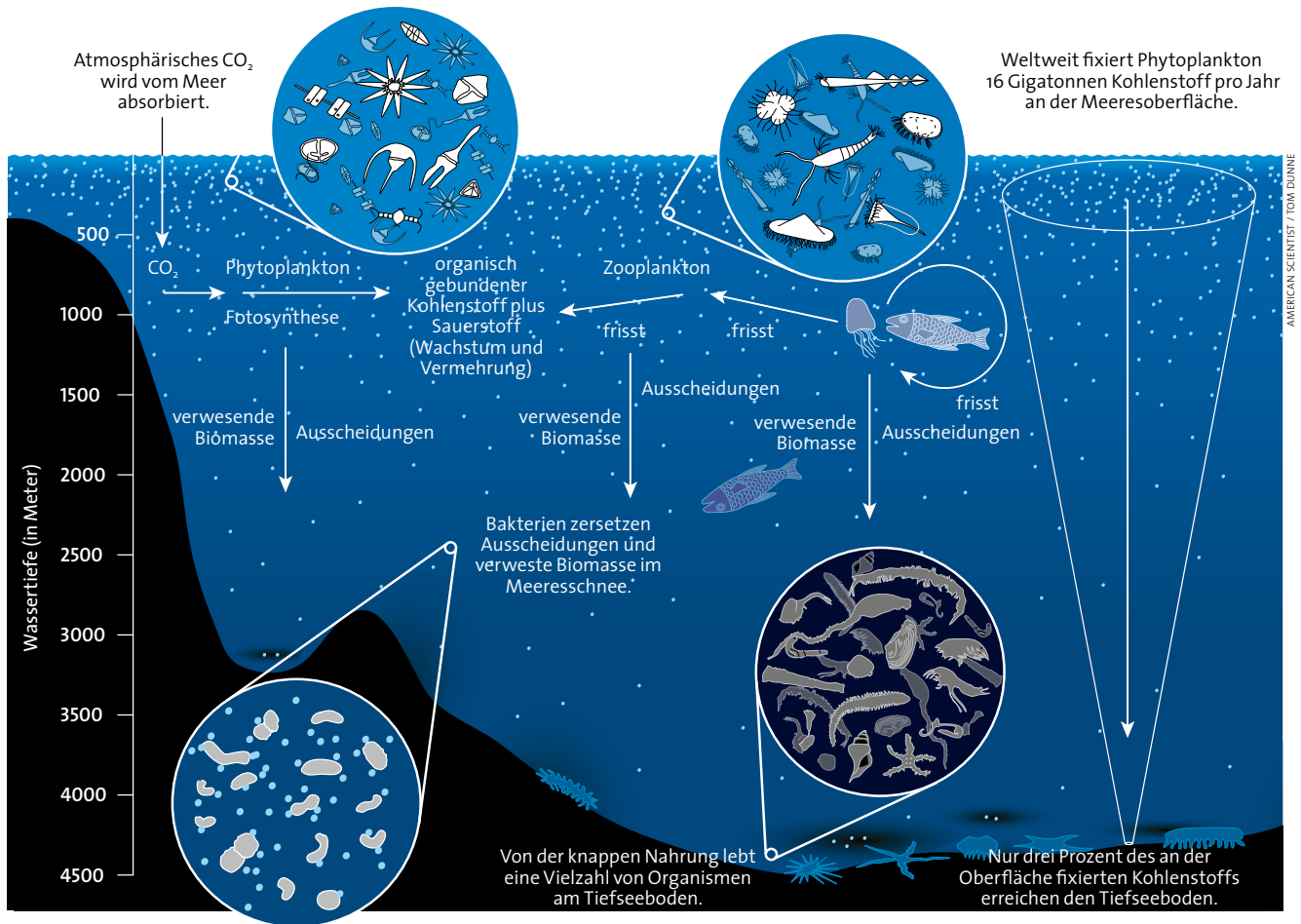
0–200 Meter

< 3000 Meter

um 5000 Meter

7000–11000 Meter

Die Erdoberfläche befindet sich zu fast 64 Prozent tiefer als 200 Meter unter dem Meeresspiegel. Bis dorthin dringt kein Sonnenlicht. Das macht Fotosynthese und Pflanzenwachstum – die Grundlage der Nahrungskette an Land und im Flachwasser – in diesen Zonen unmöglich.



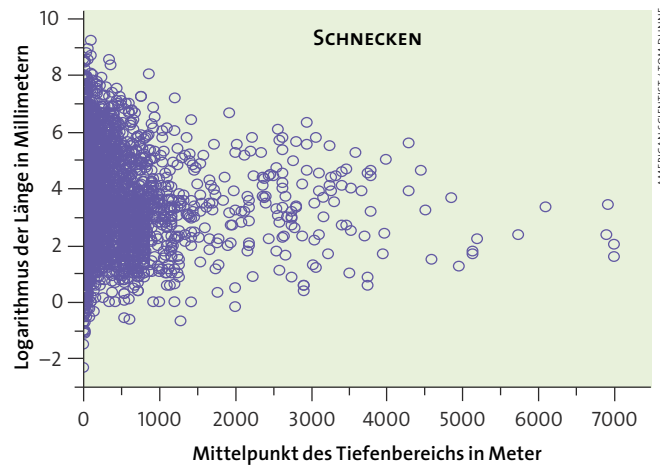
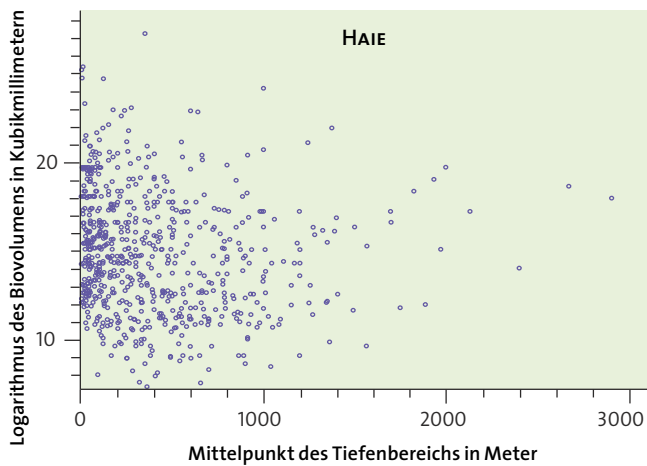
Das Leben unmittelbar unter der Meeresoberfläche bildet die Nahrungsquelle für die Fauna der Tiefsee. Die Ausscheidungen und biologischen Reste des Phyto- und Zooplanktons sowie der sich davon ernährenden Organismen rieseln in Form von so genanntem Meeresschnee zum Grund. Unterwegs können kohlenstoffhaltige Partikel zu Flocken verklumpen, teilweise zusammengehalten von Schleim und anderen Substanzen, die bei der Zersetzung durch Bakterien entstehen. Der meiste herabsinkende »Schnee« wird gefressen, bevor er den Meeresboden erreicht, so dass dort letztlich nur drei Prozent des nahe der Oberfläche fixierten Kohlenstoffs ankommen.

zen fangen kann, mit dem bloßen Auge jedoch kaum mehr wahrnimmt. Tiere mit Körperlängen im Bereich von zehntel Millimetern wie Foraminiferen (Kammerlinge), Copepoden (Ruderfußkrebse) und Nematoden (Fadenwürmer) bilden die so genannte Meiofauna. Sie bleiben nur in sehr feinmaschigen Netzen hängen. Die letzte Untergruppe mit den kleinsten Lebensformen schließlich besteht aus den Bakterien.

Thiel fand nun heraus, dass Mega- und Makrofauna mit zunehmender Wassertiefe rascher abnehmen als Meiofauna und Bakterien. Letztere stellen deshalb unterhalb von 4000 Metern den Hauptteil der Biomasse. Entsprechend passt, wie mein Doktorvater Michael Rex von der University of Massachusetts in Boston und ich berechnet haben, unsere komplette Sammlung an Tiefseeschnecken aus dem Nordatlantik – über 20000 Gehäuse – vollständig in das etwa faustgroße Gehäuse der Knotigen Birnenschnecke (*Busycon carica*) aus dem Westatlantik, die zur Familie der Wellhornschnellen (*Buccinidae*) gehört.

Auch wenn die Lebewesen der Tiefsee in der Regel kleinwüchsig sind, verkennt eine solche pauschale Aussage die Komplexität der Größenevolution in diesem einzigartigen Lebensraum. Eines der Rätsel, die sich mir zu Beginn meiner Forschungsarbeiten stellten, war die Tatsache, dass Wirbellose des Abyssals zwar insgesamt kleinere Formen ausbilden, manche Tiergruppen aber im Gegensatz dazu recht groß werden, ja teilweise sogar Riesenwuchs zeigen. So nehmen Tiefseeschnecken, obwohl sie generell kleiner sind als verwandte Arten in Flachwasserzonen, mit der Tiefe an Größe zu. Um die Verwirrung komplett zu machen, gehorchen andere Schneckenarten, die auch in Oberflächennähe vorkommen, wieder der allgemeinen Verzerrungsregel. Ähnliches gilt für Krebstiere. Aus alledem ergab sich für mich die Frage nach den biologischen Ursachen dieser einander widersprechenden Trends in der Evolution der Körpergröße.

Auf der Suche nach der Antwort wandte ich mich vom größten Lebensraum der Erde einem der kleinsten zu – den



AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE

Das knappe Nahrungsangebot in tiefen Meeresregionen verhindert, dass sehr große oder sehr kleine Tiere in bedeutenden Mengen vorkommen. Erstere brauchen ergiebige Nahrungsquellen zum Überleben, während letztere weder die nötigen weiten Wege zur Futtersuche bewältigen noch ausreichend Fettreserven für Hungerzeiten anlegen können. Mit zunehmender Wassertiefe und sinkendem Nahrungsangebot verschwinden beide deshalb immer mehr, wobei größere Arten etwas stärker zurückgehen als kleinere. Wie das dreieckige Muster in den beiden Grafiken zeigt, gilt das sowohl für Haie als auch für Schnecken.

Inseln. Für sie sind extreme Körpergrößen gut dokumentiert. Man denke nur an die Schnepfensträüße (Kiwis) und ausgestorbenen Riesenmoas Neuseelands, die ebenfalls ausgestorbenen Zwergelefanten der Mittelmeerinseln, den gewaltigen Komodowaran, die Galapagos-Riesenschildkröte, die sechs bis acht Zentimeter große Madagaskar-Fauchschildkröte und im Vergleich dazu den nur 1,5 Zentimeter großen Seychellenfrosch – jeweils beheimatet auf den gleichnamigen Inseln.

Schon 1964 dokumentierte J. Bristol Foster von der University of East Africa in Nairobi (Kenia), dass große Säugtiere in der Abgeschiedenheit von Inseln im Lauf der Zeit kleiner werden, während kleine zum Gigantismus tendieren. Wissenschaftler haben dafür den Begriff Inselregel geprägt. Weniger Raubtiere, geringerer Konkurrenzdruck durch andere Arten, ein kleinerer Lebensraum und ein beschränktes Nahrungsangebot gelten als Gründe für diese widersprüchlichen Entwicklungsrichtungen der Evolution.

Worin Inseln und Tiefsee sich gleichen

Ein ganz ähnliches Muster beobachteten meine Kollegen und ich 2006 in den Ozeanen. Wenn sich Meeresschnecken, die aus seichten Gewässern stammten, an das Leben in der Tiefsee anpassten, wurden kleinere Arten größer, während größere Spezies verzweigten. Interessanterweise verlief die Änderung nicht symmetrisch: Größere Tierarten verkleinerten sich stärker, als kleine sich vergrößerten. Am Ende trafen sich beide bei einer Größe, die etwas unter dem vorherigen Mittelwert für sämtliche betrachtete Spezies lag. Dasselbe Muster konnte ich seither auch bei völlig anderen Tiergruppen wie Haien und Muscheln beobachten.

Inseln und Tiefsee sind grundverschiedene Lebensräume, denen nur ein einziges Merkmal gemeinsam ist: Nahrungs-

knappheit. Diese muss also wohl dafür verantwortlich sein, dass sich die Körpergröße der Bewohner auf analoge Weise entwickelt. Auf den Inseln – zumindest den kleineren – können aus Platzgründen weniger Pflanzen wachsen, welche die Basis der Nahrungskette bilden. In beiden Lebensräumen gibt es möglicherweise nicht genug Gesamtkohlenstoff, um größere Populationen mit riesigen Individuen aufrechtzuerhalten. Sehr kleine Tiere sind aber gleichfalls benachteiligt, weil sie keine weiten Strecken zur Futtersuche bewältigen oder sich ausreichend Fettpolster für magere Zeiten anfressen können. Wären diese gegensätzlichen Selektionsdrücke gleich stark, würde sich die Körpergröße im mittleren Bereich einpendeln. Tatsächlich tendiert sie zu einem etwas niedrigeren Wert, weil der Nachteil eines sehr großen Körpers anscheinend überwiegt. Diese Überlegungen bieten somit eine plausible Erklärung für das Rätsel der teils gegensätzlichen Wachstumsmuster von Tiefseebewohnern.

Eines der eklatantesten Gegenbeispiele zum allgemeinen Verzweigungstrend bietet die Riesennassel. Der bis zu 36 Zentimeter große marine Verwandte der Gemeinen Rollassel ist der größte Vertreter der Ordnung Isopoda (Asseln) und eines der größten bekannten Krebstiere überhaupt. Größere Tiere können sich in der Regel schneller und energiesparender fortbewegen. Der französische Mediziner und Ökologe François Bourlière von der Faculté des Sciences de Paris schrieb schon 1975: »Die Tatsache, dass ein Pferd ein Gramm seines Körpergewichts über eine Strecke von einem Kilometer mit viel weniger Energieaufwand als eine Maus transportieren kann, ist ein weiterer Evolutionsvorteil eines großen Körpers.« Der Gigantismus bei der Riesennassel dürfte somit eine Anpassung sein, die ihr erlaubt, weite Areale bei der Futtersuche zu durchkämmen und sich dank ihrer Schnelligkeit

ein Monopol auf bestimmte Nahrungsquellen zu sichern. Am Meeresboden aufgestellte Köderfallen lockten innerhalb nur einer Stunde Dutzende dieser hungrigen Aasfresser an.

Nach einer Mahlzeit kommt die Riesenassel bis zu acht Wochen ohne Futter aus; in Aquarien überlebt die tennisballgroße, zu den Spiralschnecken zählende *Neptunea amianta* sogar bis zu drei Monate ohne Nahrung. Größere Tiere überstehen also längere Fastenperioden, weil sie mehr Fettreserven anlegen können. Eine weitere Eigenheit von *N. amianta* stellt möglicherweise ebenfalls eine Anpassung an nahrungsarme Lebensräume dar: Die Weibchen legen etwa 30 Zentimeter hohe ledrige Behälter mit Tausenden von Eiern im Inneren. Wenn die ersten jungen Schnecken schlüpfen, kriechen sie in dem Sack umher und fressen ihre noch ungeborenen Nestgenossen. Obwohl uns dieser Kannibalismus grausam erscheint, stellt er doch sicher, dass wenigstens eine Hand voll Jungschnecken in dem kargen Habitat ausreichend Nahrung zum Überleben findet.

Not macht erfinderisch

Manche Tiefseeorganismen haben unter dem Zwang, mit wenig Nahrung auszukommen, große Kreativität bewiesen. So sichern sich die Weibchen der Rutenangler (Ceratiidae) ihr Auskommen in einer kargen Umwelt mit jenem Organ, dem diese Fischgruppe ihren deutschen Namen verdankt. Es handelt sich um einen hellblauen Leuchtköder, der am Ende eines Stiels die Stirn der Fische überragt und entwicklungs geschichtlich aus den Dornen einer Rückenflosse entstanden ist. Das von symbiotischen Bakterien erzeugte Licht zieht Beutetiere an, die dann direkt ins Maul der Weibchen schwimmen. Staatsquallen der Gattung *Erenna* nutzen einen ähnlichen Trick. Sie senden Rotlicht aus – eine Seltenheit bei Tieren mit Biolumineszenz –, während sie mit ihren seltsam gebauten Tentakeln umherwedeln. Die Fangarme sehen dann Ruderfußkrebse täuschend ähnlich, die vielen Kleinfischen als Nahrung dienen (siehe Fotos S. 74/75 oben).

Biolumineszenz spielt in der stockdunklen Tiefsee auch bei der Vermehrung eine wichtige Rolle. Weil die Populationsdichte wegen des knappen Nahrungsangebots niedrig ist, haben die Tiere es schwer, einen Geschlechtspartner zu finden. Viele Fischarten nutzen deshalb biologisch erzeugtes Licht als Lockmittel. In seinem 2007 erschienenen Fachartikel mit der witzigen Überschrift »Soll ich beim Sex das Licht anlassen, Schatz?« behauptete Peter Herring von der University of Southampton (England), dass es für mindestens eine Fischfamilie »starke Indizien für [Biolumineszenz] als sexuelles Signal« gebe.

Bei den Tiefsee-Anglerfischen entstand aus der Not, einen Partner zu finden, eine höchst bizarre evolutionäre Novität. Die Männchen sind bedeutend kleiner als die Weibchen und saugen sich, nachdem sie mit Hilfe ihres ausgeprägten Geruchssinns eine Partnerin erschnüffelt haben, an ihr fest. Die daraufhin freigesetzten Hormone sorgen dafür, dass das Maul mit der Haut des Weibchens verschmilzt und sämtliche Körperteile mit Ausnahme der Geschlechtsorgane verküm-

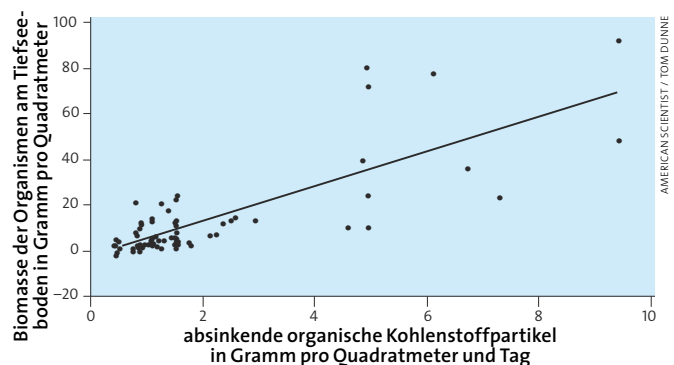
mern. Die festgewachsenen Männchen werden so zu Symbionten, die das Weibchen zeitlebens mit Spermien versorgen.

Die diversen Anpassungen an einen Lebensraum mit extremer Nahrungsknappheit bringen also eine biologische Vielfalt hervor, die Edward Forbes wohl ziemlich verblüfft hätte. Der Artenreichtum der Tiefsee übertrifft selbst den der Korallenriffe in den gemäßigten Zonen – etwa im Nordatlantik (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/2003, S. 56) – und reicht fast an die Biodiversität tropischer Flachwassergebiete heran. Dies belegte Howard Sanders (1921–2001) schon in einer 1968 veröffentlichten Vergleichsstudie zur Meeresbodenfauna. Im Bereich der Makrofauna könnte der Artenreichtum der Tiefsee neueren Forschungsberichten zufolge sogar mit dem der tropischen Regenwälder mithalten. Auf relativ kleiner Fläche koexistiert im Abyssal eine überraschend hohe Zahl an Spezies; auf einem Stück Meeresboden, nicht größer als ein kleiner Couchtisch, können leicht über 300 verschiedene Arten vorkommen.

Allerdings mutet die Biodiversität der Tiefsee in gewisser Weise paradox an. Der Artenreichtum von Korallenriffen und tropischen Regenwäldern spiegelt nach allgemeinem Dafürhalten das üppige Angebot an ökologischen Nischen und Ressourcen dort wider. Der ebene, kahle, schlammige Meeresgrund erscheint dagegen als monotoner Lebensraum, in dem sämtliche Organismen um dieselbe spärlich vorhandene Nahrung konkurrieren, die von oben herabregnet.

Doch der Schein trügt. Schon 1973 vertraten Sanders und sein Kollege J. Frederick Grassle, damals an der Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts), die Ansicht, der Meeresboden sei keineswegs so homogen, wie er aussieht, sondern enthalte in Wirklichkeit eine Unzahl winziger Lebensräume, die jeweils nur wenige Zentimeter groß sind. Nach der »Flickenteppich-Hypothese« der beiden Forscher bringt jedes dieser Mikrohabitate einen Satz einzigartiger Umweltcharakteristika hervor, die ihrerseits die Lebensgrundlage einer einmaligen Makrofauna bilden.

Seither sind weitere Details über die winzigen Lebensräume im Meeresboden ans Licht gekommen, die auch eine Antwort auf die Frage nach ihrem Ursprung geben. Demnach spielen größere Organismen wie Seeigel, Seesterne, See-



Die Biomasse der Tiefseefauna ist proportional zu der Menge an Kohlenstoff, die von der Meeresoberfläche herabsinkt – hauptsächlich in Form von organischen Kohlenstoffpartikeln.



Um sich im Lebensraum Tiefsee behaupten zu können, haben manche Tiere ungewöhnliche Merkmale oder Verhaltensweisen entwickelt (von links nach rechts): Die Riesenassel *Bathynomus giganteus* trotz der allgemeinen Regel, wonach Tiefseebewohner kleiner sind als ihre Verwandten in höheren Wasserschichten oder an Land. Der Aasfresser kann dank seiner Körpergröße nicht nur schneller die dünn gesäten Kadaver erreichen, sondern hat auch Platz, um Fettreserven für die unvermeidlichen Fastenperioden anzulegen. Als biologische Seltenheit

gurken, Würmer und Krabben eine entscheidende Rolle: Indem sie Löcher, Röhren und Hügel anlegen oder über das Sediment kriechen, verändern sie dessen kleinräumige Topografie.

Das wirkt sich auch auf die Verteilung des Meeresschnees aus: Er sammelt sich – analog zum normalen Schnee auf dem Festland – bevorzugt in Vertiefungen an. Zudem kann der von oben herabsinkende Kohlenstoff auch unterwegs schon verklumpen, was zur ungleichmäßigen Verteilung am Meeresgrund beiträgt. So sondert eine Larvacea genannte Klasse der Manteltiere, die zum Zooplankton gehört, eine schleimige Substanz ab und bildet daraus ein Gehäuse, mit dem sie Nahrung herbeistrudelt. Diese Gehäuse verkleben leicht miteinander und werden von den Tieren alle vier Stunden

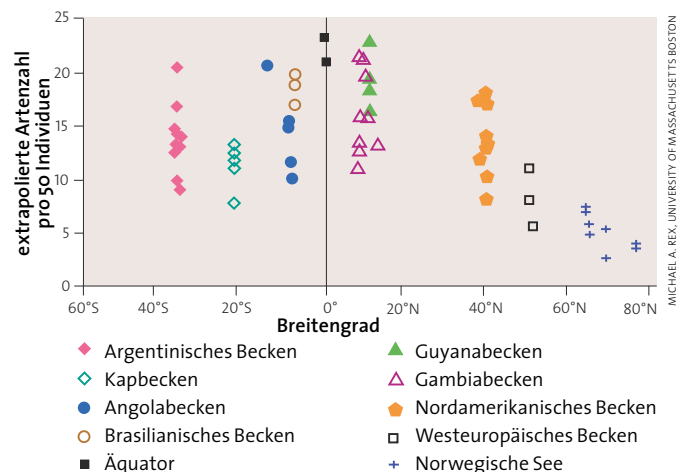
abgestoßen. Sie bilden dann mit anderen kohlenstoffreichen Teilchen zusammen größere Klumpen und gelangen so als geballter Leckerbissen zum Meeresgrund. Weil in den Tiefseeregionen im Unterschied zum Flachwasser nur selten starke Strömungen auftreten, bleiben die abyssalen Mikrohabitate ziemlich lange bestehen.

Beziehung zwischen Nahrungsangebot und Artenzahl

Die ungleiche Nahrungsverteilung in der Tiefsee fördert die biologische Vielfalt aber auch in größerem Maßstab. 1973 veröffentlichte Rex die erste Untersuchung, aus der hervorging, auf welche komplexe Weise der Artenreichtum mit der Tiefe variiert. Demnach gilt von flachen Gewässern bis zu Ozeanen, deren Boden 2000 bis 3000 Meter unter dem Mee-

Abnahme der Biodiversität mit dem Breitengrad

Wie bei den landlebenden Tieren ist auch in der Tiefsee die Artenvielfalt in den Tropen am höchsten und nimmt zu den Polen hin ab. Als Erster belegte vor 18 Jahren der Meeresbiologe Michael A. Rex von der University of Massachusetts in Boston diesen generellen Trend für Schnecken (linke Grafik). Manche Forscher sehen den Grund in der Temperaturabnahme. In der Tiefsee ändert sich die Temperatur jedoch kaum mit der geografischen Breite (Mitte). Dagegen geht die Planktonproduktion an der Meeresoberfläche, also die Nahrungsmenge, vom Äquator zu den Polen hin zurück (ganz rechts).





JUSTIN MARSHALL, QUEENSLAND BRAIN INSTITUTE



MONTEREY BAY AQUARIUM RESEARCH INSTITUTE

verwenden Staatsqualen der Gattung *Ereunetes* Rotlicht in ihren Tentakeln zum Beutefang; die leuchtenden Fangarme sehen dann wie Ruderfußkrebse aus, die Hauptspise vieler Kleinfische. Auch weibliche Rutenangler (aus der Familie der Ceratiidae) locken ihre Beute mit Leuchtködern, deren hellblaues Licht von symbiotischen Bakterien erzeugt wird. Die Weibchen der Spiralschnecke *Neptunea amianta* legen in etwa 30 Zentimeter hohen Säcken einige tausend Eier ab, von denen das Gros als Futter für die Jungtiere dient, die als erste schlüpfen.

resspiegel liegt, eine lineare Beziehung: Je tiefer sie sind und je weniger Kohlenstoff am Grund ankommt, desto mehr Arten leben dort. Dann allerdings kehrt sich der Trend um, und die Artenvielfalt beginnt rapide mit der Tiefe abzunehmen. Dieser Zusammenhang, wonach die Biodiversität bei mittlerem Nahrungsangebot am größten ist, findet sich auch bei zahlreichen anderen Lebensräumen und Organismen.

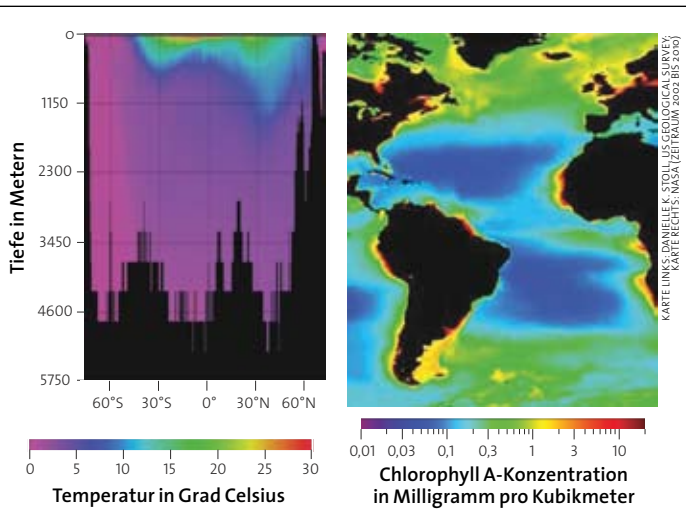
Seit den 1970er Jahren sind etliche Artikel über die möglichen Ursachen dieses Phänomens erschienen. Die wahrscheinlichste Erklärung für den Rückgang der Artenvielfalt bei sinkendem Nahrungsangebot ab einer gewissen Tiefe ist der so genannte Allee-Effekt, benannt nach dem amerikanischen Zoologen und Ökologen Warder Clyde Allee (1885–1955). Demnach können bei Nahrungsmangel pro Art weni-

ger Individuen überleben und Nachwuchs produzieren. Unterschreitet das Futterangebot einen kritischen Wert, genügt eine zufällige Umweltstörung, dass einzelne, bereits dezimierte Arten aussterben. Die Biodiversität geht dann also generell zurück.

Allerdings bleibt es immer noch ein Rätsel, warum auch ein großes Nahrungsangebot weniger Arten hervorbringt. Insgesamt gibt es fast zwei Dutzend Hypothesen zur Deutung dieses Phänomens, die sich auf die unterschiedlichsten Daten stützen. Anfang 2010 haben Jim Barry vom Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI) in Moss Landing (Kalifornien) und ich eine Untersuchung veröffentlicht, die vielleicht einen überzeugenden Erklärungsansatz liefert. In den Schluchten der Tiefsee – so genannten submarinen Canyons – kann sich Nahrung am Fuß der steilen Wände ansammeln. Wir stellten fest, dass Vertreter der Megafauna wie Seeigel, Seegurken, Krabben und Seesterne, die sich relativ rasch bewegen können, sehr schnell und zahlreich zu diesen Stellen strömen und das Futter für sich beanspruchen.

Weil die Tiere in großen Scharen auftreten, wirbeln sie das Sediment stark auf. Das beeinträchtigt die wesentlich kleinere lokale Makrofauna. Viele ihrer Vertreter, vor allem die im Sediment lebenden Röhrenbewohner mit ihren leicht zerstörbaren Schutzhüllen, gehen zu Grunde. Da es in flacheren Gewässern mit einem höheren Kohlenstoffangebot auch mehr Mitglieder der Megafauna gibt, leidet die Makrofauna hier besonders stark – und wird entsprechend dezimiert.

Beobachtungen in der Tiefsee können außer der Inselregel noch weitere Phänomene in anderen Lebensräumen erklären. So ist die biologische Vielfalt in den Tropen am höchsten und nimmt zu den Polen hin ab. Dieser Breitengradient





Die reichhaltige Artenvielfalt der abyssalen Makrofauna illustrieren diese Tiere, die in einem Sedimentbohrkern von nur sieben Zentimeter Durchmesser und zehn Zentimeter Länge enthalten waren. Auf der Fläche eines kleinen Couchtischs können mehr als 300 Arten vorkommen – fast so viele wie in Korallenriffen und im Regenwald.

im Artenreichtum (LSDG nach englisch *latitudinal species diversity gradient*) lässt sich bei vielen Lebewesen auf dem Festland, im Meer und in Süßwasserökosystemen beobachten. Allerdings sind die Erklärungen dafür genauso unterschiedlich und zahlreich wie die Organismen, die dieses Muster zeigen. Manche Theorien führen das Phänomen auf die geringere klimatische Stabilität, das rauere Klima, die niedrigeren Temperaturen, ein dürftigeres Nahrungsangebot oder andere Artbildungs- beziehungsweise -aussterberaten in hohen Breiten zurück; aber auch Parasitismus, Räuber-Beute-Beziehungen und Konkurrenz werden dafür verantwortlich gemacht.

Im Jahr 1993 wiesen Rex und sein Team als Erste auch einen Breitengradienten im Artenreichtum in der Tiefsee nach. Demnach ist bei Mollusken und Krebstieren im Atlantik die biologische Vielfalt in der Äquatorregion deutlich höher als in Polnähe. Spätere Forschungsarbeiten ergaben das gleiche Muster bei Foraminiferen. Demnach kann der LSDG nichts mit der Temperatur zu tun haben, weil diese in der Tiefsee zwischen Äquator und Polen um maximal vier Grad Celsius variiert und über weite Bereiche der Ozeane ziemlich konstant bleibt. Was sich mit dem Breitengrad ändert, ist jedoch, wie viel Plankton an der Meeresoberfläche vorkommt und pro Zeiteinheit neu entsteht.

Blicke in die nahe und ferne Vergangenheit

Dass dies offenbar eine große Rolle spielt, zeigt die Entwicklung der Muschelkrebse (Ostrakoden) in der tropischen Tiefsee während der vergangenen 500 000 Jahre. Moriaki Yasuhara und sein Team von der Smithsonian Institution in Washington untersuchten sie anhand von Bohrkernen aus dem Ocean Drilling Program, einem internationalen Projekt

zur Erforschung der Meeresböden durch Tiefseebohrungen. In der vergangenen halben Jahrmillion gab es vier große Klimazyklen in Form von Eiszeiten (Glazialen) und Zwischeniszeiten (Interglazialen), durch die sich Faktoren wie Temperatur, Meeresströmungen und Planktonbildung in den Weltmeeren radikal veränderten. Bei den Ostrakoden ging die Artenvielfalt in der tropischen Tiefsee zu Beginn der Vereisungen – als die biologische Produktivität an der Meeresoberfläche einbrach – schlagartig zurück und blieb während der gesamten Kältephase niedrig. Als Folge davon verschwand der Breitengradient im Artenreichtum. Während der Interglaziale entwickelten die Muschelkrebse dagegen eine enorme Vielfalt an Arten.

Auch über kürzere Zeitspannen – in der Größenordnung von mehreren Jahren wie beim zyklischen Wechsel zwischen El Niño und La Niña, der bekannten Klimaschaukel im tropischen Pazifik – ändert sich das Muster der Planktonbildung an der Meeresoberfläche. Seit 1989 wird eine Stelle in 4000 Meter Tiefe vor der kalifornischen Küste bei Santa Barbara durchgängig überwacht. Bei der Auswertung der Daten von dieser so genannten Station M erkannten Henry Ruhl und Ken Smith vom MBARI, dass parallel zu Temperaturschwankungen im Oberflächenwasser, hervorgerufen durch El Niño und La Niña, auch die Menge an absinkendem Phytoplankton variierte: Sie stieg bei Erwärmung und verringerte sich bei Abkühlung. Synchron dazu änderte sich bei der Mega- und Makrofauna die Artenvielfalt – ein weiterer Beleg für den Zusammenhang zwischen der Biodiversität des Abyssals und der biologischen Produktion an der Meeresoberfläche.

Lebensräume mit stark eingeschränkter Zufuhr an Nahrung oder Energie liefern schließlich auch Erkenntnisse über biologische Kohlenstoffkreisläufe in der fernen Vergangen-

heit. Vor 200 bis 100 Millionen Jahren fand im Zuge der so genannten mesozoischen marinen Revolution (MMR) die wohl größte Umgestaltung des Lebens in der Erdgeschichte seit der kambrischen Artenexplosion zu Beginn des Paläozoikums statt. 1995 brachte Richard Bambach von der Virginia Polytechnic Institute and State University in Blacksburg diese Entwicklung mit einem stark steigenden Nahrungsbedarf der Meeresbewohner in Verbindung. Dabei stützte er sich auf fossile Zeugnisse, wonach damalige Räuber zahlreicher, größer, schneller und effizienter (Beispiel: Schalenbohrer) wurden, während Beutetiere im Gegenzug dickere Gehäuse entwickelten oder sich tiefer in den Boden eingruben. Voraussetzung dafür muss eine gesteigerte Biomasseproduktion in den Ozeanen gewesen sein. Sie bot die energetische Grundlage für den Innovationsschub bei der mesozoischen marinen Revolution.

In einer aktuellen Veröffentlichung präsentierte Seth Finnegan von der Stanford University gemeinsam mit mir und weiteren Kollegen einen unabhängigen Beleg dafür. Grundlage war eine Analyse des mutmaßlichen Energie- beziehungsweise Nahrungsbedarfs im Lauf der Jahrtausende für eine Tiergruppe, deren Fossilien zu den häufigsten überhaupt zählen: Schnecken (Gastropoda). Dazu verknüpften wir Informationen über das Artenspektrum fossiler Meereschnecken sowie Erkenntnisse über die heutige Verbreitung der Tiere in Flachmeeren und der Tiefsee mit physiologischen Daten lebender Arten sowie Computerprogrammen zur Bestimmung des Energieverbrauchs – und damit der erforderlichen Energiemenge zur Aufrechterhaltung des Stoffwechsels. Nach Formeln, die schon seit einem Jahrhundert bekannt sind, verraten Körpertemperatur und Größe eines Tiers viel über seinen Grundumsatz. Große Warmblüter benötigen demnach mehr Energie als kleine wechselwarme Organismen. Der energetische Gesamtbedarf einer Gemeinschaft von Lebewesen ergibt sich ganz einfach durch Multiplikation des Pro-Kopf-Bedarfs mit der Anzahl aller vorkommenden Individuen.

Um diesen Wert für Lebensgemeinschaften prähistorischer Gastropoden zu bestimmen, rechneten wir die von modernen Exemplaren bekannten Daten hoch. Beim Vergleich der Schneckenarten vor und nach der MMR ergab sich ein Anstieg des Pro-Kopf-Umsatzes auf etwa das Zweieinhalbfache, was größtenteils an der Zunahme der Körpergrößen lag. Rechnet man das vermehrte Auftreten von Räufern hinzu, deren Energiebedarf viel höher ist, müsste die durchschnittliche Stoffwechselrate sogar noch stärker zugenommen haben. Diese Steigerung haben wir sowohl für die nahrungsarme Tiefsee als auch für Küstengewässer nachgewiesen, wo viel Plankton gebildet wird. Demnach muss die Produktivität der Ozeane vor 200 bis 100 Millionen Jahren tatsächlich, wie schon von Bambach vermutet, durchweg angestiegen sein.

Während ich hier über die Fortschritte bei der Erkundung der Tiefsee berichte, erlebt die Erde gerade eine weitere Phase folgenschwerer Umbrüche. Durch die massive Emission von

Treibhausgasen haben wir Menschen nicht nur das Klima auf unserem Planeten, sondern auch den Kohlenstoffkreislauf in den Meeren verändert. Neueren Untersuchungen zufolge ist die Phytoplanktonproduktion in manchen Meeresregionen auf die Hälfte gesunken und in anderen dafür gestiegen. Weltweit hat sie nach einem jüngsten Bericht der Arbeitsgruppe von Daniel Boyce von der kanadischen Dalhousie University in Halifax in den vergangenen 100 Jahren deutlich abgenommen. Diese Abnahme und Umverteilung des Kohlenstoffs an der Meeresoberfläche dürfte sich auch auf die Tiefsee auswirken. Dabei sind Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf nur eine von vielen Bedrohungen der Weltmeere. Die Kombination aus Überfischung, Verschmutzung, Ölbohrungen, Erwärmung und Übersäuerung könnte sich als gefährlicher Cocktail erweisen.

Trotz der Extrembedingungen im Abyssal – niedrige Temperaturen, hoher Druck, ewige Finsternis und Nahrungsmangel – ist es den Tiefseeorganismen gelungen, sich durch Anpassung in ihrem unwirtlichen Lebensraum zu behaupten. Doch fragt sich, ob sie abgehärtet genug sind, auch mit den Veränderungen durch den Menschen fertigzuwerden. ~

DER AUTOR



Craig R. McClain ist stellvertretender Direktor des National Evolutionary Synthesis Center in Durham (North Carolina). Er befasst sich seit 13 Jahren mit Tiefseeforschung und hat an Dutzenden von Expeditionen in die Antarktis und die abgelegensten Gebiete von Pazifik und Atlantik teilgenommen. McClain ist auch der Chefredakteur von »Deep-Sea News«, einem preisgekrönten Wissenschaftsblog – zu finden unter der Adresse www.deepseanews.com.

QUELLEN

- Boyce, D.G. et al.:** Global Phytoplankton Decline over the Past Century. In: *Nature* 466, S. 591–596, 2010
- Finnegan, S. et al.:** Escargot through Time: An Energetic Comparison of Marine Gastropod Assemblages before and after the Mesozoic Marine Revolution. In: *Paleobiology* 37, S. 252–269, 2011
- Herring, P.J.:** Sex with the Lights on? A Review of Bioluminescent Sexual Dimorphism in the Sea. In: *Journal of the Marine Biological Association of the UK* 87, S. 829–842, 2007
- McClain, C.R. et al.:** The Island Rule and the Evolution of Body Size in the Deep Sea. In: *Journal of Biogeography* 33, S. 1578–1584, 2006
- Ruhl, H.A., Smith, K.L.:** Shifts in Deep-Sea Community Structure Linked to Climate and Food Supply. In: *Science* 305, S. 513–515, 2004
- Yasuhara, M., Cronin, T.M.:** Climatic Influences on Deep-Sea Ostracode (Crustacea) Diversity for the Last Three Million Years. In: *Ecology* 89, S. 53–65, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121014

© American Scientist
www.americanscientist.org

Wie Supercomputer die Forschung prägen

Wissenschaftler nutzen heute Höchstleistungsrechner als eigenständiges Forschungsmittel – als virtuelles Mikroskop, Teleskop oder Labor, als Ersatz für einen Beschleuniger, den ganzen Kosmos oder eine Zeitmaschine. Computer-gesteuerte Simulationen sind aus kaum einem Gebiet mehr wegzudenken.

Von Achim Bachem und Thomas Lippert

In fast allen Forschungsgebieten werden heute Supercomputer eingesetzt, von der Astrophysik über die Ingenieurwissenschaften bis zur Hirnforschung. Als weitgehend eigenständiges Hilfsmittel sind sie längst unersetzbar geworden. Darüber hinaus bestimmen sie in zunehmendem Maß ganze Forschungsrichtungen.

Ein Beispiel aus der theoretischen Physik. Wie ist die Masse der Protonen und Neutronen, welche die Atomkerne bilden, und verwandter Teilchen zu erklären? Die Lösung dieses Rätsels ist – neben anderen – der Menschheit immerhin so wichtig, dass sie für ein geeignetes Experimentiergerät, den Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) am euro-

päischen Forschungszentrum CERN bei Genf, ungefähr drei Milliarden Euro aufzuwenden bereit war (Spektrum der Wissenschaft 5/2011, S. 86).

Seit 2008 gibt es eine korrekte Antwort auf diese Frage. Geliefert wurde sie nicht von einem Experiment, sondern mit Hilfe einer Simulation auf dem Supercomputer Jugene des Forschungszentrums Jülich, einem Petaflops-Rechner des Herstellers IBM (Bild rechts). Das Gerät ist auch nicht wirklich billig, aber mit etwas über 50 Millionen Euro deutlich günstiger als der LHC und vor allem auch für eine Vielzahl anderer Zwecke verwendbar. Das griechische Präfix »Peta« bedeutet 10^{15} (eine Billion), »flops« steht für *floating point operations per second* (Gleitkommaoperationen pro Sekunde), die elementaren Rechenakte wie zum Beispiel Additionen oder Multiplikationen von zwei 16-stelligen Zahlen, aus denen sich jede Simulation zusammensetzt.

AUF EINEN BLICK

RECHNER DER SPITZENKLASSE

1 Die Leistung der schnellsten Computer ist in jedem der letzten drei Jahrzehnte ungefähr um den Faktor 1000 angestiegen. Stand der Technik sind **einige Billionen (10^{15}) Rechenschritte pro Sekunde**.

2 Viele wissenschaftliche Probleme können durch diese enormen Rechenfähigkeiten überhaupt erst angegangen werden: **Masse der Nukleonen, Entstehung von Galaxien, Weltklima im Detail, Optimierung von Turbinen, Simulation des menschlichen Gehirns**.

3 Unweigerlich wirken die technischen Möglichkeiten auf die Forschung zurück: Wissenschaftler stellen bevorzugt Fragen, auf die sie von einem **Supercomputer** eine Antwort erwarten dürfen.

Rätselhafte Protonenmasse

Worum geht es genau? Materie ist aus Atomen aufgebaut, bestehend aus einem Kern und Elektronen, die um ihn kreisen. Der Kern enthält Protonen und Neutronen, die man zusammen als Nukleonen bezeichnet. Jedes von ihnen besteht wiederum aus drei Quarks. Doch deren Massen machen zusammen nur etwa fünf Prozent der Masse eines Nukleons aus. Das Ganze ist also weit schwerer als die Summe seiner Teile. Wie ist das möglich? Des Rätsels Lösung findet sich in



FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH

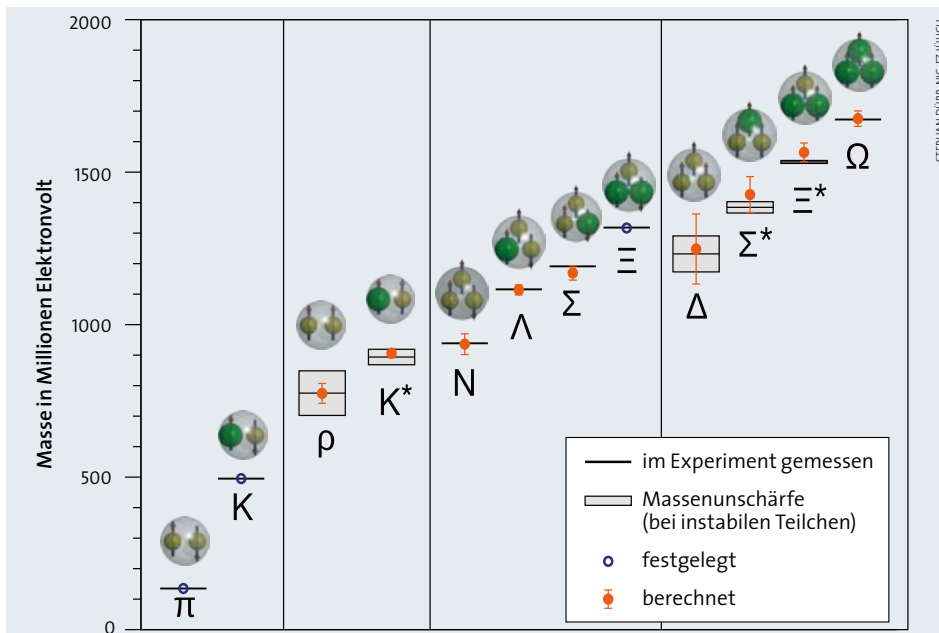
der berühmten Formel $E = mc^2$ von Albert Einstein: Energie und Masse sind zueinander proportional, und etwa 95 Prozent der Nukleonenmasse haben letztendlich ihren Ursprung in der Gesamtenergie des Systems aus Quarks und den zwischen ihnen ausgetauschten Gluonen, den Vermittlern der starken Wechselwirkung. Diese Kraft bewirkt, dass Quarks immer in Paaren oder zu dritt als Einheiten wie Pionen und Protonen auftreten, aber niemals allein. Theoretisch wird die starke Wechselwirkung mit Hilfe einer Quantenfeldtheorie beschrieben, der Quantenchromodynamik, die Anfang der 1970er Jahre entwickelt wurde.

Auf die korrekte Berechnung der Protonenmasse musste die Welt jedoch noch mehr als 35 Jahre warten, denn diese Aufgabe überstieg die Fähigkeiten der besten Mathematiker und der stärksten Computer. Der Hauptgrund: Gluonen können sich im Gegensatz zu Photonen, den Vermittlern der elektromagnetischen Kraft, auch gegenseitig anziehen. Diese »Selbst-Wechselwirkung« macht die Berechnungen sehr kompliziert. Obendrein muss man im Formalismus einer Quantenfeldtheorie nicht nur die real vorhandenen Teilchen berücksichtigen, sondern auch so genannte virtuelle Teilchen, die gleichsam spontan aus dem Nichts entstehen, wechselwirken und wieder vergehen – ein Effekt, der letztendlich mit Heisenbergs Unschärferelation gedeutet werden kann.

Im Jahr 2008 gelang einem internationalen Team unter Leitung des Physikers Zoltán Fodor von der Universität Wup-

Jugene, der schnellste Rechner des Jülich Supercomputing Centre, enthält rund 72 000 Prozessoren (Einzelrechner), die in 72 wassergekühlten Schränken untergebracht sind. Die Festplatten können 7 Petabyte (10^{15} Byte) aufnehmen – den Speicherplatz von mehr als einer Million DVDs – und sind wiederum an einen Magnetbandspeicher mit 30 Petabyte Kapazität angeschlossen.

pertal der endgültige Durchbruch: Mit Hilfe von Jugene berechneten die Forscher die Massen von Nukleonen und anderen Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind. Jugene hatte damals bereits eine Rechenleistung von 180 Teraflops (Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde) und erreichte durch einen weiteren Ausbau Mitte 2009 als erster Rechner in Europa ein Petaflops (10^{15} Rechenoperationen pro Sekunde). Nur dank dieser enormen Geschwindigkeit konnten Fodor und seine Mitarbeiter die komplizierten Gleichungen für die Felder der Quarks und Gluonen auf genügend feinen Raumzeitgittern berechnen. Indem sie den Abstand der Gitterpunkte sukzessive verkleinerten, kamen die Forscher der kontinuierlichen Raumzeit immer näher. Als Ergebnis der bis dahin wohl aufwändigsten Rechnung in der Geschichte der Forschung erhielten sie schließlich Werte für die Massen der Nukleonen, die nahezu perfekt mit den im Experiment gemessenen übereinstimmen (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 16). Das ist eine überzeugende Bestätigung der



STEPHAN DÜRR, NIC FZ/JÜLICH

Am Ende der aufwändigsten Berechnung aller Zeiten stehen einige wenige Zahlenwerte: die Massen der Hadronen (Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen). Die Parameter der Quantenchromodynamik wurden so eingestellt, dass die Rechnung die experimentell bestimmten Massen der drei Hadronen π , K und Ξ reproduzierte. Daraufhin ergaben sich für die Massen der anderen leichten Hadronen Werte, die den gemessenen bemerkenswert nahe kommen – eine glänzende Bestätigung der Theorie mittels Supercomputern.

Quantenchromodynamik – so sah es auch Frank Wilczek, einer ihrer drei Gründerväter, und die Redakteure der renommierten Fachzeitschrift »Science« wählten die entsprechende Publikation in die Top-Ten-Liste der wissenschaftlichen Durchbrüche des Jahres 2008.

Nicht nur, wenn drei Quarks ein Nukleon bilden, sondern auch, wenn sich mehrere Nukleonen zu einem Atomkern oder mehrere Atomkerne zu einem größeren zusammenschließen, spielt die starke Kernkraft die entscheidende Rolle – und treibt den Rechenaufwand in die Höhe. Der elementarste unter diesen Prozessen ist die Fusion von vier Nukleonen zu einem Helium-4-Atomkern (${}^4\text{He}$, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen), auch Alphateilchen genannt. Der Energieüberschuss dieser Kernreaktion ist es, der die Sonne strahlen lässt und damit die Energie für alles Leben auf der Erde bereitstellt. Die Atomkerne der meisten anderen chemischen Elemente sind ebenfalls durch Fusionsprozesse im Inneren von – längst erloschenen – Sternen entstanden; die Einzelheiten hat der britische Astrophysiker und Sciencefiction-Autor Fred Hoyle (1915–2001) bereits 1954 analysiert.

Warum es genügend Kohlenstoff gibt

Der nächste und kritischste Schritt nach der Fusion von Wasserstoff zu Helium ist die Synthese des häufigsten Kohlenstoffisotops (${}^{12}\text{C}$) aus drei Alphateilchen (Bild rechts). Zwei von ihnen können sich zu einem Beryllium (${}^8\text{Be}$)-Kern vereinigen. Dieser hat allerdings nur eine Lebensdauer von $2,6 \cdot 10^{-16}$ Sekunden. Während dieser kurzen Zeit muss ihn ein drittes Alphateilchen treffen und mit ihm zu einem stabilen ${}^{12}\text{C}$ verschmelzen. Darüber hinaus haben die beiden Reaktionspartner zusammen wesentlich mehr Energie als ein ${}^{12}\text{C}$ -Kern im Grundzustand und würden deshalb in den allermeisten Fällen wieder auseinanderfliegen, wenn es nicht einen angeregten Zustand des Kohlenstoffkerns mit fast perfekt passender Energie gäbe. (Üblicherweise beziehen sich

die Bezeichnungen »Grundzustand« und »angeregter Zustand« auf die Elektronenhülle eines Atoms; hier sind entsprechende Zustände des Atomkerns selbst gemeint.) Hoyle hat ihn 1954 postuliert, wenige Jahre später wurde er am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena experimentell nachgewiesen – aber für die theoretische Kernphysik blieb er mehr als 50 Jahre ein wahres Mysterium.

Frühe Berechnungen legten gewisse, experimentell gestützte Annahmen für die Kräfte zwischen zwei oder drei Nukleonen zu Grunde. Mit ihnen gelang es, fast alle Energieniveaus (angeregten Zustände) der Kerne bis zur Atomzahl 13 präzise zu bestimmen – nicht aber den Hoyle-Zustand. Man musste »von Anfang an« (*ab initio*) rechnen, das heißt nur die Gleichungen der Quantenchromodynamik zu Grunde legen und sonst gar nichts. Steven Weinberg (Physik-Nobelpreis 1979, siehe auch Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 34) stellte 1991 eine Methode dafür bereit; diese hat sich seitdem für Kerne mit bis zu vier Nukleonen zu einem Präzisionsinstrument entwickelt.

Für größere Nukleonenzahlen musste die Welt allerdings auf größere Rechenkapazität warten. Evgeny Epelbaum und Hermann Krebs aus Bochum, Dean Lee aus Raleigh (North Carolina) sowie Ulf Meißner aus Bonn entwickelten die Theorie von Weinberg weiter. Nach vier Millionen Prozessorstunden auf Jugene fanden die Forscher neben dem Grundzustand und dem ersten angeregten Zustand des Kohlenstoffkerns einen weiteren angeregten Zustand mit genau den richtigen Quantenzahlen und der richtigen Energie – den lange gesuchten Hoyle-Zustand. Diese Arbeiten zeigen nun einen Weg auf, die Erzeugung auch schwererer Elemente in den Sternen ohne weitere Annahmen zu berechnen und darüber hinaus die Grenzen der Stabilität für neutronen- oder protonenreiche Kerne zu finden.

Unversehens wird nun der Supercomputer zu einem Instrument zur Beantwortung philosophischer Fragen. Die fun-

damentalen physikalischen Theorien enthalten bestimmte Parameter. Wären deren Zahlenwerte geringfügig anders, als sie in unserem Universum realisiert sind, dann könnten wir nicht existieren. Weinberg selbst hat das für die kosmologische Konstante ausgeführt, welche die Ausdehnung oder Kontraktion unseres Universums bestimmt (Spektrum der Wissenschaft 11/2008, S. 38). Die schiere Tatsache, dass es uns gibt, erlaubt Aussagen über fundamentale Parameter der Physik: Das ist das »anthropische Prinzip« (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 34; unter demselben Namen gibt es auch die unwissenschaftliche Aussage, ein »intelligenter Designer« habe die Werte der Parameter so gewählt, dass wir existieren können).

Dem anthropischen Prinzip auf der Spur

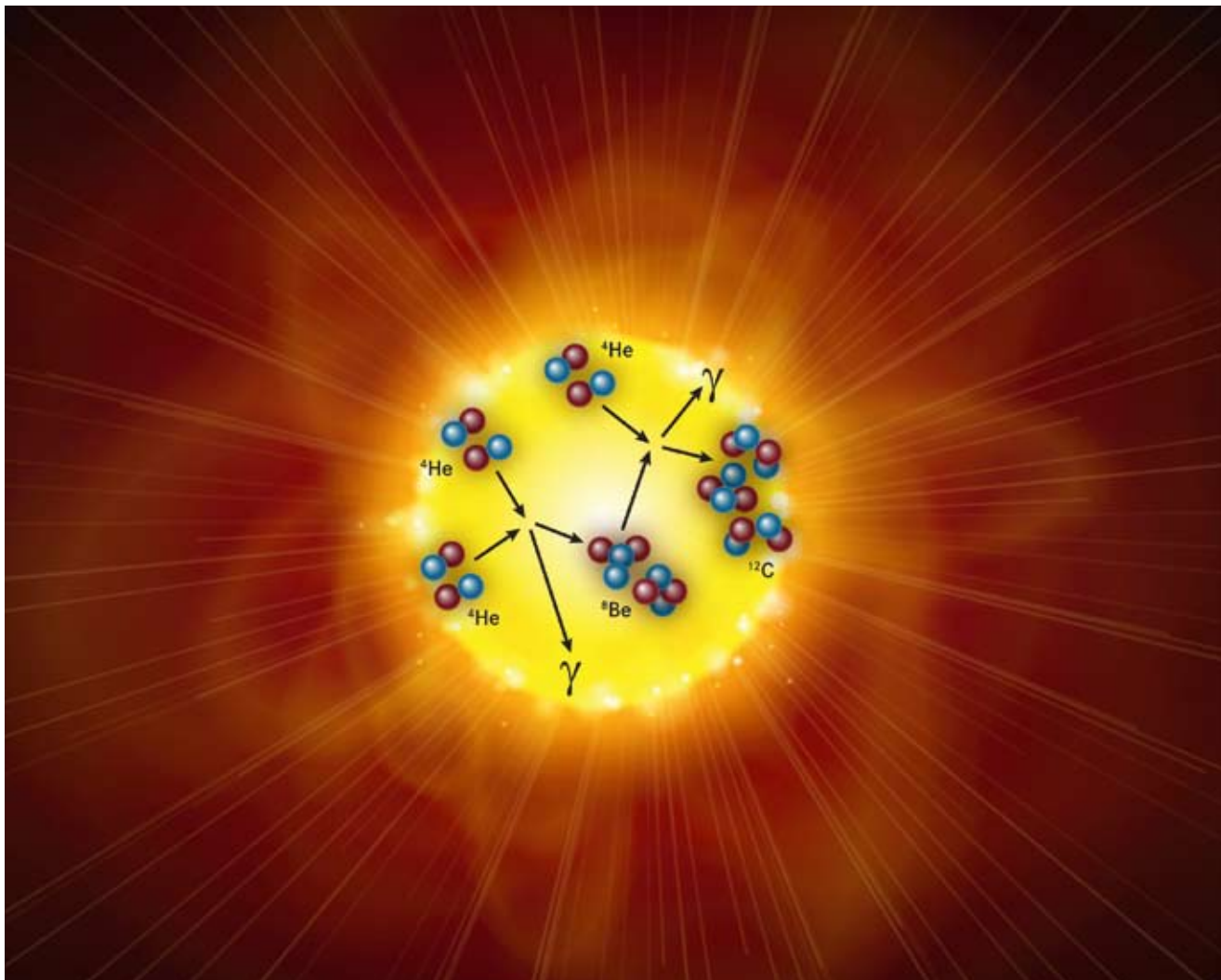
Ein Paradebeispiel für die Gültigkeit des anthropischen Prinzips ist der Hoyle-Zustand: Gäbe es ihn nicht, gäbe es nicht genug Kohlenstoff und daher auch kein Leben, wie wir es kennen. Aber ist dem wirklich so? Um dies zu überprüfen, kann man fundamentale Parameter, in diesem Fall die Massen der leichten Quarks, ein wenig verändern und nachsehen, ob dabei die sehr speziellen Bedingungen für die Syn-

these des Kohlenstoffs erhalten bleiben oder nicht. Letzteres wäre eine spektakuläre Bestätigung des anthropischen Prinzips. Erst seit neuester Zeit, mit Hilfe von Supercomputern, ist diese faszinierende Frage überhaupt behandelbar. Die Gruppe von Ulf Meißner ist nahe an einer Antwort.

Eine weitere Säule der modernen Naturwissenschaft, die mit Hilfe von Supercomputern auf den Prüfstand gestellt werden kann, ist das kosmologische Standardmodell. Sein Ziel ist, in konsistenter Weise zu beschreiben, wie sich das Universum seit seinen Anfängen entwickelt hat, und vor allem, wie sich nach der Trennung von Strahlung und Materie, etwa 300 000 Jahre nach dem Urknall, die heutigen Galaxien und Sterne bildeten.

Das kosmologische Standardmodell, auch Konkordanzmodell genannt, postuliert neben der bekannten »baryonischen« Materie eine bislang unbekannte und im Experiment

Ein Kohlenstoffatom ^{12}C entsteht, wenn zwei Alphateilchen (^4He) sich zu einem instabilen Beryllium (^8Be)-Kern vereinigen und dieser dann rechtzeitig von einem weiteren Alphateilchen getroffen wird. Dabei wird Energie in Form von Gammaquanten (γ) frei.



GRAFIK: FORSCHUNGSZENTRUM LÜDICH; HINTERGRUND: FOTOLIA / ULADIMIR BAKIJNOVIC

noch nicht nachgewiesene »Dunkle Materie«, die mit elektromagnetischer Strahlung, insbesondere Licht, nicht wechselwirkt, sich aber gleichwohl über die Wirkung ihrer Schwerkraft bemerkbar macht.

Nach der Entkopplung von Licht und Materie waren die Partikel der Dunklen Materie nahezu gleichförmig im Kosmos verteilt, so die Aussage des kosmologischen Standardmodells. Unter der Wirkung ihrer gegenseitigen Gravitationsanziehung ballten sie sich zu so genannten Halos zusammen. Deren Schwerkraft wirkte auch auf die gewöhnliche Materie, mit dem Effekt, dass sich in den Zentren der Halos die Galaxien bildeten. Damit macht das kosmologische Standardmodell eine Vorhersage, die sich im Prinzip durch Beobachtungen überprüfen lässt.

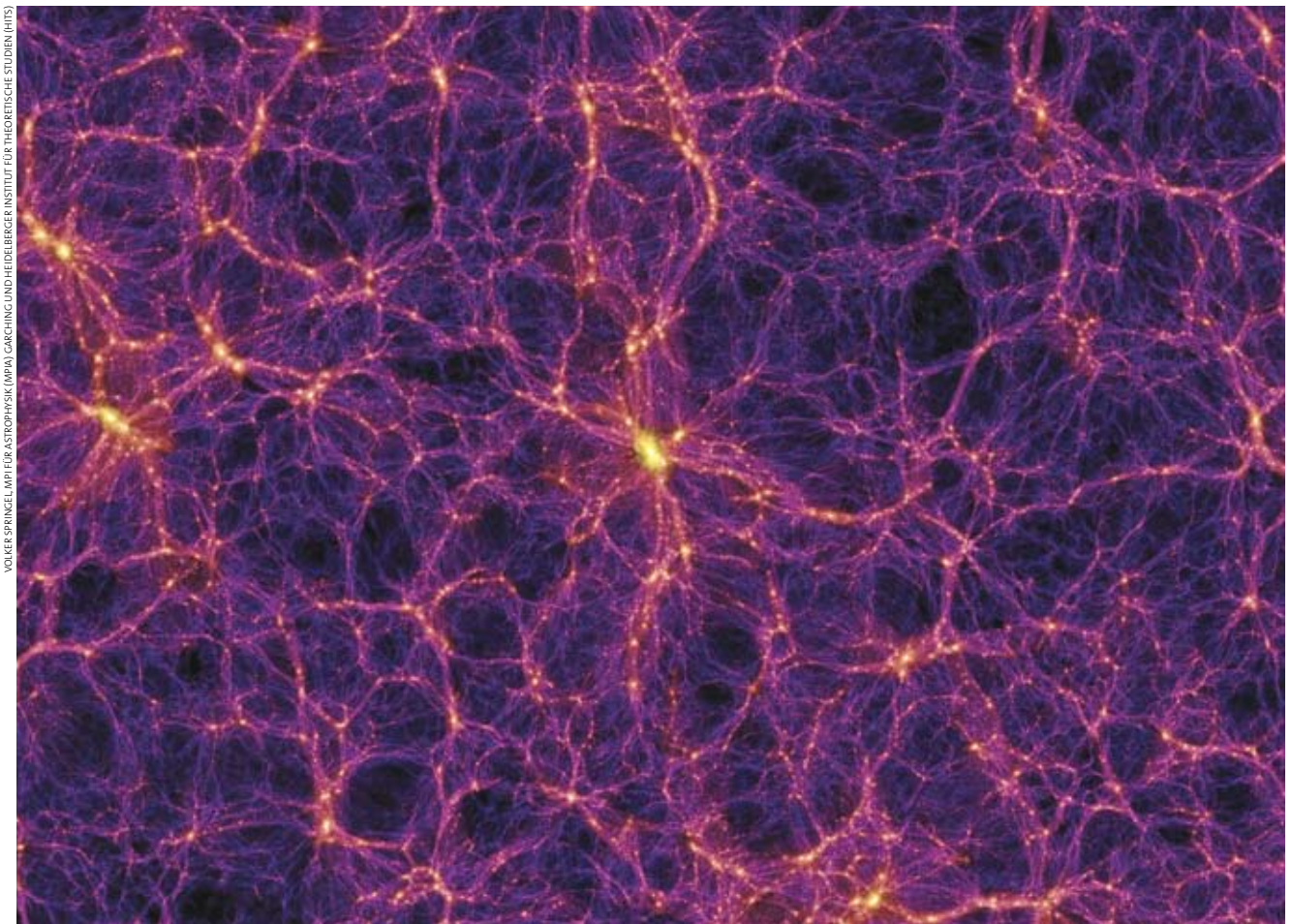
Eine solche Beobachtung findet zurzeit statt (Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 38). Weltweit vermessen Astronomen die räumlich-zeitliche Verteilung der Galaxien. Mit der hohen Infrarotempfindlichkeit der Spektrografen des »Sloan Digital Sky Survey III« können sie beispielsweise in extrem weit entfernte Milchstraßensysteme blicken, deren Licht auf

Grund der kosmischen Expansion hin zum langwelligen, roten Bereich des Spektrums verschoben ist. Allein im Teilprojekt »Baryon Oscillation Spectroscopic Survey« (BOSS) sollen bis 2014 die Spektren von 1,4 Millionen Galaxien und 160 000 Quasaren erfasst werden.

Nun ist die Vorhersage des kosmologischen Standardmodells so präzise auszurechnen, dass man sie mit den Beobachtungen abgleichen kann. Das bedeutet nichts weniger, als die Entwicklung des gesamten Universums über die Zeit von kurz nach dem Urknall bis heute im Computer zu simulieren. Dabei muss die Dunkle Materie durch eine immense Anzahl von zunächst gleichverteilten Teilchen wiedergegeben werden. Nur dann ist die Verteilung von Galaxien, die sich am Ende des Simulationslaufs einstellt, so aussagekräftig, dass sie schließlich mit der beobachteten vergleichbar ist.

Eine internationale Vereinigung von Astrophysikern, das Virgo Consortium für kosmologische Simulationen auf Supercomputern, hat sich dieser Herausforderung angenommen (Spektrum der Wissenschaft 11/2010, S. 34). In dem Projekt »Millennium XXL« simulierte 2010 ein Team unter Leitung des Heidelberger Astrophysikers Volker Springel auf dem Jülicher Supercomputer JuRoPA insgesamt 300 Milliarden Dunkle-Materie-Teilchen – 30-mal so viel wie in der damals bahnbrechenden »Millennium-Simulation« von 2004. Springels Programm GADGET-3, das auch von den

Eine Momentaufnahme in der simulierten Entwicklung des Universums. Für die Berechnung wurde die Bewegung jedes einzelnen von 300 Milliarden Teilchen der Dunklen Materie bestimmt.



VOLKER SPRINGEL, MPI FÜR ASTROPHYSIK (MPIA), GARCHING UND HEIDELBERGER INSTITUT FÜR THEORETISCHE STUDIEN (HITS)



meisten anderen Kosmologen genutzt wird, konnte mehr als 12 000 der über 16 000 Prozessorkerne von JuRoPA für die Rechnung nutzen. Bei einer Spitzenleistung von 150 Teraflops benötigte die Simulation nur eine Gesamtlaufzeit von etwa zehn Tagen – auf einem schnellen Einzelprozessor wären es über 350 Jahre gewesen. Allerdings wurde die benötigte Rechenzeit in einzelne Blöcke über mehrere Wochen verteilt; die Pausen nutzte man, um die jeweils erreichten Zwischenergebnisse aufzubereiten und grafisch darzustellen.

JuRoPA basiert auf der Clustertechnologie, das heißt, das System ist aus vielen (in diesem Fall 2208) standardisierten Hardwarekomponenten modular aufgebaut. Der große Arbeitsspeicher von drei Gigabyte pro Rechenknoten reichte gerade aus, um die enormen 30 Terabyte des Simulationsmodells im Speicher zu halten und zu verarbeiten. Auch hinsichtlich der Datenkommunikation ist der Rechner sehr gut auf datenintensive Anwendungen eingestellt.

Millennium XXL ist die bei Weitem größte kosmologische Simulation aller Zeiten. Dem Team um Volker Springel gelang es, in einem Würfel von über zwölf Milliarden Lichtjahren Kantenlänge mehr als 500 Millionen Galaxien zu identifizieren und deren Entstehung und zeitliche Entwicklung in mehr als 25 Milliarden Halos zu verfolgen. Ein ganz wesentliches Resultat ist die genaue Vermessung der so genannten baryonischen akustischen Oszillationen in der räumlichen Verteilung von Galaxien. Durch Vergleich mit Beobachtungen kann man damit kosmologische Theorien testen. Ein anderes wichtiges Ergebnis liegt in der Bestimmung der maximalen Größe, die Galaxienhaufen im Standardmodell der

Die äußere Erscheinung des Supercomputers JuRoPA ist eher unspektakulär: säuberlich in Schränken angeordnete Prozessoren, Verbindungskabel – und Lüftungslöcher im Boden zum Abführen der Wärme.

Kosmologie erreichen können. Sollte einmal ein noch größerer Haufen entdeckt werden (wie schon gelegentlich behauptet), wäre das bereits eine Widerlegung des derzeit favorisierten Modells. Noch ist die Analyse der Simulationsergebnisse nicht abgeschlossen. Doch schon jetzt ist klar, dass diese Arbeit unter die bedeutendsten Beiträge zur Kosmologie einzuordnen ist.

Die Jülicher Superrechner

JuRoPA (*Jülich Research on Petaflop Architectures*) ist eine gemeinsame Entwicklung der Ingenieure des Jülich Supercomputing Centre, des französischen Rechnerherstellers Bull und der Münchner Softwarefirma ParTec. Neben Nehalem-Prozessoren von Intel sorgen die schnellen Infiniband-Kommunikationsnetze von Mellanox aus Israel für eine skalierbare Gesamtrechenleistung von 310 Teraflops, ebenfalls seit Mitte 2009. Das Betriebssystem »ParaStation« ist eine langjährige gemeinsame Entwicklung des Forschungszentrums und der ParTec.

Von seiner Ausbaufähigkeit her noch eindrucksvoller ist Jugene, ein Supercomputer des Typs Blue Gene/P von IBM und einer der Rechner des deutschen Gauss Centre für Supercomputing (Bild S. 85). Als er im Mai 2009 auf seine der-

zeitige Ausbaustufe erweitert wurde, war er mit einer Leistung von einer Billiarde (10^{15}) Rechenoperationen pro Sekunde (einem Petaflops) der schnellste Rechner Europas. Nur ein solches System, das eine Rechenleistung von mehr als 25 000 handelsüblichen PCs aufbringen kann – dabei allerdings nur ein Drittel der Energie verbraucht –, war Ende 2008 in der Lage, das eingangs erwähnte Rätsel der Hadronenmassen in quantitativer Weise zu lösen.

In Supercomputern kommt es auf effizientes Teamwork an: Jeder einzelne Prozessor arbeitet für sich an einem kleinen Teil des Gesamtproblems. Die Ergebnisse der Berechnung werden zwischen den Prozessoren ausgetauscht und gehen in den nächsten Schritt der Berechnung ein. Wie bei einem Mosaik werden die Einzelteile dann zusammengefügt und ergeben schließlich ein Gesamtbild. Dazu müssen die auszutauschenden Daten rechtzeitig und zuverlässig an ihrem Bestimmungsort ankommen. Erforderlich ist daher zum einen ein leistungsstarkes Datennetz zwischen den Prozessoren, zum anderen eine Programmierung, die aus der Vielzahl der Prozessoren eine funktionale Einheit macht.

Die Rechenkraft von Jugene steht ausgewählten rechenintensiven Projekten aus ganz Europa zur Verfügung, die sich gut »skalieren« lassen. Das heißt: Die Rechenleistung wächst annähernd proportional zur Zahl der eingesetzten Prozessoren – der notwendige zusätzliche Datenverkehr und das Warten auf benötigte Daten nehmen nicht überhand.

Das Weltklima vorhersagen

Inzwischen zählt bei Supercomputern – ähnlich wie in der Formel 1 – nicht mehr ausschließlich die Rechengeschwindigkeit. Das zeigt sich schon daran, dass sich neben der Top500-Liste der schnellsten Rechner inzwischen eine Green500-Liste der Supercomputer mit dem geringsten Energieverbrauch etabliert hat. Auf ihr konnte der Hochleistungsrechner QPACE (*QCD Parallel Computing on the Cell*), seit Mitte 2009 mit jeweils vier Regalen (»Racks«) in Jülich und an der Universität Wuppertal in Betrieb, seither zweimal in Folge den ersten Platz einnehmen. Entwickelt wurde er von einem akademischen Konsortium aus Universitäten und Forschungszentren sowie IBM Deutschland. Innerhalb des Konsortiums übernahmen unter Führung der Universität Regensburg die Forschungszentren Desy und Jülich zentrale Aufgaben.

Doch beschränken sich die Einsatzgebiete von Supercomputern nicht auf die Berechnung fundamentaler Naturkräfte oder die großen Rätsel des Universums. Simulationen erlauben es beispielsweise auch, die Folgen menschlichen Handelns auf unsere Umwelt abzuschätzen und entsprechende Empfehlungen auszusprechen. Paradebeispiel dafür ist die Klimaforschung: Die Vorhersagen für das Weltklima, die insbesondere in die Sachstandsberichte des Weltklimarats IPCC eingehen, konnten bisher unter anderem aus Mangel an Rechenleistung gewisse Prozesse nicht in das mathematische Modell einbeziehen, sondern nur »parametrisieren«, das heißt summarisch durch gewisse Zahlenwerte (»Parameter«)

berücksichtigen, die ihrerseits durch Abgleich mit dem Klima der Vergangenheit gewonnen wurden. Das betrifft Vorgänge in der Stratosphäre ebenso wie solche, die sich auf kleinem Raum abspielen, insbesondere die Dynamik der Wolken und Aerosole.

Für spezielle Szenarien kann diesem Mangel bereits abgeholfen werden. Die Gruppe um Martin Schultz aus Jülich hat die Auswirkungen anthropogener Emissionen aus großen Städten auf das Klima berechnet. Externe Gruppen erforschen mit dem Supercomputer natürliche Aerosolereignisse wie den Staubflug aus der Sahara oder die Ausbreitung der Vulkanasche des Eyjafjallajökull.

Das Universalwerkzeug Supercomputer kann auch von unmittelbarem, praktischem Nutzen sein und in der Industrie den Weg zum Produkt verkürzen. So führt nach Auffassung der meisten Experten der Weg zu optimalen Gasturbinen nur über Computersimulationen. Das ist ein bedeutender Wirtschaftszweig mit hohem Wachstumspotenzial: Jedes (Düsen-)Flugzeugtriebwerk ist eine Gasturbine, und der Flugverkehr nimmt weiter zu. Vor allem aber bieten diese Geräte zurzeit die effizienteste Möglichkeit, durch Verbrennung Strom zu erzeugen: Pro Kilowattstunde verbrauchen sie in Gas-und-Dampf-Kombikraftwerken weniger Brennstoff und stoßen entsprechend weniger Kohlendioxid aus als konventionelle Kraftwerke.

Lange Zeit setzten Ingenieure auf teure und zeitaufwändige Experimente und Tests sowie auf ihre Intuition, um den Wirkungsgrad der Turbinen zu erhöhen. In den letzten Jahren hat die Computersimulation Einzug in den Entwicklungsprozess gehalten, allerdings zunächst vor allem, um einzelne Komponenten der Turbine zu verbessern: Verdichter, Brennkammer und Expander (die Turbine im engeren Sinn). Mit weiter steigender Rechenfähigkeit können die Ingenieure sich in den kommenden Jahren der nächsten Herausforderung stellen und die einzelnen Computermodelle miteinander koppeln. Der Nutzen getrennter Modelle für die einzelnen Komponenten ist sehr begrenzt, weil zum Beispiel ein Modell für den Expander die Einströmung des Gases aus der Brennkammer als gegeben hinnehmen muss. Erst wenn Brennkammer und Turbine gleichzeitig simuliert werden, lassen sich die Einlassbedingungen optimal festlegen.

Für ein perfektes Ergebnis müssen die Berechnungen unterschiedlichste physikalische Vorgänge und Theorien – Strömungsmechanik, Verbrennung, Strahlung, Wärmeübertragung, Akustik – sowie die Chemie der Emissionen einbeziehen. Auch das ist nur möglich, indem einerseits Programme für den Einsatz auf massiv parallelen Supercomputern fit gemacht werden und andererseits die Rechnerleistung weiter gesteigert wird.

Aufbruch ins Exaflops-Zeitalter

Derzeit läuten die Computerbauer die Exaflops-Ära ein: eine Trillion (10^{18}) Rechenoperationen pro Sekunde – ein Ziel, das bis zum Jahr 2020 durchaus erreichbar erscheint, was die Hardware angeht. Allerdings ist eine solche Leistungssteige-

rung aus heutiger Sicht nur mit Millionen von Prozessoren zu erreichen. Das würde – mit heutiger Technik – das Problem der Skalierbarkeit weiter verschärfen und den Energieverbrauch der Systeme ins Unbezahlbare treiben.

Das Forschungszentrum Jülich geht beide Herausforderungen offensiv und mit verschiedenen Partnern an. Zusammen mit Intel und ParTec betreibt es das »Exa-Cluster Laboratory«. In einem mit EU-Geldern geförderten Projekt namens DEEP (*Dynamical Exascale Entry Platform*) entwickeln wir zusammen mit dem Leibniz-Rechenzentrum in Garching ein System, das auf der Many-core-Technologie von Intel aufbaut; das Kommunikationssystem »Extoll« stammt von dem Heidelberg-Mannheimer Informatiker Ulrich Brüning. Mit dem Böblinger Labor der Firma IBM betreiben wir das Exascale Innovation Center, in dem die Programmierung der superschnellen Rechner vorangetrieben werden soll. Bis 2016 sollen erste brauchbare Prototypen fertig sein.

Europäischer Schulterschluss

Seit etwa zehn Jahren ist zu beobachten, dass europäische Wissenschaftler im Vergleich zu ihren amerikanischen, japanischen und neuerdings auch chinesischen Fachkollegen immer weniger Anteil an der weltweit verfügbaren Rechenzeit haben – aus einleuchtenden Gründen: Supercomputer im höchsten Leistungsbereich sind enorm teuer und veralten wegen des rapiden technischen Fortschritts bereits nach wenigen Jahren; der Staat, der sie anschafft, bedient schon aus Wettbewerbsgründen vorrangig die eigenen Leute mit Rechenzeit, und überhaupt sind Chip- und Computerentwicklung in Europa nur schwach vertreten.

Um dem Rückstand abzuhelpfen und die Kosten auf mehrere Schultern zu verteilen, gründeten Vertreter von mittlerweile über 20 europäischen Staaten Mitte 2010 den Supercomputerverbund PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe*), formal ein internationaler gemeinnütziger Verein mit Sitz in Brüssel. Frankreich, Deutschland, Italien und Spanien haben sich verpflichtet, während der nächsten fünf Jahre Rechenzeit im Wert von 400 Millionen Euro für Europas Wissenschaft und Industrie zur Verfügung zu stellen; Deutschland hat bisher insbesondere die Leistung von Jugene eingebracht. Für den Aufbau von PRACE geben die Europäische Kommission und das Konsortium der 20 beteiligten Länder noch je 70 Millionen Euro dazu. Unter der Koordination des Jülich Supercomputing Centre werden hier auch vielfältige Entwicklungsprojekte für Supercomputerkomponenten gemeinsam mit den europäischen Herstellern geför-

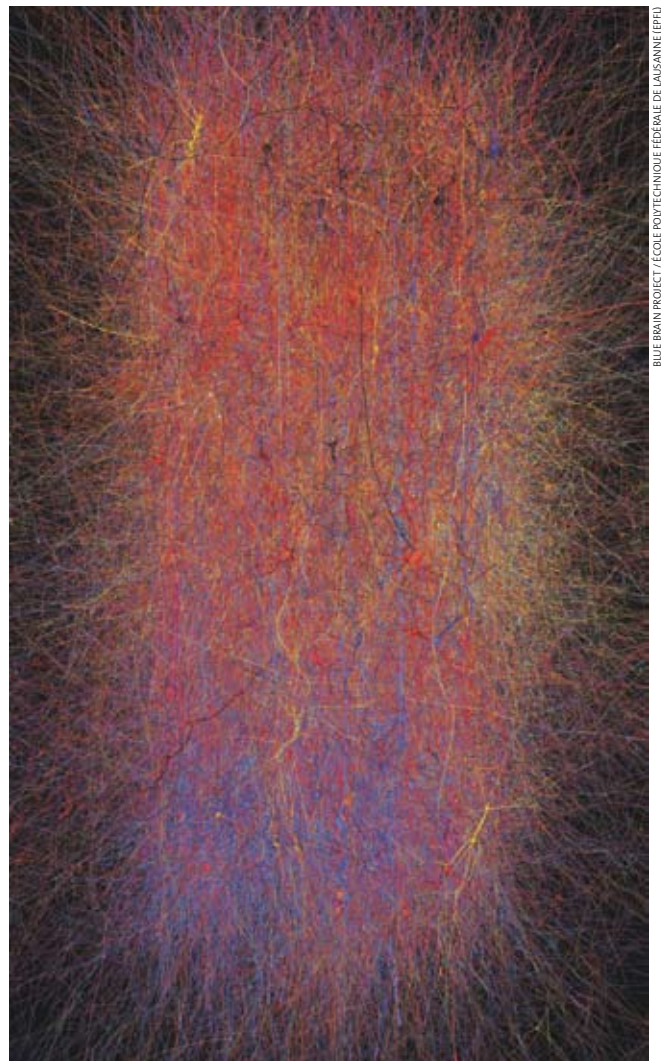
In dieser Computersimulation aus dem Blue Brain Project entspricht jeder der abgebildeten Fäden einem Neuron; die Farben geben dessen – zeitlich variable – elektrische Spannung wieder. Das Bild ist sehr komplex, zeigt aber nur 1000 der 10 000 Neurone, mit denen die Simulation arbeitet; und das ganze System (eine »kortikale Säule«) entspricht nur einem winzigen Teil eines echten Gehirns.

dert – ein wichtiger Beitrag, um die europäische Industrie auf diesem Sektor wieder sichtbar werden zu lassen.

Der deutsche Partner in PRACE ist das »Gauss Centre for Supercomputing« (GCS). In ihm sind auf Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung die drei deutschen Höchstleistungsrechenzentren in Stuttgart, Garching und Jülich zusammengeschlossen. Wissenschaftliche Beiräte von unabhängigen Experten beraten GCS und PRACE und verteilen die Rechenzeit im *peer-review*-Verfahren streng nach wissenschaftlicher Exzellenz der beantragten Projekte.

In Jülich führen Simulationslaboratorien für Klimaforschung, Biologie, Plasmaphysik oder Elementarteilchenphysik Wissenschaftler und Studenten an die beispiellosen Möglichkeiten der neuen Systeme heran. Jedes dieser Labore wird von einem Vertreter des jeweiligen Fachs geleitet; Informatiker und Mathematiker kümmern sich um die technischen Feinheiten der Programme.

Mit Exaflops-Supercomputern werden sich Vorhaben umsetzen lassen, die heute noch überaus utopisch anmuten. Ein Beispiel dafür ist das »Human Brain Project« des Biologen Henry Markram von der École polytechnique fédérale (EPFL) in Lausanne. Neurowissenschaftler, Ärzte, Informatiker, Ma-



BLUE BRAIN PROJECT / ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (EPFL)

thematiker und Computertechniker aus ganz Europa wollen alles Wissen über die Vorgänge im menschlichen Gehirn – bis hinunter auf die Ebene der Zellen oder gar einzelner Moleküle – in gewaltigen Datenbanken sammeln. Zugleich wollen sie Methoden entwickeln, um die Funktionsweise des Gehirns in allen biologischen Details zu simulieren. Das Forschungszentrum Jülich beteiligt sich daran mit mehreren seiner Institute. Insbesondere zeichnet das Jülich Supercomputing Centre für den Aufbau der »Human Brain Facility« verantwortlich: Bis 2020 soll Markrams Simulationssoftware Schritt für Schritt die Funktionen des Gehirns nachbilden können und auf dem Jülicher Supercomputer als virtuelles Gehirn Forschern aus der ganzen Welt als Arbeitsplattform dienen. Dazu allerdings ist eine Rechenleistung im Exaflops-Bereich zwingend erforderlich. Ein Antrag auf Förderung über das »Flagship«-Programm FET (*Future and Emerging Technologies*) der EU hat bereits die erste Hürde überwunden: Die EU-Kommission hat den Auftrag für eine Machbarkeitsstudie erteilt.

Die Forscher sind davon überzeugt, dass von diesem Projekt Medizin und Computertechnik gleichermaßen profitieren werden. Auf der medizinischen Seite erwarten sie eine frühere Diagnose und bessere Behandlung neurologischer Krankheiten, die Steuerung von Prothesen mittels Gedankenkraft und ein besseres Verständnis von Alterungsprozessen. Auf der anderen Seite kann das menschliche Gehirn auch als perfektes Vorbild für einen extrem leistungsfähigen und zugleich energieeffizienten, selbst lernenden und sich selbst reparierenden Computer dienen. Der Heidelberger Physiker Karlheinz Meier, stellvertretender Direktor des Human Brain Project, entwickelt derzeit einen »neuromorphen Chip«, der auf elektronischem Weg Funktionen des Gehirns emulieren soll.

Die Wissenschaftler hoffen, dass sie mit ihrem Vorhaben eine Spirale der Erkenntnis in Gang setzen: Je mehr sie mit Hilfe von Computersimulationen verstehen, nach welchen Prinzipien das Gehirn arbeitet, umso mehr werden sie diese anwenden können, um leistungsfähigere Computer und intelligenterer Roboter zu entwerfen.

Inflation der Rechenkerne

Die rasante Entwicklung der Supercomputer und ihr Eindringen in nahezu alle wissenschaftlichen Disziplinen werfen unweigerlich auch prinzipielle Fragen auf: Werden Wissenschaftler sich verstärkt auf Theorien und Modelle konzentrieren, die sich auf den Supercomputern der nahen Zukunft berechnen lassen? Wie kommen wir mit Problemen weiter, für die das (noch) nicht gilt? In der Tat ist zu erkennen, dass die Grundlagenforscher mit der Skalierbarkeit ihrer Programme deutlich weiter sind als die Vertreter der Ingenieur- und der Lebenswissenschaften, aus einem einfachen Grund: Letztere sind weniger frei in der Wahl ihrer Probleme.

Heute gehen wir davon aus, dass größere Rechengeschwindigkeiten fast ausschließlich durch mehr Einzelrechner (»Rechenkerne«) in Supercomputern zu erreichen sind. Dies erscheint plausibel, da die Taktfrequenz des einzelnen

Rechenkerns allem Anschein nach ihre technische Obergrenze erreicht hat.

Mittlerweile werden jedoch zahlreiche andere Lösungen verfolgt (Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 90). Darunter ist auch eine Abkehr vom Prinzip des Universalrechners. Der Supercomputer »Anton« von der Firma D.E. Shaw Research in New York, benannt nach Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723), dem Erfinder des Mikroskops, kann nur noch sehr spezielle Rechnungen durchführen, nämlich die Bewegungsgleichungen für die Faltung eines Proteins lösen, das aber fast 100-mal so schnell wie ein Standardsystem. Anton berechnet die speziellen Kraftfelder in Festkomma- statt in Gleitkommaarithmetik und hat auch einige andere Tricks eingebaut. So können zum ersten Mal deterministische Faltungen größerer Proteine beobachtet werden.

Erfolge wie der von Anton sind richtungsweisend und werden Wissenschaftler anderer Gebiete und Informatiker motivieren, nach ähnlich innovativen Lösungen zu suchen. ~

DIE AUTOREN



Achim Bachem (links) habilitierte sich 1980 in Mathematik an der Universität Bonn. Nach Professuren in Erlangen-Nürnberg, Bonn und Köln wurde er 1996 Vorstandsmitglied des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und

von 1998 bis 2002 deutscher Delegierter der Europäischen Weltraumorganisation ESA. Seit 2006 ist er Vorstandsvorsitzender des Forschungszentrums Jülich. **Thomas Lippert** promovierte gleich zweimal: 1993 in Wuppertal über Simulationen zur Quantenchromodynamik und 1998 in Groningen (Niederlande) über ein Verfahren zur Ansteuerung von Parallelrechnern. Seit 2004 ist er Direktor des Jülich Supercomputing Centre im Forschungszentrum Jülich und zugleich Professor für Theoretische Physik in Wuppertal. Die Autoren danken dem freien Wissenschaftsjournalisten **Dr. Frank Frick** (www.frankfrick.de) für seine Unterstützung.

QUELLEN

- Epelbaum, E. et al.:** *Ab Initio* Calculation of the Hoyle State. In: Physical Review Letters 106, Nr. 192501, 2011. Online unter <http://physics.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevLett.106.192501.pdf>
- Weinberg, S.:** Anthropic Bound on the Cosmological Constant. In: Physical Review Letters 59, S. 2607–2610, 1987
- Weinberg, S.:** Nuclear Forces from Chiral Lagrangians. In: Physics Letters B 251, S. 288–292, 1990

WEBLINKS

- <http://physics.aps.org/articles/v4/38>
Morten Hjorth-Jensen: *The Carbon Challenge. Über die Synthese von Kohlenstoff-12 aus drei Alphateilchen und den Hoyle-Zustand*
- http://inside.hlr.de/hlm/Edition_02_10/article_06.html
Volker Springel et al.: *The Millennium-XXL Project: Simulating the Galaxy Population of dark Energy Universes*
- www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,761995,00.html
Christoph Seidler und Cinthia Briseño: *Forscher basteln an der Hirnmaschine.*
- Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1120985



Wolfgang Nentwig (Hg.)
Unheimliche Eroberer
Invasive Pflanzen und Tiere in Europa
 Haupt, Bern 2011. 256 Seiten,
 € 29,90 bis 31. 10. 2011, danach € 39,90

ÖKOLOGIE

Dulden, bekämpfen oder ausrotten?

Die meisten eingewanderten Tier- und Pflanzenarten sind harmlos. Einige wenige jedoch richten ernsthaften Schaden an – schon allein dadurch, dass sie einheimische Arten verdrängen.

Sie beherrschen gelegentlich die Schlagzeilen in der nachrichtenarmen Sommerzeit. In den letzten Jahren waren das *Ambrosia*, danach der Harlekin-Marienkäfer und zuletzt der Maiswurzelbohrer. Alle drei sind unerwünschte »Neubürger«, das Unkraut aus Nordamerika, die beiden Käfer aus Südostasien beziehungsweise Mexiko.

Die Fachleute nennen eine Pflanze einen Neophyten und ein Tier ein Neozoon, wenn die Art nach der Entdeckung der Neuen Welt 1492 außerhalb ihres ursprünglichen Verbreitungsgebiets aufgetaucht ist und ohne menschliche Betreuung mindestens 25 Jahre oder drei Generationen Bestand hatte. Für Europa sind das bisher etwa 11 000 Arten.

Die allermeisten von ihnen sind völlig harmlos, zum Beispiel der Karmingimpel (erster Brutnachweis in Bayern 1972) oder der Jagdfasan, dessen Name schon sagt, warum er als »königliches Wild« aus der Kaukasusregion hierhergebracht wurde. Auch der für heimische Schmetterlinge so attraktive Sommerflieder (»Schmetterlingsstrauch«) oder der gegen Umwelteinflüsse sehr unempfindliche und daher als Straßenbaum geeignete Ginkgo bereichern sicher unsere Flora.

Einige wenige allerdings sind so problematisch – wenn auch meist nur in Teilgebieten Europas –, dass sie eine Fülle abwertender und sogar angstbe-

setzter Bezeichnungen auf sich ziehen: »Eindringlinge«, »Einwanderer«, »Fremdlinge«, »Invasoren«, im Englischen neben »invaders« sogar »aliens«. Diesem Schema folgt auch der reißerische Titel dieses Buchs, während der Untertitel »Invasive Pflanzen und Tiere in Europa« den Inhalt korrekt beschreibt.

Wolfgang Nentwig, Professor für Ökologie und Evolution an der Universität Bern, hat für den vorliegenden Sammelband 24 Autoren verschiedenster Fachrichtungen gewonnen, die über ebenso viele problematische Einwanderer

derer und die von ihnen verursachten Schäden berichten. Der großen Zahl der Verfasser zum Trotz liest sich das Buch leicht, bringt viele Details in sehr informativer und übersichtlicher Form und ist ausgezeichnet bebildert: Man findet kein einziges schlechtes Foto und kein überflüssiges.

Die Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) war eigentlich nur den Botanikern bekannt, die regelmäßige Feldarbeit machen und dabei immer wieder Plätze aufsuchen, wo mit Neophyten zu rechnen ist: Hafenanlagen, Güterbahnhöfe, Gleisanlagen, Industriebrachen oder Materialgruben. Die meisten Funde in Ortschaften gehen wohl auf verunreinigtes Vogelfutter zurück. Bis in die 1990er Jahre machte die Pflanze keinerlei Probleme, dann aber entstanden im Rahmen des wirtschaftlichen Wandels in mehreren ost- und südosteuropäischen Staaten auf einstigen Kulturflächen riesige *Ambrosia*-Unkrautfluren. Eine gezielte Bekämpfung – durch Ausrotten im Bestand, sauberes Saatgut und Nachkontrollen – ist möglich und geboten, aber schwierig. Ungarn verwendet bis zu ein Prozent seines gesamten Steueraufkommens dafür. Bei uns wurde man erst auf die Pflanze aufmerksam, als sich die Fälle schwerer Allergie gegen die als besonders aggressiv geltenden Pollen häuften.



Die Asiatische Tigermücke *Aedes albopictus* (hier ein mit menschlichem Blut vollgesogenes Weibchen) kam mit alten Autoreifen, die zum Recyclen verschifft wurden, von Südasien in die USA und nach Südeuropa und ist dort inzwischen weit verbreitet.



Waschbären (links) sind überaus geschickt darin, sich Hausmüll als Nahrungsquelle zu erschließen. Die Chinesische Wollhandkrabbe (rechts) gelangte mit dem Ballastwasser von Schiffen in europäische Gewässer und vermehrt sich dort rasant.

Ein Beispiel aus der Insektenwelt ist der Asiatische oder Harlekin-Marienkäfer (*Harmonia axyridis*). Bei Gefahr scheidet er eine stinkende Flüssigkeit aus, die auch allergen wirken kann. Seit einigen Jahren fallen besonders in den Städten im Herbst die Ansammlungen an Hauswänden oder Mauern auf, wo sich oft mehrere hundert bunte Käfer für die Überwinterung zusammenfinden. In Deutschland fing man 1999 die ersten Tiere im Freiland; mittlerweile haben sie ganz Europa außer Portugal und Irland erobert.

Neben Blattläusen fressen die Harlekinikäfer auch unsere einheimischen Marienkäfer, so dass mit deren Verschwinden gerechnet werden muss. Da sie süße Säfte mögen, finden sie sich in großen Mengen in Weinbergen, wo sie an verletzten Beeren Zucker für den Winter aufnehmen. Geraten sie bei der Lese in den Traubensaft, wird der Wein ungenießbar. Erfolgreiche Bekämpfung vor Einzug in die Winterquartiere ist möglich – mit dem Staubsauger! –, sicher aber nicht jedermanns Sache.

Seit 1916 verwendet man den Käfer als Blattlausvertilger in den USA; aber auch dort ist er schon aus Gewächshäusern entwischt und hat sich massenhaft ausgebreitet, da er nur geringe ökologische Ansprüche stellt. Das hätte man wissen müssen, als man die Tiere 1964 in der Ukraine und in den 1980er

Jahren in zwölf weiteren europäischen Ländern freisetzte.

Viel schlimmer kann es mit dem Westlichen Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera*) kommen. In Amerika, wo seine Larven bereits seit 1909 massenhaft Maiswurzeln fressen, heißt er »Milliarden-Dollar-Käfer«. Als er 1992 erstmals in Europa in Serbien gefunden wurde, war es schon zu spät, um seine Ausbreitung noch zu verhindern. Im August 2010 fand man ihn schon bei Köln, nachdem im Süden Deutschlands bereits drei Jahre davor Käfer in Lockfallen gefangen wurden. Eine gezielte Bekämpfung mit einem Insektizid im Jahr 2008 führte dann auch noch zum größten je beobachteten Bienensterben in Deutschland.

In den USA hilft man sich mit gentechnisch veränderten Maissorten. Da diese in Europa nicht überall akzeptiert werden, läuft die Forschung nach Alternativen auf Hochtouren. Sollten alle Maisanbaugebiete in Europa befallen werden, ist mit einem Schaden von 600 Millionen Euro zu rechnen.

Andere invasive Pflanzen sind bisher in Deutschland nur lästig: die wuchernden japanischen Knöteriche und das Drüsige Springkraut an Bach- und Seeufern, Robinien und Götterbäume in Städten, der Riesen-Bärenklau, der aus Gärten und Parks entlang der Straßen auch in Wälder eindringt. Sie lassen

sich wohl bekämpfen oder wenigstens eindämmen, aber nur mit großem Arbeitsaufwand.

Die tierischen Einwanderer bereiten gleichartige Probleme: Sie überwuchern und/oder verdrängen die einheimischen Arten. Pazifische Austern überwachsen die Miesmuschelbänke, Wollhandkrabben aus China fressen den Meeresboden kahl, die Varroa-Milbe, nur etwas größer als ein Millimeter, vernichtet tausende Bienenvölker.

Wirbeltiere wie Waschbär, Mink, Nerz, Nutria, Marderhund, Halsbandsittich oder Kanadagans sind obendrein attraktiv, niedlich oder possierlich, vor allem dort, wo sie sich an Menschen gewöhnt haben und aus der Nähe zu beobachten sind. Wenn deren Bekämpfung diskutiert wird, dann »muss vermieden werden, mit billigen Emotionen Stimmung zu machen«, so Wolfgang Nentwig im Schlusskapitel und fordert, dass nach Darlegung »wissenschaftlicher Fakten« auch »immer Taten folgen müssen«.

Das bedeutet nach seiner Ansicht das Töten der Tiere; aber das würde bei Säugetieren und Vögeln einen Sturm der Entrüstung auslösen. Hier sind andere Wege gefragt – und durchaus gangbar. So werden in Heidelberg Eier aus den Gelegen der Schwanengans abgesammelt und in Kassel und Umgebung Waschbären auf Wunsch der Bewohner geordnet weggefangen.

Jürgen Alberti

Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.



Gerhard Roth

Wie einzigartig ist der Mensch?

Die lange Evolution der Gehirne und des Geistes

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010.

437 S., € 24,95

EVOLUTIONS BIOLOGIE

Wann ist ein Unterschied noch graduell?

Die Darstellung der Fakten ist erstklassig; aber die Antwort auf die große Frage leidet unter mangelnder Klärung der Begriffe.

Seit Thomas Huxley (1825–1895), auch bekannt als »Darwins Bulldog«, 1863 seinen Klassiker über die gemeinsame Abstammung von Mensch und Menschenaffe veröffentlichte, haben immer wieder Wissenschaftler im

Licht von Evolutionstheorien darüber nachgedacht, was den Menschen vor allen anderen Tieren auszeichne. Nach seinen populären Ausflügen in die Philosophie und die Psychologie widmet sich nun auch der Bremer Professor

Gerhard Roth auf seinem eigentlichen Fachgebiet, der Biologie, dieser Frage.

Das Buch umfasst ein breites Spektrum an Themen der theoretischen Biologie. Grundsatzfragen, beispielsweise was Evolution, Leben oder Intelligenz ist, diskutiert Roth sinnvollerweise gleich am Anfang. Daran schließen sich Kapitel über die Evolution des Lebens auf der Erde an. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den Nervensystemen und, im Zusammenhang damit, den geistigen Fähigkeiten ihrer Inhaber. Diese Anordnung führt logisch zu den eher philosophischen Schlusskapiteln zur angeblichen Einzigartigkeit des Menschen und zum Verhältnis zwischen Geist und Gehirn. Zahlreiche Abbildungen sowie Zusammenfassungen am Ende jedes Kapitels helfen dem Leser, trotz des anspruchsvollen Themas nicht den Faden zu verlieren.

Roth hat das Buch in einem klaren und wissenschaftlichen Stil geschrieben. Die Ergebnisse zur Intelligenz von

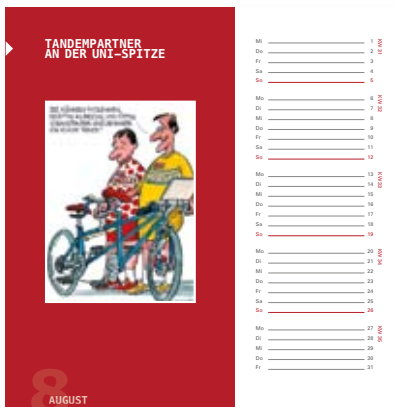
ANZEIGE

WANDKALENDER 32 X 33 CM

1 KALENDER 17,90 €

1 duzEND 179,- €

Preise inkl. MwSt.
zzgl. Versand: 3,50 € in D



365 TAGE HOCHSCHULALLTAG ZUM SCHMUNZELN

Der Jahreskalender der duz-Redaktion mit Karikaturen rund um Hochschule und Wissenschaft von Sepp Buchegger. Ein Unikat für stille Genießer oder ein Geschenk für den Kollegenkreis, die Familie, Freunde und Fei...

Zu bestellen unter:

Tel: 030-212987-0 / Fax: 030-212987-20

E-Mail: i.opitz@raabe.de





Richard Panek

Das 4%-Universum. Dunkle Energie, dunkle Materie und die Geburt einer neuen Physik

Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober. Hanser, München 2011. 376 S., € 24,90

Das Universum gewährt den Astrophysikern keine Verschnaufpause: Kaum scheinen sie es besser verstanden zu haben, tut es das Gegenteil von dem, was sie erwarten. Es expandiert, statt in sich zusammenzufallen. Es verhält sich, als wäre es voller unsichtbarer Materie. Und immer ist es komplizierter als gedacht. Für Laien ebenso wie für geschichtlich Interessierte erzählt PEN-Award-Preisträger Richard Panek temporeich die Geschichte kosmologischer Durchbrüche. Und man meint, er wäre dabei gewesen, als Vera Rubin um 1960 Hinweise auf Dunkle Materie in Spiralgalaxien aufspürte, als Arno Penzias und Robert Wilson 1964 die kosmische Hintergrundstrahlung entdeckten und als das High-z Supernova Search Team um Brian Schmidt (Physik-Nobelpreis 2011) und Nicholas Suntzeff 1998 herausfand, dass das Universum immer schneller expandiert.

THILO KÖRKELE



Stefan Klein

Der Sinn des Lebens. Warum Selbstlosigkeit in der Evolution siegt und wir mit Egoismus nicht weiterkommen

S. Fischer, Frankfurt am Main 2010. 336 S., € 18,95; Taschenbuchausgabe 2011, € 9,95

Nachdem lange Jahre der Lobpreis des Egoismus die Diskussionen beherrschte, kommen neuerdings Abhandlungen über die Vorteile von Selbstlosigkeit in Mode. Der Wissenschaftsautor Stefan Klein erzählt, was Forscher aller Art – von Evolutions- und Soziobiologen bis zu Ökonomen und Spieltheoretikern – zu diesem Thema zu sagen haben. Darunter sind einige Überraschungen: Globalisierung fördert den Altruismus, die heutige Flüchtigkeit des Wissens begünstigt eine Kultur des Teilens, allgemein wächst die Spendenbereitschaft, und die Nutzung des Internets in Kollektivprojekten wie Wikipedia oder Linux wird zum modernen Pendant kooperativer Jagd in der Steinzeit. Je nach Vorbildung wird der Leser mehr aus den biologischen, den philosophischen oder den soziologischen Passagen Gewinn ziehen. Ein zugleich vergnügliches wie nachdenklich stimmendes Buch, mit dem der Autor Mut machen möchte, mehr Menschlichkeit zu wagen.

ADELHEID STAHNKE



Marcus du Sautoy

Eine mathematische Mystery Tour durch unser Leben

Aus dem Englischen von Stephan Gebauer. C.H.Beck, München 2011. 318 S., € 19,95

Es ist ein sehr weiter Weg von der Existenz unendlich vieler Primzahlen, die schon Euklid in der Antike bewies, bis zur riemannschen Vermutung über ihre statistische Verteilung, deren Beweis bis heute offen ist. Der britische Mathematiker und Erfolgsautor Marcus du Sautoy legt mit seinen Lesern eine solch gewaltige geistige Entfernung gleich mehrfach zurück: Jedes der fünf Kapitel beginnt mit hübscher elementarer Mathematik (»Warum sind Seifenblasen kugelförmig?«) und endet bei einem der berühmtesten Millenniums-Probleme, auf die das Clay Institute of Mathematics einen Preis von je einer Million Dollar ausgesetzt hat (»Was ist die Poincaré-Vermutung?«, siehe auch »Die größten Rätsel der Mathematik«, Spektrum der Wissenschaft Dossier 6/2009). Die schwierigen Dinge kann auch ein Großmeister wie du Sautoy auf dem knappen Platz nicht wirklich erklären. Aber er vermittelt uns immerhin ein gewisses Gefühl dafür – und überreicht uns einen bunten Strauß aus größtenteils wohlbekannten, aber exquisit drapierten Blüten der Mathematik.

CHRISTOPH PÖPPE



Joachim Mai, Daniel Rettig

Ich denke, also spinn ich. Warum wir uns oft anders verhalten, als wir wollen

Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2011. 384 S., € 14,90

Der Titel, eine witzige Verfremdung des berühmten Descartes-Zitats, macht neugierig und der Untertitel erst recht. Wohl jeder hat sich schließlich schon einmal gefragt, warum er sich in gewissen Situationen so leicht manipulieren lässt. Das glänzend geschriebene Vorwort heizt die Vorfreude auf eine Lektüre voller Aha-Effekte weiter an. Doch der Inhalt wird den hohen Erwartungen nicht gerecht. Die meisten aufgeführten Phänomene sind trivial, bekannt oder auch schlicht unglaublich – wie die Behauptung, Gähnen kühle das Gehirn und wirke ansteckend als Ausdruck sozialer Verbundenheit. Die Lektüre des Buchs jedenfalls lässt einen bald gähnen, aber aus einem anderen Grund: Trotz des flotten Stils ist es über weite Strecken einfach langweilig.

GERHARD TRAGESER

Affen und anderen Säugetieren, von Vögeln, Fischen und Mollusken werden viele Leser faszinieren. Der Autor geht schwierigen Problemen nicht aus dem Weg und berücksichtigt auch bisher ungelöste Forschungsfragen. Die ausführlichen Erklärungen biologischer Taxonomien haben manchmal Lehrbuchcharakter. Biologische Grundkenntnisse oder ein großes Interesse am Fach helfen, beim Lesen dieser Abschnitte durchzuhalten.

Aller Sorgfalt in der Theorie zum Trotz hat das Buch seine Schwächen. So hätte im Anschluss an die vom Autor formulierte funktionale Definition des Lebens ein Ausflug in die Synthetische Biologie gepasst. Inwiefern lassen sich Roths Ideen auf die in jüngster Zeit vielfach prophezeiten künstlichen Lebewesen übertragen?

Beim zentralen Thema des Buchs, der Intelligenz, vergleicht Roth zwar Menschen und Tiere, künstliches Bewusstsein und künstliche Intelligenz kommen aber nur ganz am Rand vor. Gerade von Roth erwartet man hier eine Brücke, da sich die Frage der Einzigartigkeit des Menschen natürlich auch mit Blick auf dessen Artefakte wiederholt.

Das Hauptproblem des Buchs betrifft nun gerade die Titelfrage. Gerhard

Roth lässt keinen Zweifel daran, dass sich Mensch und Tier für ihn nur graduell, nicht aber prinzipiell unterscheiden. Der Mensch sei nicht einzigartig, denn jede seiner Fähigkeiten komme zumindest in einer Vorstufe auch bei Tieren vor. Eine konsequente Anwendung dieses Arguments setzt jedoch eine klare Definition von »Vorstufe« voraus. Zählen komplexe Termitenhügel als Vorstufen von Kathedralen? Ist der Vogelflug eine Vorstufe der modernen Luft- und Raumfahrttechnik?

Im Übrigen sprechen Primatologen und Anthropologen wie Bernard Chapaïs dank neuester Forschung zu Familienverhältnissen durchaus von der einzigartigen Sozialstruktur des Menschen (*Science* 331, S. 1276, 2011); und auch den sekundären Werkzeuggebrauch, das heißt das Anfertigen von Werkzeugen mit Werkzeugen, scheinen Schimpansen nur unter Anleitung von Menschen zu bewerkstelligen.

Seine letzte große Chance lässt Roth ungenutzt verstreichen, wo er die kognitiven Fähigkeiten unserer nächsten Verwandten im Tierreich, der Menschenaffen, zusammenfasst. Deren geistige Leistungsfähigkeit entspreche in den meisten Bereichen dem Entwicklungsstand eines zweieinhalb- bis fünf-

jährigen Kindes. Die Titelfrage seines Buchs führe daher »überraschenderweise zu der Frage, ob ein Jugendlicher oder ein Erwachsener einem drei- bis fünfjährigen Kind auf kognitiv-geistiger Ebene quantitativ oder qualitativ überlegen ist«. Eine genaue Antwort bleibt der Autor wie schon zuvor schuldig – und lässt den Leser mit dem Problem zurück, wo prinzipiell die Grenzlinie zwischen quantitativen und qualitativen Unterschieden verläuft.

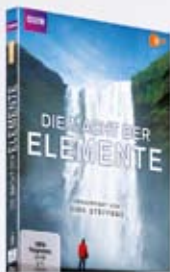
Die Stärken des Buchs liegen in der anschaulichen und umfassenden Erklärung der kognitiven Evolution von Lebewesen. Dabei geht der Autor auch theoretische Probleme an und setzt diese sinnvoll zur biologischen Forschung in Bezug. Der große anthropologische und philosophische Wurf ist Roth jedoch nicht gelungen. Seine Meinung zur Titelfrage ist zwar überdeutlich formuliert, für den unvoreingenommenen Leser aber nicht vollständig nachvollziehbar.

Stephan Schleim

Der Rezensent ist Assistenzprofessor für Theorie und Geschichte der Psychologie an der Universität Groningen (Niederlande) und beschäftigt sich mit dem Grenzgebiet zwischen Hirnforschung, Psychologie und Philosophie.

ANZEIGE

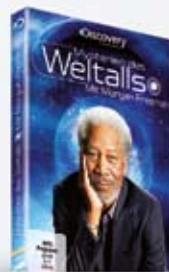
NEUES ENTDECKEN – MIT DEN DOKU-HIGHLIGHTS VON POLYBAND!



DIE MACHT DER ELEMENTE – Präsentiert von Dirk Steffens *



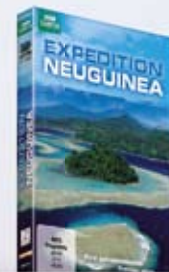
ERDE EXTREM – Leben an den außergewöhnlichsten Orten der Welt



MYSTERIEN DES WELTALLS – Mit Morgan Freeman *



EXPEDITION HIMALAJA – Auf der Fährte der Tiger im Königreich Bhutan *



EXPEDITION NEUGUINEA – Eine geheimnisvolle, fremde Welt *



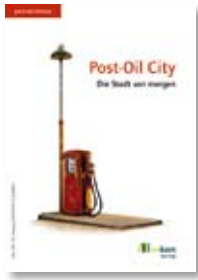
www.polyband.de



Jetzt bei
www.facebook.com/polyband

Überall erhältlich, wo es gute DVDs und Blu-rays gibt.





Oekom e. V. –
 Verein für ökologische Kommunikation (Hg.)
Post-Oil City
Die Stadt von morgen
 Politische Ökologie, Heft 124.
 Oekom, München 2011. 146 S., € 16,90

ZUKUNFTSFORSCHUNG

Unser Weg zu Ökopolis

Werden wir den Weg zur ökologischen Stadt beschreiten können?

Ja, sagen die Autoren und verraten uns, welche Hindernisse wir dabei überwinden müssen.

Der Titel »Post-Oil City« ist Programm: Wie werden wir zukünftig ohne fossile Brennstoffe auskommen? Wie kann die Stadt von morgen aussehen? Wie kann sie insbesondere eine dramatisch wachsende Besiedlungsdichte bewältigen?

Schon heute leben mehr als die Hälfte der Menschen in städtischen Ballungsräumen, Tendenz steigend: Laut UN-Prognosen soll der Urbanisierungsgrad etwa im Jahr 2050 auf durchschnittlich 70 Prozent gestiegen sein, in hochtechnisierten Ländern sogar auf über 85 Prozent. Und auch in Staaten mit sinkender Einwohnerzahl wie Deutschland wächst die Nachfrage nach Wohnungen, weil immer weniger Menschen in ein und demselben Haushalt leben. Heute sind etwa 80 Prozent der weltweiten Treibhausgasemissionen den Städten zuzurechnen – ein Umbruch ist also dringend nötig.

Doch dieses kompakte Buch beschränkt sich nicht darauf, vorhandene Probleme aufzulisten und dem Leser ein Gefühl der Machtlosigkeit zu vermitteln. Mehr als 20 Autoren, von denen die meisten hauptberuflich in öffentlich-rechtlichen Dienstverhältnissen über die Zukunft unserer Gesellschaft nachdenken, liefern in einer bunten Mischung eine detaillierte Analyse des Status quo, erläutern realistische Ideen und Möglichkeiten zur Gestaltung einer zukunftsfähigen Stadt und beschreiben gegenwärtige gesell-

schaftliche Trends und Projekte, die einen Wandel einleiten könnten.

Die Stadt ist nicht nur unser größtes Problem; sie birgt auch das Potenzial für Lösungen. Schon immer wandern Menschen mit kreativer, unkonventioneller Lebensweise in die großen Städte, um sich dort – möglichst unter ihresgleichen – zu verwirklichen. Die Autoren sind sich einig, dass diese Milieus den Wandel der Gesellschaft entscheidend voranbringen und man innovative Denkweisen daher fördern sollte.

Selbst angebautes Gemüse ist angesagt

Einige Pflänzchen sprießen bereits: Ein trendiges Stadtrad statt protziger Limousine gilt als schick, die Bioläden boomen, und Stadtbewohner pflanzen mitten in der Stadt ihr eigenes Gemüse an. Diese »Lohas« (die Abkürzung steht für *Lifestyle of Health and Sustainability*) sind etwas anderes als die vertrauten »Ökos«. Sie wollen gar nicht primär Energie sparen oder das Klima schonen, sondern suchen für ihr eigenes Wohlbefinden nach Werten wie guter Nachbarschaft, verbesserter Luft- und Wasserqualität oder Ruhe, um dem Lärm des Alltags zu entfliehen. Diese Verbindung von Hedonismus und Ökologie führt nicht selten zu originellen und intelligenten Ideen.

Die eher pflichtbetonten Autoren sehen darin auch einen wünschenswerten Trend zu einer engeren Ver-

zahnung der Stadt und ihrer Umgebung, der durch administrative Maßnahmen – in Deutschland durch verstärkte Einwirkung des Bundes – unterstützt werden sollte.

Und die Nachfrage erzeugt ganz nach volkswirtschaftlichen Regeln das Angebot. Lohas wollen auf Luxus nicht verzichten und daher Ökologie mit Funktionalität und Ästhetik verbinden. Da sie inzwischen eine große, kaufkräftige Kundengruppe sind, ist bei den Anbietern eine Aufbruchstimmung zu spüren: Architekten liefern nicht nur Luxus, sondern bieten darüber hinaus standardmäßig detailliertes Wissen über Energiebilanzen und ökologische Baustoffe.

Doch die Verfasser des Buchs warnen die Stadtplaner vor übereifrigen baulichen Maßnahmen; denn indem ganze Stadtteile saniert und restauriert werden, vernichtet man meist günstigen Wohnraum und schafft gesellschaftliche Grenzen zwischen Arm und Reich.

Nachdem viel analysiert, angeregt und diverse Ideen skizziert wurden, endet das Buch mit einer Vision des Alltags in der »Ökopolis« von 2040: »Aktivhäuser« erzeugen aus Sonne und Erdwärme mehr Energie, als sie verbrauchen. Wer sich in der benzinfreien Innenstadt bewegen möchte, verschafft sich per Mobiltelefon ein elektrisches Mietauto oder -fahrrad. Ein netter, amüsanter Abschluss eines in sich runden Buchs. Der Leser erhält alle zentralen Inhalte einfach, verständlich, kurzweilig und ohne die sonst üblichen Weltuntergangsszenarien vermittelt.

Ein spannendes Buch, das neugierig auf die Stadt der Zukunft macht!

Janina Fischer

Die Rezensentin ist promovierte Chemikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

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

Es gibt 330.000 Ärzte.
Hier unsere Empfehlung.



Die FOCUS Ärzteliste gibt es auch unter:
Tel.: 0180 5 480 1000*
Fax: 0180 5 480 1001*
www.focus.de/aerzteliste2011

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

Jetzt für **7,90 Euro** am Kiosk

Bakterien, ade!

»Papiergeld, das von Hand zu Hand geht, ist eine Brutstätte für Krankheitserreger. Aber auf französischen Banknoten werden diese in Zukunft nicht mehr gedeihen können. Das Verfahren wurde durch Zufall entdeckt: Ein Fachmann liess eine besonders schmutzige Note in

zehn Teile verschneiden und mikroskopisch untersuchen. Auf neun Streifen wimmelte es von Eitererregern und Bazillen; der zehnte aber war keimfrei: Jemand hatte mit Kugelschreiber darauf gekritzelt. Die Tinte enthält den Farbstoff Methylenblau, der stark desinfizierend wirkt.« Neuheiten und Erfindungen 11, November 1961, S. 208

Wiederentdecktes Wissen aus der Bibel

»Die östliche Sinai-Halbinsel war zwei Jahrtausende lang fast wasserlos und beinahe unbewohnt. Die Bibel weiß zu berichten, daß der Negev einst fruchtbar war, und die Israeli machten sich auf, diesen alten Lebensraum neu zu erobern. So berichtet die Bibel von der Quelle Abrahams in Geber. Hydrologen suchten die Gegend ab und fanden die Quelle unter dem Schutt von Jahrtausenden. Heute gibt sie wieder frisches Wasser.« Kosmos 11, November 1961, S. 492

Teuflische Masken

»Eine Reihe höchst naturalistisch gestalteter Tiermasken der Tukuna und Juri-Taboca-Indianer vom oberen Amazonas wurde 1820 von zwei bayerischen Naturforschern mitgebracht. Die Tiermasken stellen nicht beliebige Tiere dar, sondern deren spirituelle Herren, die über ihre natürlichen Artgenossen gebieten. ... So können wir als Ergebnis festhalten, daß Tier- und Dämonenmasken die Gefährdung des Menschen durch die übernatürlichen Mächte der Umwelt zum Ausdruck bringen.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 21, November 1961, S. 652



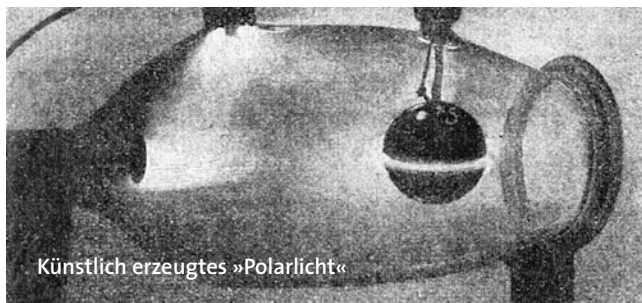
Die Maske eines Affendämons, gefertigt von Tukuna-Indianern



Polarlicht im Labor

»Das Polarlicht, eine der imposantesten Naturerscheinungen, pflegt nur in den höheren Breiten der beiden Erdhemisphären sichtbar zu sein. Nicht selten kommt es vor, daß das Auftreten mit andern Erscheinungen, namentlich magnetischen Störungen zusammenfällt. Tatsache ist, daß zwischen dem Polarlicht, den Bewegungen

der Magnetnadel und dem Verhalten der Sonnenflecken ein Parallelismus besteht. Versuche ergaben, daß ein Magnet Kathodenstrahlen anzieht. Dies veranlaßte Birkeland zu der Konstruktion eines Modelles. Er ließ eine magnetische Kugel – die Erde – ihre Wirkung auf Kathodenstrahlen ausüben. Die ›Erde‹ umgab er mit Barium-Platinzinnür, welches fluoresziert, wenn es von Strahlen getroffen wird: so konnte er intensive Lichtwirkungen hervorbringen.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 46, November 1911, S. 958



Künstlich erzeugtes »Polarlicht«

Lüneburger Wasserfilter

»Die Kieselgurlager der Lüneburger Heide sind Anfang vorigen Jahrhunderts entdeckt worden. Im Winter wird der Abraum, ein 6–7 m aufliegender Sand fortgeschafft. Im Frühjahr und Sommer wird die Gur (die aus Kieselsäure bestehenden Schalen abgestorbener Diatomeen) herausbefördert. Die Stücke der oberen weißen Gur werden getrocknet. Die graue Gur, die unter der weißen liegt, wird geschlemmt und auf Bühnen in der Luft getrocknet. Die grüne, die noch unter der grauen liegt, wird in Brennöfen kalziniert oder gebrannt. Schon in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts merkten Arbeiter, daß das Wasser von den zwischen der Kieselgurlagerung hervorkommenden Quellen viel klarer war als das aus anderen Quellen.« Kosmos 11, November 1911, S. 405

Babysaurierfund aus dem Jurameer

»Während wir von den meisten Versteinerungen nur Knochen und Zähne kennen, wurden in den Schiefen von Holzmaden auch die Umrise der Haut und Weichteile bloßgelegt. Von besonderem Interesse war das Skelett eines embryonalen Ichthyosaurus. Die Schwanzflosse

ist anders gestaltet als beim erwachsenen Tier. Während hier der obere Lappen der Flosse auf dem Schwanz auf sitzt, wird im Alter das hintere Ende abwärts gebogen, und der obere Lappen rückt damit an den Hinterteil, wo er zusammen mit dem unteren Teil eine gemeinsame Flosse bildet.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 47, November 1911, S. 987

FOTOS: AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNISCHE GESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

Ein Dreirad macht Geschichte

Am 2. November 1886, vor 125 Jahren, erteilte das kaiserliche Patentamt in Berlin Carl Benz (1844–1929) unter der Nummer 37435 das Schutzrecht auf ein Dreirad mit Verbrennungsmotor – den Benz-Patent-Motorwagen Nr. 1. Monatlang hatte der Maschinenbauer, der zur ersten Generation studierter Ingenieure in Deutschland gehörte, an den Komponenten gearbeitet. Das Herzstück des Fahrzeugs war ein Einzylinder-Viertaktmotor, der mit flüssigen Kraftstoffen wie Ligroin, Benzin oder Petroleum betrieben werden konnte. Schon mit der Entwicklung einer zuverlässigen Zündung betrat er Neuland. Angesichts einer Leistung von kaum einem PS durfte der Wagen nicht viel wiegen. Benz setzte den Motor deshalb in ein Dreiradgestell mit Stahlspeichenrädern und entlehnte auch andere Elemente wie den Rohrrahmen oder den Kettenantrieb dem damals noch jungen und sehr innovativen Fahrradbau. Die Dreiradkonstruktion ermöglichte zudem eine einfache Lenkung und ein leichtes Kurvenfahren.

Zu jener Zeit hätte wohl niemand erwartet, wie stark diese Erfindung das Leben vieler Menschen verändern würde. Tatsächlich gab es 1886 keinen Bedarf für ein individuelles Motorfahrzeug, hingegen etliche andere Ansätze, Straßenfahrzeuge mit mechanischen Antrieben zu bauen – von Dampfwagen bis zu Elektromobilen. In den nächsten Jahren setzte die Firma Benz & Co. mit Sitz in Mannheim deshalb nur wenige Dutzend ihrer Dreiräder ab. Das Blatt wendete sich erst, als Benz auch vierrädrige Fahrzeuge konstruierte und diese vor allem ins Ausland exportierte. Insbesondere in Frank-

reich fanden wohlhabende Bürger und Adlige Gefallen daran. Ähnlich den Radfahrern veranstalteten sie Rennen, unternahmen gemeinsame Ausfahrten und glänzten mit ihren Wagen bei gesellschaftlichen Anlässen.

Die Klubaktivitäten und Ausstellungen dieser frühen Automobilisten förderten die Nachfrage in ganz Europa. Zwar gelang auch anderen Erfindern der Bau von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor – in Deutschland sind hier vor allem Gottlieb Daimler und Wilhelm Maybach zu nennen –, doch Benz & Co. stieg für einige Jahre zum führenden Automobilhersteller in Deutschland auf. 1895 ließ der Vertriebsdirektor den inzwischen zerlegten Motorwagen Nr. 1 wieder zusammenfügen und schickte ihn als Werbeträger auf nationale und internationale Automobil- und Weltausstellungen. 1906 stifteten Carl Benz und die Benz AG das Fahrzeug dem neu gegründeten Deutschen Museum, wo es seither zu den Glanzstücken der Fahrzeugsammlung zählt.

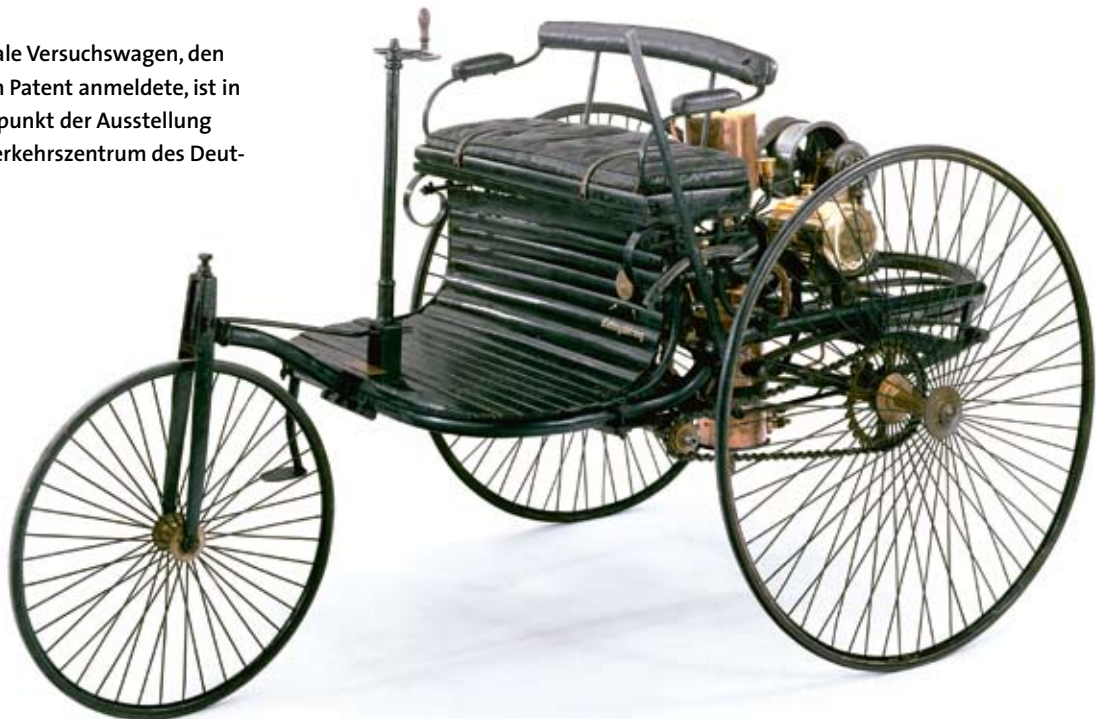
Von **Bettina Gundler**

Die promovierte Historikerin ist Kuratorin für den Straßenverkehr im Deutschen Museum.

Carl Benz auf seinem Patent-Motorwagen bei einem historischen Autokorso aus Anlass der Deutschen Verkehrsausstellung 1925 in München.



Der im Kern originale Versuchswagen, den Carl Benz 1886 zum Patent anmeldete, ist in diesem Jahr Mittelpunkt der Ausstellung »Benz & Co.« im Verkehrszentrum des Deutschen Museums.





NEUE SERIE: **DIE ZUKUNFT DER ENERGIE**

Kraft aus der Sonne

Unter den alternativen Energieträgern bietet die Fotovoltaik das größte Potenzial. In Deutschland werden derzeit mehr Solaranlagen gebaut als in jedem anderen Land. Die Preise fallen, und die Energiebeiträge steigen rasant. Bis 2050 könnte die Fotovoltaik rund zehn Prozent des Weltenergiemix bereitstellen. Unser Auftaktartikel zur neuen sechsteiligen Serie »Die Zukunft der Energie« beleuchtet die existierenden Technologien und die Herausforderungen der Implementierung

SCHOTT AG

Grüner Laser – made in Germany

Mobile elektronische Geräte werden immer kleiner. Um dennoch große Bilder zu erzeugen, sollen zukünftig Miniaturlaserprojektoren eingebaut werden. Bislang fehlte dazu jedoch ein wichtiger Baustein: ein echter grüner Laser. Jetzt haben deutsche Forscher den Durchbruch geschafft – bei uns berichten sie, wie es ihnen gelang

Nobelpreise 2011

Von der Entdeckung der Quasikristalle über die Entschlüsselung der Immunabwehr bis zur beschleunigten Ausdehnung des Universums: Spektrum der Wissenschaft erläutert die wegweisenden Arbeiten der diesjährigen Preisträger



ISTOCKPHOTO / JULKE DANIEK

C-14 und die Chronologie Ägyptens

Wann begann das Neue Reich, wann regierten Fremdherrscher den Nilstaat? Naturwissenschaftler und Ägyptologen versuchen mit ihren jeweiligen Mitteln solche Fragen zu beantworten. Während die einen die Radiokohlenstoffdatierung verbessern, entdecken die anderen in den Gräbern hoher Beamter neue Indizien



KENNETH C. GRANIK

Der geborene Killer

Fühlerschlangen sind schon direkt nach der Geburt Tod bringende Räuber, die ihre Beutefische auf sehr gerissene Weise erlegen

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

VOLLGAS DURCH DIE OSTSEE

EINE PIPELINE VERBINDET EUROPA MIT RUSSLAND

»CASTORO SEI«

BESUCH AUF DEM
VERLEGESCHIFF

INTERVIEW

WIE WICHTIG IST DAS
RUSSISCHE GAS FÜR UNS?

BOMBEN UND MINEN

GEFÄHRLICHES ERBE AUS
ZWEI WELTKRIEGEN

EINE KOOPERATION VON



Nord Stream
The new gas supply route for Europe

MIT

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

SCIENTIFIC
AMERICAN

В Музе Науки

Respekt für Europas Energiebedarf

Europa braucht neue Erdgasquellen, um das Wirtschaftswachstum aufrecht- und gleichzeitig die Klimaschutzziele einzuhalten. Die Nord Stream-Pipeline ist eine rechtzeitige und umweltverträgliche Lösung, um Europa mit Erdgas zu versorgen. Die Nord Stream AG ist ein internationales Konsortium fünf großer Energie-Unternehmen, deren vereinte Erfahrung und Kompetenz die beste Technik, Sicherheit und Corporate Governance für dieses Projekt garantiert. www.nord-stream.com





Richard Zinken
Verlagsleiter
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Aufbruch in eine neue Zeit – mit Erdgas?

Scheinbar ziellos fliegt der Hubschrauber aufs offene Meer hinaus. Irgendwo da draußen, jeden Tag ein paar Kilometer weiter, liegt die »Castoro Sei« – eine schwimmende Fabrik inmitten der Ostsee. In ihrem Inneren entsteht die Ostseepipeline, jene Gasleitung, die Lubmin in Mecklenburg-Vorpommern mit dem mehr als 1200 Kilometer entfernten Wyborg an der russischen Westküste verbindet.

Wir haben die »Castoro Sei« besucht und berichten, wie die Männer dort ein Rohrstück an das nächste schweißen und auf den Grund des Meeres ablassen – und warum unser Autor so beeindruckt war von der »seltsam entspannten Routine« an Bord.

Der Bau einer Pipeline quer durch die Ostsee ist wahrlich ein gigantisches Projekt, das die Betreibergesellschaft Nord Stream alles in allem rund 7,4 Milliarden Euro kostet – und das natürlich nicht unumstritten ist. Politisch nicht, wirtschaftlich nicht und auch nicht aus der Sicht der Umweltschützer.

Gewiss ist, dass wir unseren stetig wachsenden Energiehunger (noch) nicht aus erneuerbaren

Energiequellen stillen können. Und so sehen viele in den modernen Gas-und-Dampf-Kombi-Kraftwerken – nach dem Reaktorunglück von Fukushima erst recht – eine akzeptable Brückentechnologie. Doch wohin treibt uns die Suche nach einer zukunftsfähigen Energiestrategie – kann aus dem Wunsch nach Versorgungssicherheit eine Abhängigkeit entstehen?

Nicht minder bedeutsam sind natürlich Fragen des Umweltschutzes: Welche Auswirkungen haben die Verlegearbeiten auf das empfindliche Ökosystem der Ostsee? Man denke nur an die explosiven oder hochgiftigen Munitionsreste, die seit den beiden Weltkriegen auf dem Meeresgrund schlummern. Und welche langfristigen Folgen sind zu befürchten, für die Flora und Fauna und auch für die Fischer der Anrainerländer?

All das sind Fragen, die wir in diesem Magazin beantworten wollen.

Eine spannende Lektüre wünscht

IMPRESSUM

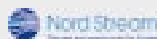
Spektrum CUSTOM PUBLISHING
der Wissenschaft

Leitung: Dr. Joachim Schüring
Anschrift: Spektrum der Wissenschaft – Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg.
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. +49 6221 9126-612, Fax +49 6221 9126-5612

www.spektrum.com/cp

Redaktion: Jan Dönges, Dr. Daniel Lingenhöhl
Art Direction/Layout: Karsten Kramarczik (Ltg.)
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Petra Mers
Übersetzer: Tom Harris (engl.), Rita Pauls, Dr. Nataliya Soultanian (russ.)

Projektleitung Scientific American: Jeremy Abbate
Projektleitung V mire nauki: Swetlana Wladimirowna Popowa



Communications Directors: Ulrich Lissek, Jens D. Müller
Projektleitung: Frank Dudley
Projektcontrolling: Anne Céline Bonnier
Corporate Publishing Manager: Michèle Bodmer
Anschrift: Nord Stream AG, Grafenauweg 2, CH-6304 Zug
Tel. +41 41 766-9191, Fax +41 41 766-9192

www.nord-stream.com

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 11/2011, epoc 6/2011, Scientific American International (Europe) 11/2011, V mire nauki 2/2011
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH / Nord Stream AG. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglich-

machung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung durch Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH / Nord Stream AG unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH / Nord Stream AG 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: © 2011 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH / Nord Stream AG. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH / Nord Stream AG zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

EINE KOOPERATION VON



INHALT



3 Editorial

REPORTAGE

6 Fließband auf dem Meer

Roland Knauer

Alle paar Minuten schweißen die Männer an Bord der »Castoro Sei« ein neues Stahlrohr an die Pipeline quer durch die Ostsee. Jeden Tag schaffen sie rund drei Kilometer

22 Feuer und Flamme ... für Gas

Hanno Charisius

Nach Erdöl und Kohle ist Erdgas weltweit der wichtigste fossile Energieträger. Doch woher stammt der Brennstoff eigentlich? Und wie kommt er bis in unsere Küche?

26 Um jeden Preis?

Daniel Heldmann

Russland wird jedes Jahr Gas für 26 Millionen Haushalte nach Europa liefern. Doch die globalen Gasmärkte befinden sich im Umbruch. Was bedeutet das für unsere Versorgungssicherheit?

INTERVIEW

30 »Ich sehe die Pipeline als Stabilitätsfaktor«

Machen wir uns mit der Ostsee-pipeline zu abhängig von russischem Gas? Ein Gespräch mit dem Politikwissenschaftler Alexander Rahr von der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik

32 Die Pipeline und das Meer

Stefanie Reinberger

Mit Wind- und Sonnenkraft allein kann Europa seinen Hunger nach Energie vorerst nicht stillen. Mit Gas aus Russland wollen Politiker und Energieunternehmen die Versorgungslücke schließen. Geht dies auf Kosten der Natur?

INTERVIEW

39 »Die Angst vor Umweltschäden war riesengroß«

Neel Strøbæk berät den Pipelinebetreiber Nord Stream in Sachen Umweltschutz. Wir befragten sie zu den Auswirkungen des Pipelinebaus und möglichen Spätfolgen

42 Detektivarbeit am Meeresgrund

Kerstin Viering

Der Grund der Ostsee ist übersät mit den explosiven Hinterlassenschaften zweier Weltkriege. Nord Stream ließ nach Bomben und Granaten fahnden – zur Freude der Unterwasserarchäologen

50 Das Letzte ...

ENGINEERING & CONSTRUCTION,

Outstanding solutions for the biggest Oil & gas challenges

Saipem is a leading global general contractor, with a full range of project management, engineering, procurement, construction and installation services, with distinctive capabilities in the design and execution of large-scale offshore and onshore projects, particularly in oil & gas markets.

Saipem has a growing focus on activities in remote and difficult areas, as well as on major technological challenges, such as deep waters exploitation, gas monetization and liquefaction, heavy and unconventional oils production and conversion, and many others.

ONE WORD, ONE WORLD

Skills, Assets, Innovation, People, Environment, Market.

E&C



Fließband auf dem Meer

Alle paar Minuten schweißen die Männer an Bord der »Castoro Sei« ein neues Stahlrohr an die stetig quer durch die Ostsee wachsende Pipeline. Tag für Tag schaffen sie rund drei Kilometer. Ab Ende 2011 soll russisches Gas durch die Rohrleitung strömen. Unser Autor hat die schwimmende Rohrfabrik vor der Küste Finnlands besucht.

Von Roland Knauer





*Auf dem Weg zu neuen
Aufgaben: Nach ihrer Über-
holung in einer Rotterdamer
Werft machte sich die
»Castoro Sei« Anfang 2010
auf den Weg in die Ostsee.
Hier kreuzt sie die Store-
bæltsbroen, die Brücke über
den Großen Belt.*

www.nord-stream.com

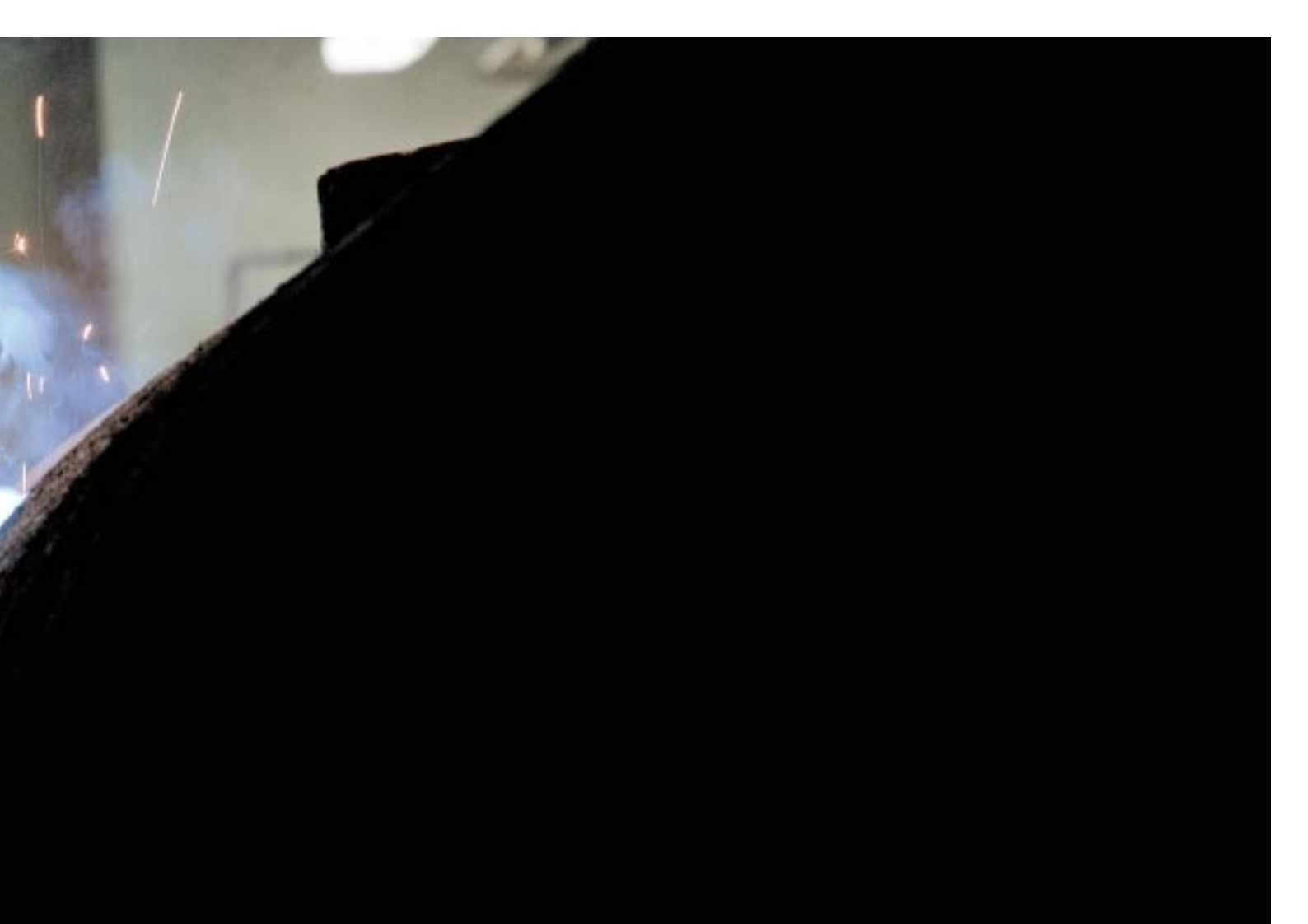


An guten Tagen verschwinden mehr als 300 der zwölf Meter langen Rohrstücke im Bauch der »Castoro Sei«. Am Bug des Schiffs (im Bild unten) taucht die fertige Pipeline ins Meer.

Bevor die mit einem Betonmantel beschwerten Rohre ins Schiffsinnere wandern, müssen sie gereinigt und vom Flugrost befreit werden.








Jede Rohrverbindung wird dreifach verschweißt – schließlich muss die Naht auf dem Grund der Ostsee viele Jahrzehnte dicht halten.





Alle paar Minuten wächst die Pipeline um ein weiteres Rohrstück. Nach mehreren akribischen Kontrollen verlässt die Gasleitung das Schiff in Richtung Meeresgrund.



Diesmal ist Domenico Alferj ins finnische Turku gekommen, wo er sich jetzt in einen engen Neoprenanzug zwängt, um sich auf den letzten Teil seines Wegs zur Arbeit zu machen. Alferj, der gerade einige Zeit bei seiner Familie in Italien verbracht hat, klettert in den bereitstehenden Hubschrauber. Beim Flug über die Ostsee verlangen die Sicherheitsvorschriften diesen unbequemen Aufzug. Und so schwitzt auch sein Sitznachbar im Helikopter, Arcangelo De Luca, in einem solchen Taucheranzug. Unterhalten können sich die zwei nicht: Die beiden Turbinen über ihren Köpfen machen einen Höllenlärm. Zum Glück dauert der Flug nur eine halbe Stunde, dann kommt der Arbeitsplatz der Männer in Sicht: die »Castoro Sei«. Domenico Alferj ist Kapitän auf diesem Schiff, Arcangelo De Luca sein Ingenieur.

Sanft setzt der Helikopter mit den beiden und einem Dutzend weiterer Besatzungsmitglieder seine Kufen auf das Landedeck am Heck des Schiffs – 33 Meter über der Wasseroberfläche. Wer die »Castoro Sei« zum ersten Mal sieht, glaubt, es mit einer Bohrinnele zu tun zu haben. Denn das 152 Meter lange und 70 Meter breite Schiff besteht im Wesentlichen aus einer gigantischen Plattform, die auf zwei Reihen von jeweils fünf riesi-

gen Säulen ruht. Halbtaucher nennen Fachleute solche Konstruktionen. Unter Wasser münden diese Säulen nämlich in zwei Pontons, die das 32.000 Tonnen schwere Gefährt tragen. Dort gibt es Ballasttanks, die geflutet werden können. Dann sinkt die »Castoro Sei« so weit ins Wasser, bis sie einen Tiefgang von mehr als 15 Metern hat. Liegt der Halbtaucher so tief im Meer, gerät er auch bei stürmischem Wetter kaum ins Schwanken. Unter Seekrankheit leiden die rund 330 Menschen an Bord daher nur selten.

Aber natürlich ist nicht das Wohlbefinden der Besatzung der Grund für die aufwändige Konstruktion. Die ruhige Lage auf hoher See garantiert vor allem, dass die Techniker und Ingenieure dort Präzisionsarbeit leisten können. Denn die »Castoro Sei« ist eine schwimmende Fabrik – oder genauer: eines von insgesamt drei Verlegeschiffen, auf denen die beiden jeweils 1224 Kilometer langen Röhren der Ostseepipeline zusammenschweißt und auf den Meeresboden abgesenkt werden. Durch sie sollen ab 2012 in jedem Jahr ungefähr 55 Milliarden Kubikmeter Gas von Russland nach Europa strömen – das entspricht rund zehn Prozent des derzeitigen Gasverbrauchs in Europa und reicht für die Versorgung von 26 Mil-

Kapitän Domenico Alferj (links) findet man meist auf der Brücke der »Castoro Sei«, während Ingenieur Arcangelo De Luca stets zur Stelle ist, wenn es auf der schwimmenden Fabrik irgendwo klemmt.



lionen Haushalten. »Wir verlegen mit etwa 70 Prozent den Löwenanteil der beiden Röhren«, erklärt Kapitän Domenico Alferj, als der Lärm des nach Turku zurückfliegenden Helikopters in der Ferne verklingt.

Da haben die soeben angekommenen Besatzungsmitglieder ihre unbequemen Anzüge bereits gegen orangefarbene Overalls getauscht – bald beginnt ihr Dienst. Vier Wochen bleiben sie auf dem Schiff, dann folgen drei Wochen Freizeit in der Heimat. 28 Arbeitstage im Wechsel mit 21 freien Tagen: Das klingt nicht schlecht. Doch die Tage an Bord sind anstrengend und gehorchen dem immer gleichen Rhythmus von zwölf Stunden Dienst und zwölf Stunden Ruhe. Sonntags wird genauso gearbeitet wie an Werktagen, ebenso an Weihnachten, Neujahr und Ostern. »Auch Ferragosto feiern wir nur, wenn wir gerade dienstfrei an Land sind«, bestätigt Domenico Alferj. Dabei ist dieser 15. August, der im Deutschen Mariä Himmelfahrt heißt, der Höhepunkt der Ferien in Bella Italia und lässt sich nur mit dem Feiernmarathon von Weihnachten bis Neujahr vergleichen. Doch die Italiener sind auf der »Castoro Sei« ohnehin in der Minderzahl. Auf dem Schiff des italienischen Eigners Saipem bekleiden sie vornehmlich die höheren Ränge, während die meisten Arbeiter aus südostasiatischen Ländern stammen.

FRAUEN GIBT ES NICHT AN BORD

Wie an jedem Tag heben auch heute die beiden riesigen Kräne, die sich auf Gleisen an beiden Seiten des Arbeitsdecks entlangbewegen, unablässig ein Rohr nach dem anderen von den Decks der Transportschiffe, die seitlich an der »Castoro Sei« festgemacht haben. Von der Brücke aus gesehen erscheinen die zwölf Meter langen Rohre winzig klein – man verliert hier rasch das Gefühl für die Dimensionen. Nur die Männer, die vom Deck aus an langen Seilen die herabschwebenden Rohre an ihren Platz lenken, erlauben einen Vergleich.

Produziert werden die Rohre mit einem Innendurchmesser von 1,153 Metern in Mülheim an der Ruhr, in Wyksa zirka 350 Kilometer östlich von Moskau sowie in Japan. Wenn sie die Stahlwerke verlassen haben, passen sie gerade auf einen Sattelschlepper. Da der Stahl bis zu 41 Millimeter dick ist, wiegt jedes Rohr elf bis zwölf Tonnen. Eine hauchdünne Schicht aus braunrotem Epoxidharz im Inneren des Rohrs soll den Reibungswiderstand verringern und das Gas möglichst leicht durch die Pipeline strömen lassen. Außen verhindert eine rund fünf Millimeter dicke Kunststofflage, dass der Stahl in den Tiefen der Ostsee zu rosten beginnt.



Per Bahn gelangen die derart vorbereiteten Rohre von Mülheim in den Hafen Mukran auf Rügen und von Wyksa in den finnischen Hafen Kotka. In eigens dort errichteten Fabriken werden an jedem Tag 200 dieser mächtigen Rohre mit einer bis zu elf Zentimeter dicken Betonhülle versehen. Ohne sie wäre die Pipeline später schlichtweg zu leicht und müsste aufwändig am Meeresboden verankert werden. Der Beton verdoppelt ihr Gewicht auf rund 23 Tonnen.

Sowohl von deutscher und finnischer als auch von russischer Seite aus bringen Transportschiffe einen Teil der fertigen Rohre in den finnischen Hafen Hanko sowie in die schwedischen Häfen Karlskrona und Slite auf Gotland. Zusammen mit Mukran und Kotka sind das fünf Lager, aus denen sich wendige, relativ kleine Transportschiffe bedienen können. Permanent laufen sie die »Castoro Sei« an, deren Hunger nach neuen Rohren unersättlich ist. »Da wir Tag und Nacht durcharbeiten, brauchen wir laufend Nachschub«, erklärt der Ingenieur Arcangelo De Luca.

Um diesen Nonstopbetrieb zu garantieren, sind die meisten Stellen an Bord gleich mehrfach besetzt: Zwei Männer wechseln sich auf dem Schiff im Zwölfstundensrhythmus zwischen Arbeit und Freizeit ab, ein dritter genießt derweil den Landurlaub. Wird im Lauf der Schicht ein Gang zur Toilette oder in die Kantine fällig, übernimmt ein Springer den Job. Frauen gibt es übrigens nicht an Bord.

An diesem Tag liegt ein kräftiges Hoch über der Ostsee. Herrliches Wetter, das die Arbeiter im Bauch der schwimmenden Fabrik nicht interessiert. Einer der Kräne hievt gerade ein neues Rohr hinauf. Da der Betonmantel einige Hand breit vor

Wer hier einsteigt, darf nach Hause – in der Regel für drei Wochen. Danach bringt ihn der Hubschrauber zurück an den Arbeitsplatz, wo sich zwölf Stunden Arbeit und zwölf Stunden Ruhe abwechseln.

AUF EINEN BLICK

1. Die »Castoro Sei« ist eines von drei Verlegeschiffen, auf denen die Ostseepipeline produziert wird.
2. Während die Männer an Bord ein Teilstück nach dem anderen an die Gasleitung schweißen, zieht sich das Schiff an verankerten Seilen vorwärts.
3. Am Ende werden die Pipelineabschnitte von Spezialtauchern am Meeresgrund zusammengeschweißt.



Perez Alvin ist Herr über die mächtigen Winden (rechts). Mit ihrer Hilfe zieht er die »Castoro Sei« an armdicken Seilen zu den in großer Entfernung vom Schiff versenkten Warp-Ankern.



BEIDE FOTOS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / JOACHIM SCHÜRING

den beiden Rohrenden aufhört, liegen dort die Antikorrosionsbeschichtung und die Stahlwände bloß. Sie werden maschinell gereinigt und für den eigentlichen Schweißvorgang mit einer speziellen Fräsmaschine vorbereitet. In einem ersten Schritt verbinden die Arbeiter jeweils zwei der zwölf Meter langen Pipelineabschnitte mit Hilfe von Schweißautomaten miteinander. Sobald das flüssige Metall erstarrt ist, erfolgt die erste Untersuchung der Naht – Millimeter für Millimeter. Selbst kleinste Schwachstellen können auf diese Weise zuverlässig aufgespürt werden. Der Chef entscheidet dann, ob sich der Schaden beheben lässt oder ob die beiden Rohre recycelt werden.

ANTRIEB WIE IM MITTELALTER

Über eine Art Aufzug gelangen die nunmehr 24 Meter langen »Doublejoints« zur eigentlichen Fertigungsstraße, der »Firing Line«, die sich längs durch die »Castoro Sei« zieht. An ihrem Ende – dem Bug der schwimmenden Fabrik – verlässt die fertige Pipeline das Schiff und taucht über einen mehr als 40 Meter langen Ausleger, den so genannten Stinger, in die Ostsee. »Dabei bewegt sich das ganze Schiff rückwärts unter der Leitung weg«, erzählt Kapitän Alferj. Und zwar nicht mit Hilfe eines eigenen Antriebs, sondern auf eine Art und Weise, wie sie schon im Mittelalter üblich war – zum Beispiel auf Flusskähnen. Damals ruderten Männer mit einem kleinen Boot voraus und versenkten in größerer Entfernung einen Anker. Nun zog die Mannschaft sich und den großen Kahn am Tau heran, holte den Anker wieder ein, und das mühselige Spiel begann von vorn. »War-

pen« hieß und heißt die Methode, mit der sich auch die »Castoro Sei« durch die Ostsee bewegt.

Hier erledigen das jedoch acht Dieselmotoren, die zusammen mehr als 30 000 PS stark sind und an insgesamt zwölf haushohen Warp-Ankern ziehen. An jeder der vier Ecken der »Castoro Sei« befinden sich die Winden für jeweils drei dieser Anker. Diese werden in großer Entfernung vor den Bug gelegt – so können sie die frisch verlegte Pipeline nicht gefährden. Am Heck liegen sie enger beieinander und weichen jeweils nur ein paar Grad von der Fahrtrichtung ab (siehe Grafik S. 19 rechts unten). Sobald ein weiterer Doublejoint fest mit der Pipeline verbunden ist, holen die Maschinen die armdicken Stahlseile am Heck so weit ein, dass sich die »Castoro Sei« in 24-Meter-Abschnitten rückwärtsbewegt und die stetig länger werdende Gasleitung am Vorderschiff ins Wasser lässt. Die Seile am Bug werden entsprechend nachgelassen. Müssen die Anker verlegt werden, holen Hilfsschiffe die Ungetüme ein und transportieren sie an ihren neuen Platz. Die »Castoro Sei« verfügt zudem über vier Propellergondeln, mit denen der Steuermann, ähnlich wie auf großen Kreuzfahrtschiffen, für die Feinabstimmung dieser Bewegungen sorgen kann.

Im Inneren der »Castoro Sei« halten derweil drei Spanner das Ende der Pipeline in Position. Sie erinnern an die Kettenfahrwerke eines Panzers und pressen sich von oben und unten gegen das Rohr. Ist wieder ein Doublejoint angeschweißt, läuft dieser, geführt von den »Panzerketten« zum Bug und verschwindet über den Stinger in der Ostsee. Dabei macht die Gasleitung zwei riesige

RIESIGE MASCHINEN BEWEGEN RIESIGE MASSES – UND DOCH IST DAS GANZE TREIBEN BESTIMMT VON EINER SELTSAM ENTSPANNTEN ROUTINE

Bögen, die an den Buchstaben »S« erinnern – bevor sie schließlich auf dem Grund der Ostsee zur Ruhe kommt. »Ist das Meer 80 Meter tief, erreicht das Rohr erst in einer Entfernung von 350 Metern den Boden«, erklärt Arcangelo De Luca.

Über diese Länge ist das vermeintlich starre Rohr aus Stahl und Beton nämlich flexibel wie ein langer Strohalm. Auch ein Wolkenkratzer vermag ja bei Sturm durchaus um mehr als einen Meter hin- und herzuschwanken. Theoretisch könnte man die Pipeline in einem Kreis von vier Kilometer Durchmesser auf den Grund der Ostsee legen – ohne dass sie Schaden nähme. Im Vergleich dazu sind die Belastungen entlang der schlanken S-Kurve beim Absenken auf den Meeresgrund viel geringer.

MIT DER PRÄZISION EINES UHRWERKS

Alle paar Minuten zieht sich die »Castoro Sei« erneut um 24 Meter nach hinten. »Fünf oder sechs Minuten dauert die erste Schweißnaht«, erklärt Arcangelo De Luca. Dann wandert die Pipeline mitsamt ihrem neuen Ende auf Rollen 24 Meter weiter. Während die Arbeiter hinten einen neuen Doublejoint ansetzen, wird vorn die noch glühende Verbindung zum zweiten Mal verschweißt. Wieder dauert es einige Minuten, dann bewegt sich die Pipeline noch einmal 24 Meter weiter und erhält eine dritte Schweißnaht. Die Arbeiten laufen wie am Fließband.

Es ist laut hier unten. Funken sprühen und tauchen die Szenerie in gleißendes Licht. Zum Schutz tragen die Männer Brillen mit schwarzen Gläsern. Riesige Maschinen bewegen riesige Massen – und doch ist das ganze Treiben bestimmt von einer seltsam entspannten Routine. Wer hier arbeitet, hat seinen festen Platz und weiß genau, was er zu tun hat. Nur ein paar Dutzend Männer schweißen hier die tonnenschweren Rohre zu einer mehr als 1200 Kilometer langen Pipeline zusammen – mit der Präzision eines Uhrwerks. Fehler sind selten, Unfälle noch seltener.

So penibel, wie hier auf Sicherheit von Leib und Leben geachtet wird – es gibt ein ausgeklügeltes Wegenetz mit Ampeln und Signalhörnern –, so kompromisslos erfolgt die Qualitätskontrolle. Schließlich soll über 50 Jahre lang Gas durch die Pipeline strömen. Wenn eine undichte Schweißnaht erst nach der Inbetriebnahme entdeckt wird, können die Reparaturen leicht Millionen kosten. Deshalb durchlaufen die drei Nähte nun eine weitere Ultraschallprüfung, bei der mikroskopisch kleine Unregelmäßigkeiten auffallen sollen – potenzielle Angriffspunkte für gefährlichen Rost. Wie oft schrillen an dieser Stelle die Alarmglocken? Der sonst alle technischen Details begeistert erklärende Arcangelo De Luca weicht aus: »Jedenfalls wird die Schweißnaht dann repariert«, sagt er schließlich. Sehr selten müsse man aber auch mal einen Doublejoint austauschen.

FAKTEN

1,153
Meter beträgt der Durchmesser der Gasrohre.

202 000
betonummantelte Rohre werden insgesamt verlegt.

2 150 000
Tonnen Stahl liegen am Ende am Ostseegrund.

7 400 000 000
Euro kosten die beiden Pipelinestränge.



Im Inneren des Verlegeschiffs haben panzerkettentartige Transportbänder die Pipeline sicher im Griff.

Die »Castoro Sei« bei der Arbeit

Im April 2010 begann Nord Stream mit der Verlegung des ersten von zwei Pipelinesträngen: Die »Castoro Sei«, die den Löwenanteil der Bauarbeiten leistet, nahm vor der Insel Gotland ihre Arbeit auf.

Von Wyborg in Russland bis nach Lubmin in der Nähe von Greifswald in Deutschland führen die zwei Leitungsstränge 1224 Kilometer über den Meeresboden der Ostsee. Mit dem Bau der Gasleitung hat Nord Stream die italienische Firma Saipem beauftragt, ein führendes Unternehmen im Bereich der Offshore-Projekte.

Etwa 70 Prozent der Pipeline werden von der »Castoro Sei« verlegt, einem verankerten Verlegeschiff. Im Finnischen Meerbusen, der für dichten Schiffsverkehr und Munitionsaltlasten bekannt ist, wird die »Solitaire« von Allseas eingesetzt, die ohne Verankerung auskommt. In den seichten Gewässern in der Nähe des deutschen Anlandungsbereichs kommt die »Castoro Dieci« von Saipem zum Zug, ein Schiff mit extra flachem Rumpf. Jedes dieser Schiffe ist eine schwimmende Fabrik: Die Rohre werden von Transportschiffen dorthin angeliefert, an Bord zusammengesweißt und dann verlegt.

Bald wird die Pipeline pro Jahr 55 Milliarden Kubikmeter Erdgas befördern – genug, um den Bedarf von 26 Millionen europäischen Haushalten abzudecken. Von der Empfangsstation in Lubmin wird das Erdgas in das europäische Gasleitungsnetz einfließen und Verbraucher in Ländern wie Deutschland, Dänemark, Frankreich und Großbritannien erreichen.

KRAN

Zwei um 360 Grad drehbare Kräne bewegen sich auf Gleisen über das Hauptdeck. Jeder kann täglich 200 Rohre auf das Schiff heben.

AUSLEGER

Der so genannte Stinger stützt die Pipeline, während sie ins Meer abtaucht.

UNTERSUCHUNG NACH DEM VERLEGEN

Um die korrekte Position der Leitung zu überprüfen, wird diese beim Aufsetzen auf dem Meeresboden überwacht.

TAUCHROBOTER

Ein mit Sensoren und Kameras ausgerüsteter Tauchroboter (ROV) übermittelt Informationen direkt vom Meeresboden.

S-KURVE

Die Pipeline bildet beim Absenken auf den Meeresboden eine S-Form. Dies bewahrt sie vor Beschädigungen.

AUFSCHÜTTUNGEN

An bestimmten Stellen ist das Aufschütten von grobem Kies und Gesteinsbrocken nötig, um eine stabile Auflage für die Rohre zu schaffen.

EINE SCHWIMMENDE FABRIK

Die »Castoro Sei« ist ein Halbtaucher und verlegt rund 70 Prozent der Nord-Stream-Pipeline.

- Maße: 152 Meter lang, 70,5 Meter breit
- Tiefgang: 14 Meter
- Verlegetempo: etwa 2,5 Kilometer am Tag

TRANSPORTSCHIFF

Aus fünf Lagern entlang der Route werden die rund 24 Tonnen schweren Rohre zum Verlegeschiff geliefert.

HUBSCHRAUBERLÄNDEPLATZ

Die Besatzung gelangt per Hubschrauber auf das Schiff. Dieser landet auf dem Heck der »Castoro Sei«.

UNTERSUCHUNG VOR DEM VERLEGEN

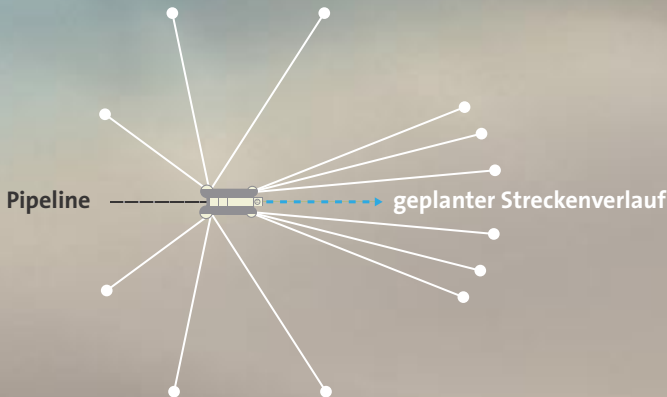
Bereits in der Planungsphase wurde der Meeresboden genau erkundet. Eine erneute Untersuchung kurz vor der Verlegung gewährleistet die Sicherheit der Pipeline.

PONTONS

Die »Castoro Sei« ruht auf zwei unter der Wasseroberfläche liegenden Pontons. Diese können mit Wasser gefüllt und abgesenkt werden, was dem Schiff in stürmischer See Stabilität verleiht.

VERANKERUNG

Während der Bauarbeiten erlaubt ein Zwölf-Punkt-Verankerungssystem die exakte Positionierung der »Castoro Sei«. An jedem der zwölf Verankerungskabel zieht eine 124 Tonnen schwere Winde. Das Schiff verfügt zusätzlich über Bugstrahlruder, die die Positionierung unterstützen.





Ein Molch geht auf Reisen

Intelligente Inspektionsgeräte, so genannte Molche (*Pipeline Inspection Gauges*, »PIGs«), werden regelmäßig durch die Gasleitung befördert, um von innen nach Korrosionsschäden oder Lecks zu suchen (Bild). Die Außenkontrolle der verlegten Rohre erfolgt mit Hilfe ferngesteuerter Unterwasserfahrzeuge (*Remotely-Operated Vehicles*, »ROVs«).

Die feine italienische Art: In der Kombüse der »Castoro Sei« legt der cameriere Wert auf ein stilvolles Äußeres.

Doch heute läuft alles wie am Schnürchen: Die Pipeline rückt erneut einen 24-Meter-Abschnitt weiter zu ihrer letzten Station in der Firing Line. Hier legen zwei Arbeiter eine Kunststoffplane rund um die verschweißten Enden der Stahlrohre und erhitzen sie mit einem Gasbrenner. Die Plane schrumpft zusammen und versiegelt den Bereich zwischen den Betonhüllen. Zum Schluss nehmen die Männer ein Stahlblech, das von der Betonummantelung des einen Rohrs zu der des nächsten reicht, fixieren es mit Stahlbändern und füllen durch ein Loch Kunststoffschaum in den Hohlraum. Nun sind es nur noch wenige Meter, bis der noch warme Abschnitt für immer in die Ostsee taucht.

Unterdessen beobachtet Kapitän Domenico Alferj ein paar Stockwerke höher aufmerksam den Horizont. Der Seewetterbericht hat ein Ende des Sonnenscheins vorhergesagt. Nun ziehen erste Wolken auf. »Stürme machen uns eigentlich nur im Herbst und Winter ab und zu Probleme«, erklärt er in stark italienisch gefärbtem Englisch. Türmen sich die Wellen höher als drei oder dreieinhalb Meter, vermögen auch die Pontons tief unter Wasser die »Castoro Sei« nicht mehr völlig ruhig zu halten. Dann wird das Verlegen der langen Leitung schwieriger, wenngleich nicht unmöglich. »Wir arbeiten nur etwas langsamer.«

Erst ab Windstärke acht, wenn der Wind mit mehr als 60 Kilometern pro Stunde über das Arbeitsdeck pfeift, ordnet Domenico Alferj eine Unterbrechung an. Dann schweißen die Techniker eine große Stahlkappe auf das offene Ende der Pipeline und verhindern so, dass Wasser in den bereits verlegten Strang eintritt. An einer zehn Zentimeter dicken Stahltrasse lassen sie die verschlossene Pipeline schließlich auf den Meeresgrund ab. »Das Ganze dauert etwa drei oder vier Stunden«, erzählt Arcangelo De Luca. Deshalb seien zuverlässige Seewetterberichte auch so

wichtig. Die Männer der »Castoro Sei« müssen mit diesem Manöver rechtzeitig vor dem Sturm fertig werden. Geht alles glatt, wartet die »Castoro Sei« an Ort und Stelle einfach auf ruhiges Wetter.

Noch bevor der Wind abflaut, beginnt die Arbeit wieder: Ein unbemannter, ferngesteuerter Unterwasserroboter taucht zum losen Pipelineende, nimmt die Stahltrasse auf und bringt sie an Deck der »Castoro Sei«. Mit Hilfe von Winden wird die Pipeline nun eingeholt. Nachdem ungefähr fünf Stunden später die Stahlkappe abgenommen und die See ruhig ist, machen die Männer in der Firing Line wieder genau das, was sie immer tun. »Wenn wirklich alles gut läuft, schaffen wir an einem Tag mehr als vier Kilometer Pipeline«, sagt Domenico Alferj. »Im Schnitt sind es immerhin noch drei Kilometer.«

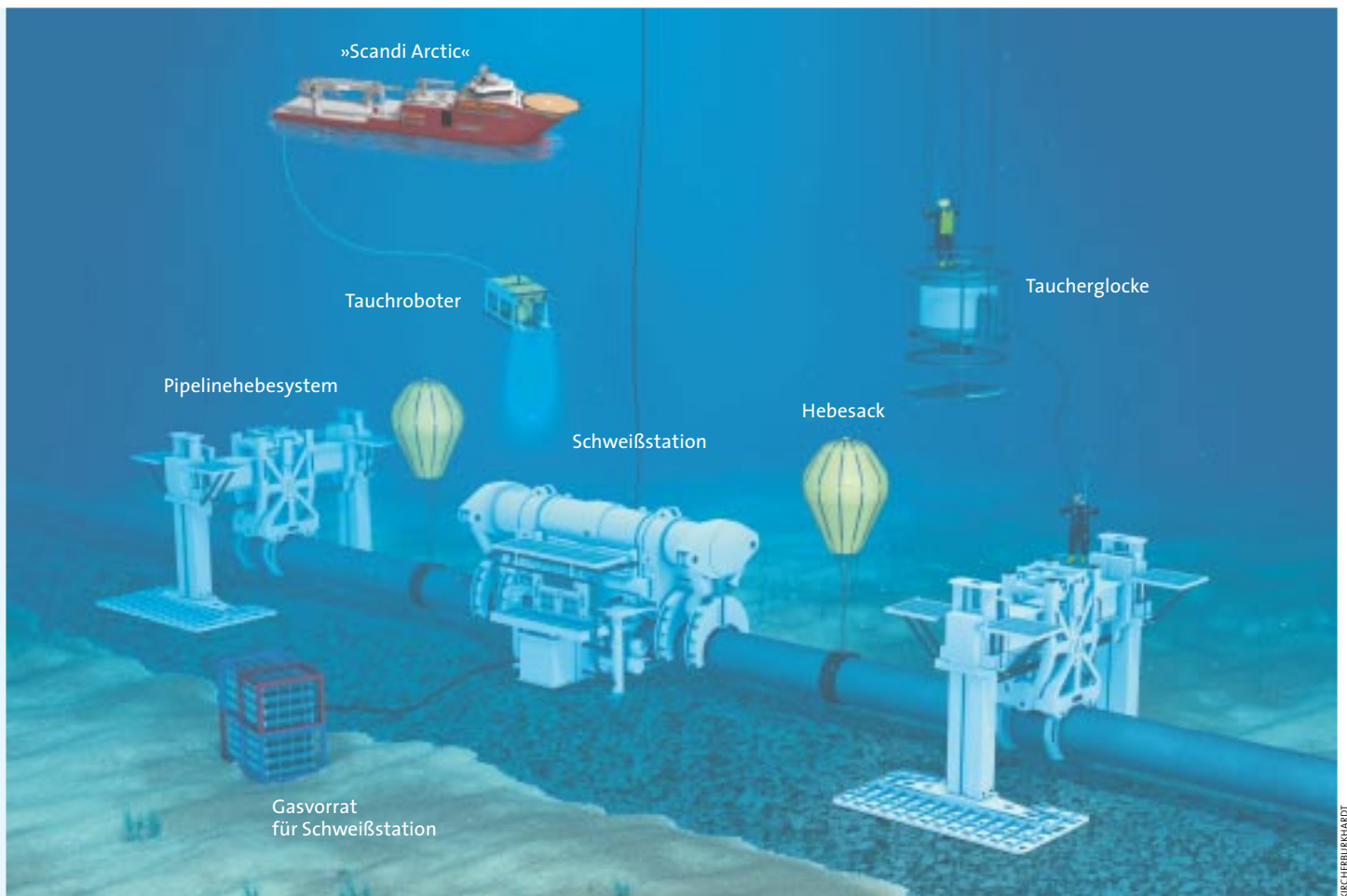
MIT HOCHDRUCK DURCH DIE OSTSEE

Die Bauarbeiten für den ersten Strang dauerten von April 2010 bis Anfang Mai 2011. Im Juni 2011 begann die Besatzung der »Castoro Sei« mit der Verlegung des zweiten Strangs, die bis Mai 2012 erfolgt sein soll. Ungefähr 80 Prozent der Leitung liegen unmittelbar auf dem Grund der Ostsee. Mancherorts mussten Unebenheiten am Meeresgrund zunächst mit Kies aufgefüllt werden, um die Stabilität nicht zu gefährden. In flachen Gewässern wie im Greifswalder Bodden oder dort, wo die Pipeline Schifffahrtsstraßen kreuzt, werden zunächst Gräben ausgehoben, in denen sie im Fall des Falles vor Beschädigungen nach einer Schiffshavarie geschützt ist.

Nach ihrer Fertigstellung wird das Gas in Russland von einer Pumpstation mit hohem Druck in die Röhre gepresst. Auf Grund der niedrigen Temperaturen und des hohen Drucks am Meeresgrund konnten die Konstrukteure der Ostseepipeline auf Pumpstationen entlang der Leitung verzichten. So fällt der Gasdruck über die 1224 Kilometer lange Strecke zwischen Russland und Deutschland kontinuierlich ab, weshalb die Röhren auf den ersten 300 Kilometern durch den Finnischen Meerbusen aus 41 Millimeter dickem Stahl gefertigt sind und mit einem Druck von bis zu 220 Bar betrieben werden. Zum Vergleich: Der Maximaldruck eines Autoreifens liegt bei drei Bar. Wenn das Gas schließlich Deutschland erreicht, ist sein Druck auf 110 Bar gesunken. Hier haben die Stahlwände nur noch eine Stärke von 27 Millimetern.

Beide Stränge der Ostseepipeline bestehen aus jeweils drei Abschnitten unterschiedlicher Wandstärke. Sie werden unabhängig voneinander verlegt und erst am Ende der Arbeiten unter Wasser miteinander verbunden.





Beim ersten Strang ist genau dies bereits geschehen. Doch zuvor kam der Moment der Wahrheit. Ein Spezialschiff testete, ob die Leitung am Meeresgrund dicht ist, indem es aufbereitetes Meerwasser in die jeweiligen Abschnitte presste. Pumpen an Bord steigerten den Druck bis zur maximal zulässigen Grenze – bis weit über den späteren Betriebsdruck. Erst nachdem die Messgeräte auch nach 24 Stunden keinerlei Druckabfall zeigten, konnten die Teilstücke miteinander verbunden werden – auch dies eine ingenieurtechnische Meisterleistung: Nachdem zunächst ein ferngesteuerter Unterwasserroboter die Stahlkappe am Ende des Teilstücks abtrennte und mit einem Stopfen abdichtete, wurde eine große Schweißstation in 80 bis 110 Meter Tiefe abgelassen und über den beiden nebeneinanderliegenden Enden der Teilstücke in Position gebracht.

Nachdem alles Wasser herausgepresst war und die stählernen Rohrenden trocken lagen, machten sich mehrere Taucher auf den Weg zum Meeresgrund – wo sie das Gleiche taten wie ihre Kollegen im Bauch der »Castoro Sei«: Sie verbanden die Enden mit Hilfe eines Schweißroboters, der von der »Scandi Arctic« aus gesteuert und überwacht wurde – einem Spezialschiff, das über alle Gerätschaften verfügt, die nötig sind, um die Teilstücke zu bewegen, anzuheben, zu kürzen und zu verbin-

den. Am Ende versiegelten die Taucher die Unterwassernaht (siehe Bild oben).

All dies dauert im Schnitt ein paar Wochen. Eine lange Zeit, in der die Spezialisten im wahrsten Sinn des Wortes unter Hochdruck leben – nämlich in Wohnkabinen an Bord der »Scandi Arctic«, in denen ein Druck herrscht wie in den Tiefen der Ostsee. Ist ihre Arbeit erledigt, drücken riesige Kompressoren das Meerwasser aus der nun fertig gestellten Pipeline heraus. Ein stetiger Luftstrom soll gewährleisten, dass die Röhre völlig trocken ist, bevor das erste Gas hindurchströmt.

Und das ist Ende 2011 der Fall. Dann ist der erste der beiden Pipelinestränge betriebsbereit, dann machen sich hochrangige Politiker, Wirtschaftsführer und andere Prominenz aus allen beteiligten Ländern auf nach Lubmin unweit von Greifswald. Denn hier, in diesem Kurort mit gut 2000 Einwohnern, kommt die Leitung an Land, und hier werden sie unter großem Medienrummel das »First Gas« feiern. Doch dann sind Kapitän Domenico Alferj und sein Ingenieur Arcangelo De Luca schon wieder auf großer Fahrt – um irgendwo auf der Welt eine andere Pipeline zu verlegen.

Roland Knauer ist freier Journalist und Fotograf im brandenburgischen Lehnin.

Die Ostseepipeline wird in mehreren Abschnitten verlegt. Unterwasserroboter legen die Rohrenden schließlich zusammen. Anschließend werden von der »Scandi Arctic« schwere Gerätschaften in die Tiefe gelassen – unter anderem auch die Schweißstation, in der Spezialtaucher die Rohre endgültig miteinander verbinden.

Feuer und Flamme ...

... für Gas

Nach Erdöl und Kohle ist Erdgas weltweit der wichtigste fossile Energieträger. Schon in einigen Jahrzehnten dürfte er auf Platz eins vorrücken. Doch woher stammt der Brennstoff eigentlich? Und wie kommt er bis in unsere Küche?

Von Hanno Charisius



Ein alltäglicher Anblick, doch bis das Erdgas den Küchenherd erreicht, hat es tausende Kilometer hinter sich gebracht – und viele Millionen Jahre.

Mit dem Gas ist es wie mit Wasser: Man dreht den Hahn auf, und es strömt. Woher es kommt, bleibt hinter der Wand verborgen. Dabei hat der Brennstoff, mit dem wir kochen, heizen oder elektrischen Strom erzeugen, eine lange Reise durch Raum und Zeit hinter sich. Demnächst, wenn die Ostseepipeline fertig ist, könnte sie im fernen Sibirien beginnen – im Gasfeld »Juschno Russkoje«. Unter anderem aus dieser Lagerstätte wird das Gas stammen, das durch ein überirdisches Netz von Gasleitungen bis ins mehr als 2500 Kilometer entfernte Wyborg an der russischen Ostseeküste und von dort durch die Nord-Stream-Pipeline nach Lubmin in Mecklenburg-Vorpommern strömt. Hier gelangt es ins europäische Gasnetz, um an irgendeinem Herd entzündet zu werden.

Seinen Ursprung hat es rund 1000 Meter unter dem sibirischen Dauerfrostboden. In dem porösen Sandstein ist so viel Erdgas gespeichert, dass Deutschland damit seinen Bedarf für Jahrzehnte decken könnte. Solche Lagerstätten sind einer Vielzahl von geologischen Zufällen zu verdanken – und sehr viel Zeit. In der ausgehenden Jurazeit, vor rund 150 Millionen Jahren, war Sibirien von einem flachen, warmen Meer bedeckt. Wo das Thermometer heute im Sommer mehr als 40 und im Winter bis zu minus 60 Grad Celsius anzeigt, herrschten in der Region von Juschno Russkoje tropische Verhältnisse. Die Sommer waren nass und warm, die Winter trocken und warm – so wie heute auf den Bahamas, wo das Wasser genauso träge an die Palmenstrände schwappt wie damals im Westen Sibiriens. Weil die Meeresströmungen schwach waren und die Zirkulation gering, nahmen die Sauerstoffkonzentrationen mit der Tiefe rasch ab. Abgestorbene Organismen, die zum Meeresgrund sanken, konnten nicht zersetzt werden und bildeten im Lauf der Jahrtausende eine stetig wachsende Schicht aus Faulschlamm – bis das flache Meer irgendwann verlandete und die schwarzen Ablagerungen unter immer dickeren Sedimentschichten verschwanden.

Auf Grund großräumiger tektonischer Prozesse, während deren sich ganze Gebirge auftürmten, versanken sie schließlich in Tiefen von vier bis sechs Kilometern, wo Temperaturen von bis zu 180 Grad Celsius herrschten und aus den abgestorbenen Organismen infolge komplizierter chemischer Prozesse zunächst Öl und dann Erdgas entstanden. Diese Kohlenwasserstoffe wurden aus ihrem »Muttergestein« förmlich herausgepresst und stiegen wegen ihrer geringen Dichte auf in Richtung Erdoberfläche – ähnlich wie die dicken, bunten Tropfen in den Lavalampen aus den 1970er Jahren. Doch früher oder später versperrte irgend-

eine gasdichte Schicht aus Tonsteinen den Weg nach oben. Hier, in solchen »Fallen«, sammelten sich schließlich die riesigen Öl- und Gasmengen, die Geologen Ende der 1960er Jahre entdeckten.

So zufällig die geologischen Umstände, so willkürlich sind die Öl- und Gasvorkommen der Erde verteilt. Die Länder im Mittleren Osten etwa hatten besonders viel Glück – mehr noch als Russland. Auch im Norden Afrikas lohnt sich der Abbau, während die Vorräte Westeuropas eher bescheiden ausfallen. Sie reichen bei Weitem nicht zur Deckung des Eigenbedarfs. Und so bezieht beispielsweise Deutschland fast 90 Prozent des benötigten Erdgases aus dem Ausland. Ungefähr ein Drittel des hier zu Lande verbrauchten Gases stammt aus den großen russischen Erdgasfeldern, vor allem in Sibirien. Zu den weiteren wichtigen Lieferanten gehören Norwegen mit 29 und die Niederlande mit 20 Prozent. Allenfalls 13 Prozent werden aus heimischen Quellen gefördert, die sich überwiegend in Niedersachsen und vor der deutschen Nordseeküste befinden, etwa die Mittelplate im Wattenmeer. Doch in den letzten Jahren ist der natürliche Druck in den Gasfeldern gesunken, was die Ausbeute deutlich schmälert.

EINFACH ABGEFACKELT

Nachdem vor rund 150 Jahren die systematische Erdölförderung begann, galt Gas zunächst als lästiges und gefährliches Nebenprodukt, das aus der angebohrten Lagerstätte perlte wie Kohlendioxid aus einer Sprudelflasche – oder einer geschüttelten Champagnerflasche. Nicht selten kam es dabei zu heftigen Explosionen, bei denen ganze Bohrtürme in die Luft gingen. Und so wurde versucht, den schwer kontrollierbaren Stoff in einige Entfernung abzuleiten und dort abzufackeln. Auch heute noch zeugen die nachts weithin sichtbaren Gasfackeln davon, dass das Erdgas mancher Lagerstätten aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen ungenutzt bleibt. Dabei ist sein Wert unbestritten, und die weltweite Nachfrage steigt kontinuierlich: Schon jetzt beträgt sein Anteil bei den fossilen Energieträgern rund 25 Prozent. Nur Erdöl und Kohle finden größeren Absatz.

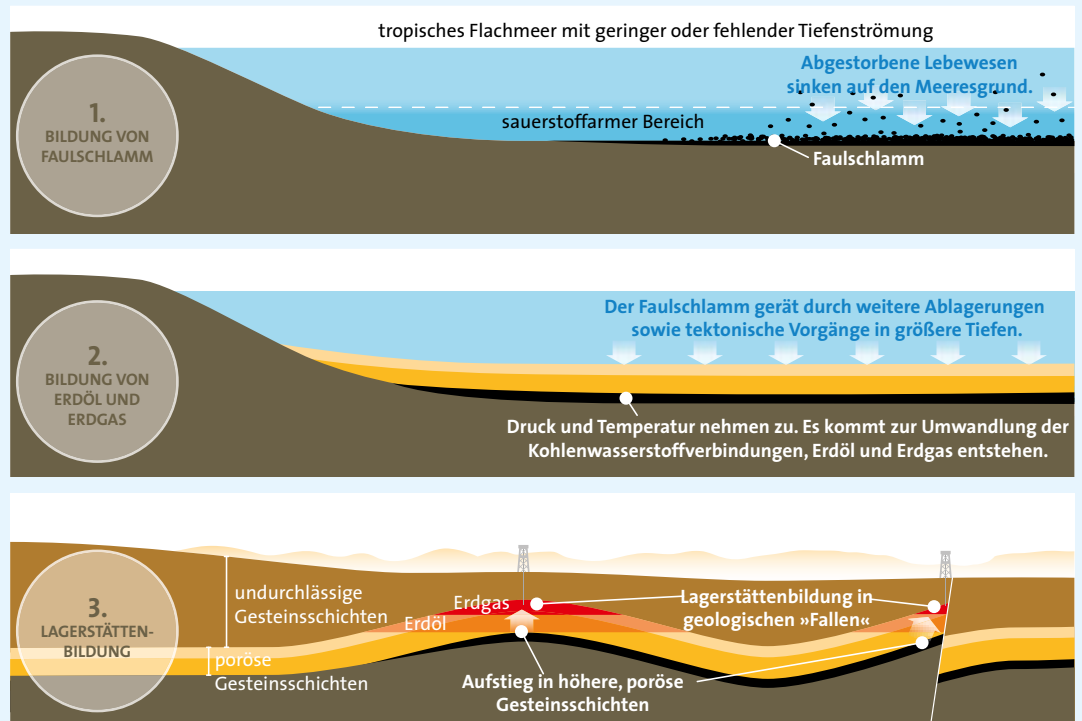
Aber es ist eben nicht damit getan, das aus der Lagerstätte strömende Gas einfach in ein Rohr zu leiten und darauf zu warten, bis es die tausende Kilometer weit entfernt lebenden Abnehmer erreicht. Sein Transport ist aufwändiger und komplizierter als der von Öl und Kohle. In überirdischen Pipelines etwa nimmt der Druck mit zunehmender Distanz von der Quelle so sehr ab, dass alle 100 bis 200 Kilometer Kompressorstationen stehen müssen, um optimale Transportbedingun-

AUF EINEN BLICK

1. Die Ostseepipeline wird Gas aus dem sibirischen Juschno Russkoje – einem der größten Gasvorkommen der Welt – nach Europa leiten.
2. Die Entstehung des fossilen Brennstoffs dauerte viele Jahrtausende und ist einer Reihe von geologischen Zufällen zu verdanken.
3. Die Gasleitung durch die Ostsee kommt in Lubmin, Mecklenburg-Vorpommern, an Land. Von hier strömt das Gas in das europäische Gasnetz.

**JEDES JAHR
WERDEN EUROPA-
WEIT RUND
1,5 MILLIARDEN
GASFEUERZEUGE
VERKAUFT.
WÜRDE MAN SIE
MIT DEM ERDGAS
AUS SIBIRIEN
FÜLLEN, MÜSSTE
MAN DIE OSTSEE-
PIPELINE ETWA
45 MINUTEN LANG
AUFDREHEN**

Den Ausgangsstoff für das sibirische Erdöl und -gas bildeten Myriaden von abgestorbenen Mikroorganismen. Sie sanken vor rund 150 Millionen Jahren auf den Grund eines flachen, sauerstoffarmen Meers und lagerten sich dort in einer mächtigen Faulschlamm-schicht ab. Nachdem das Meer verlandete, tauchten die schwarzen Sedimente infolge tektonischer Bewegungen in die Tiefe, wo sie sich unter steigenden Druck- und Temperaturbedingungen in Öl und Gas umwandelten. Diese wurden aus dem Muttergestein herausgepresst und stiegen auf – bis sie sich in »Fallen« unterhalb undurchlässiger Schichten sammelten.

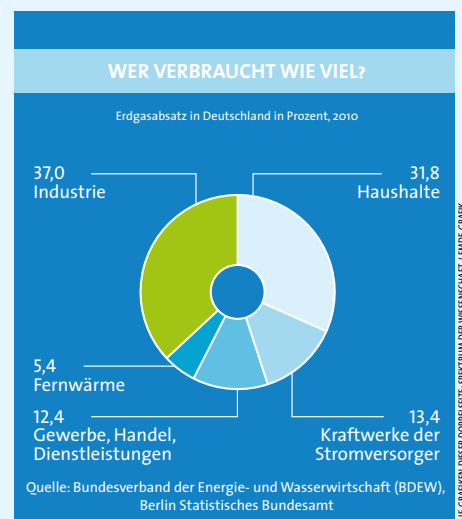
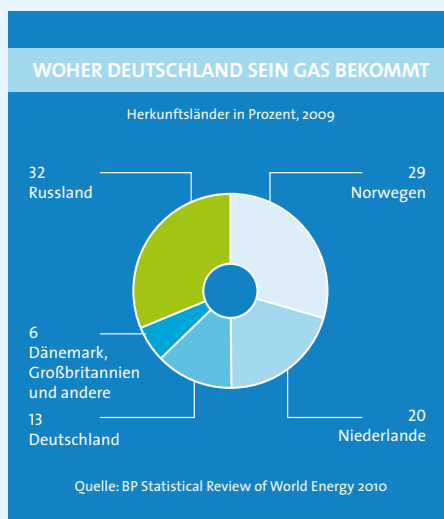
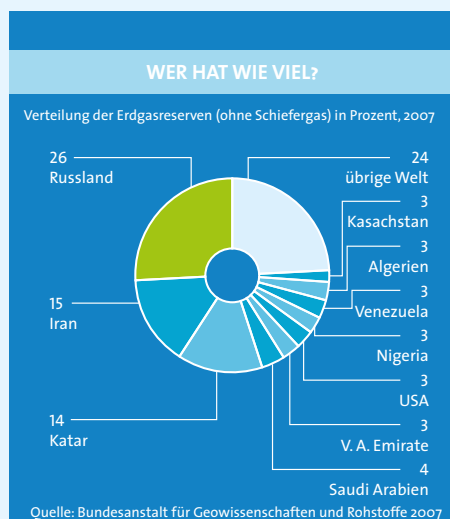


Wie alle Lagerstätten sind auch die Erdgasvorkommen willkürlich über die Welt verteilt (links). Deutschland etwa bezieht den größten Teil seines Bedarfs aus Russland und Norwegen (Mitte). Fabriken und Privathaushalte sind die größten Abnehmer (rechts).

gen zu gewährleisten. Diese Gasverdichter verbrauchen allerdings ziemlich viel Energie. Bei einer Pipelinelänge von 2500 Kilometern kann der Verlust bis zu zehn Prozent der Energie betragen, die in dem durch die Rohre gepumpten Erdgas stecken.

Anders bei untermeerisch verlegten Pipelines. Denn auf Grund der großen Wasserlast auf der Rohrleitung am Meeresboden kann diese bei gleicher Dicke der Stahlwand mit viel höherem Innendruck betrieben werden. Während das Gas in überirdischen Rohren mit 90 Bar strömt, steht die Ostseeleitung unter einem Druck von bis zu 220 Bar. Zusätzliche Verdichterstationen entlang der Strecke sind hier unnötig.

Wenn der Weg für Pipelines zu weit oder das Meer zu groß ist, kann Gas auch an Bord von Spezialschiffen zum Verbraucher gelangen. Heruntergekühlt auf minus 160 Grad Celsius wird es flüssig und verringert dabei sein Volumen um das 640-Fache. Auf diese Weise kann ein solcher Gastanker bis zu 210 000 Kubikmeter Flüssigerdgas (*liquefied natural gas*, LNG) transportieren – das reicht immerhin, um 40 000 Haushalte ein Jahr lang mit Erdgas zu versorgen. Zum Vergleich: Heutige Supertanker fassen rund 300 Millionen Liter Rohöl – genug für etwa 80 000 Haushalte. Derzeit gibt es weltweit nur etwa 200 dieser LNG-Tanker – und jeder müsste mindestens dreimal pro Jahr einen europäischen Hafen anlaufen, um mit der



Pipeline aus Sibirien in Konkurrenz zu treten. Denn die Nord Stream Pipeline liefert Energie für 26 Millionen Haushalte. Zudem existieren europaweit nur etwa ein Dutzend Häfen, in denen LNG-Tanker ihre Fracht löschen können – in Deutschland gibt es bisher keinen. Etwa 80 Prozent des weltweit verschifften Erdgases geht daher in Regionen, die per Pipeline schlecht oder gar nicht erreichbar sind: Japan, Südkorea und Taiwan.

EINE HAUPTSCHLAGADER EUROPAS

Der Ort, an dem die Rohre der Ostseepipeline aus dem Meer auftauchen, ist ziemlich unspektakulär. Viel mehr als ein paar Knäuel aus Rohren und Ventilen gibt es unweit des kleinen Seebads Lubmin bei Greifswald nicht zu sehen. Hier strömt das sibirische Gas in zwei Leitungen, die Richtung Süden und Richtung Westen durch Europa verlaufen. Die wenigen Hauptleitungen, die die einzelnen Staaten miteinander verbinden, speisen ein dichteres, von regionalen Energieversorgern betriebenes Netz, das sich seinerseits verzweigt und schließlich die Städte und Gemeinden erreicht. Sie kontrollieren das letzte, noch feinmaschigere Netz, an das jeder einzelne Haushalt angeschlossen ist. In Deutschland umfasst dieses Kapillarsystem der Gasversorgung alles in allem ungefähr 370 000 Kilometer gartenschlauchdünne Niederdruckleitungen.

Die Ostseepipeline wird also eine der Hauptschlagadern in der europäischen Energieversorgung – und sie gewinnt zukünftig noch an Bedeutung. Denn nach Berechnungen der Internationalen Energieagentur (IEA) dürfte Erdgas bis zum Jahr 2080 mit einem Anteil von über 50 Prozent am Verbrauch zum weltweit bedeutsamsten fossilen Energieträger aufsteigen.

In Europa spitzt sich die Nachfragesituation noch rascher zu. Bereits 2030 müssen die Länder der Gemeinschaft verschiedenen Berechnungen zufolge zwischen 150 und 200 Milliarden Kubikmeter Gas mehr einführen als heute – weil zum einen die heimischen Förderraten sinken und zum anderen der Verbrauch stetig steigt. Allein in den ersten sechs Monaten 2011 hat Russland, Europas wichtigster Gaslieferant, seine Lieferungen bereits um 26 Prozent gesteigert. Mit diesem Tempo wird auch die Ostseepipeline nicht mithalten können: Nur elf Prozent des bis 2030 prognostizierten Bedarfs können auf diesem Weg zu uns gelangen. Neue Herausforderungen also für Pipelinebauer, die Europa um neue Hauptschlagadern erweitern müssen.

Das gilt auch für Deutschland, wo die Frage der Versorgungssicherheit nach dem Reaktorunfall



Auf dem Weg nach Europa strömt das sibirische Gas zunächst quer durch Russland nach Wyborg und von dort durch die Ostseepipeline nach Deutschland.

DIE LAGERSTÄTTE VON JUSCHNO RUSSKOJE

Entdeckung: 1969

Das Gasfeld erstreckt sich über eine **Fläche** von etwa **83 mal 16** Kilometern. Es gehört damit zu den größten Vorkommen der Welt.

Geologen schätzen die **förderbaren Reserven** auf ungefähr **1000** Milliarden Kubikmeter. Zum Vergleich: Deutschland verbraucht pro Jahr knapp **100**, Russland rund **460** und die USA knapp **660** Milliarden Kubikmeter.

Die **Förderung** von Gas, Gaskondensat und Öl erfolgt aus Tiefen zwischen **760** und **3300** Metern.

von Fukushima enorm an Bedeutung gewonnen hat. Nachdem der Ausstieg aus der Kernenergie nun politisch wirklich unumkehrbar scheint, steigt die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern – zumindest so lange, bis die Quellen erneuerbarer Energien entsprechend ausreichend genutzt werden können. Und so kann die Ostseepipeline – darin sind sich Industrie und Umweltschützer einig – auch eine Brücke in eine neue Zeit schlagen. In eine Zeit, in der der Energiehunger zwar weiter wächst, in der es aber auch gilt, die Klimaschutzziele zu erreichen und die Kohlendioxidemissionen zu senken. Mit Hilfe von Solar- und Windkraftwerken allein ist dieser Spagat nicht zu schaffen. Vorerst jedenfalls nicht. Bis es einmal so weit ist, bleibt das Gas aus Sibirien der vernünftigste Kompromiss. Die Pipeline ist auf eine Lebensdauer von 50 Jahren ausgelegt. Ob die Zeit reicht?

Hanno Charisius ist freier Wissenschaftsjournalist und lebt in München.

Um jeden Preis?

Europa will seinen wachsenden Energiehunger mit Gas aus Russland stillen – weitere Pipelines sind geplant. Doch die globalen Gasmärkte befinden sich im Umbruch, neue Wettbewerber tauchen auf – zum Beispiel die USA, aber auch Turkmenistan und Katar. Was bedeutet das für unsere Versorgungssicherheit?

Von Daniel Heldmann

AUF EINEN BLICK

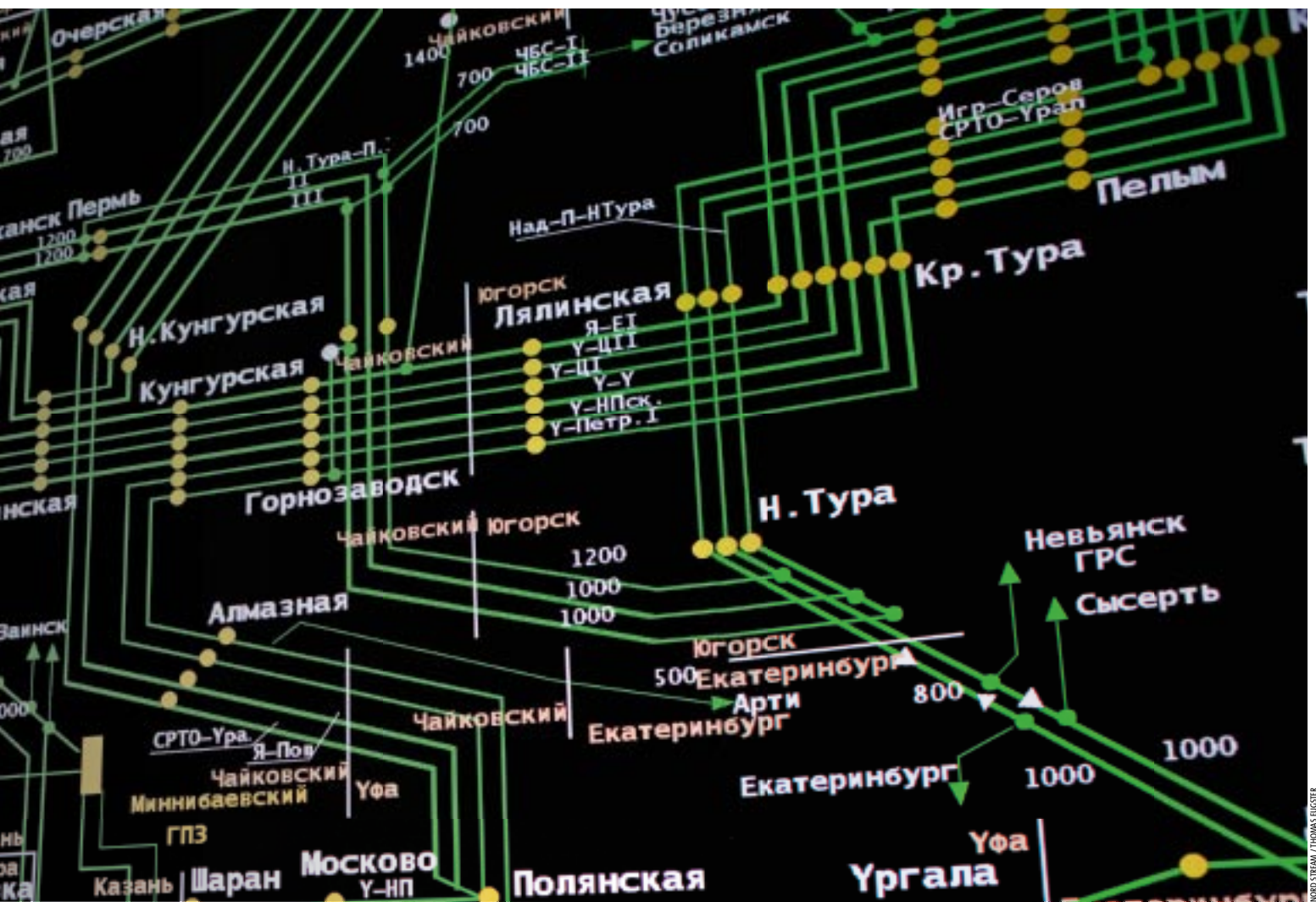
1. Europas Gasbedarf steigt, während die Ergiebigkeit seiner eigenen Quellen sinkt. Die Folge: eine immer weiter klaffende Versorgungslücke
2. Auf Grund ihrer Schiefergasvorkommen wurden die USA fast unabhängig von Importen. Auf dem Weltmarkt gibt es daher Erdgas im Überfluss.
3. Europa versucht seine Versorgung zu diversifizieren – und baut womöglich weitere Pipelines nach Russland und Zentralasien.

Bevor das erste Gas durch die beiden Röhren der Nord-Stream-Pipeline strömt, denken manche schon weiter: »Natürlich braucht Deutschland in den kommenden Jahren mehr Gas«, meinte Bundeskanzlerin Angela Merkel zum russischen Präsidenten Dmitri Medwedew im Juli 2011 während der Regierungskonsultationen zwischen Berlin und Moskau, wenige Monate vor der Inbetriebnahme der Nord-Stream-Leitung. Tatsächlich gibt die Entwicklung des Gasverbrauchs in der Bundesrepublik wie in der Europäischen Union der Kanzlerin Recht: In den nächsten 20 Jahren soll der Bedarf von heute rund 550 Millionen Kubikmeter auf mehr als 620 Millionen Kubikmeter pro Jahr steigen. Da sich ihre eigene Förderung im gleichen Zeitraum nahezu halbieren dürfte, wird die Gemeinschaft zunehmend von Importen abhängig – und die russischen Reserven gehören weltweit zu den größten. Was liegt also näher, als Angebot und Nachfrage in Einklang zu bringen?

Ohne den Nachschub aus dem Osten würde Europas Versorgungslücke bis 2030 auf knapp 190 Millionen Kubikmeter pro Jahr anwachsen. Hier zu

Landen kommt der deutsche Ausstieg aus der Kernkraft hinzu – weshalb der Brennstoff aus Russland die gefürchteten Löcher in der Stromversorgung schließen und für die nötige Grundlast sorgen könnte: »Gaskraftwerke eignen sich besonders gut für die Energiewende, da sie sich leicht mit erneuerbaren Energien kombinieren lassen«, erklärt Claudia Kemfert, die Leiterin der Abteilung »Energie, Verkehr und Umwelt« am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) in Berlin. »Sie sind flexibel einsetzbar, da man sie problemlos hoch- und runterfahren kann. Zudem verursachen sie deutlich weniger Treibhausgase.«

Europa befindet sich in der geografisch glücklichen Lage, dass riesige Erdgaslagerstätten in der Nachbarschaft liegen. »Russland besitzt die größten Gasreserven der Welt, gefolgt vom Iran und Katar«, so Kemfert. Viele Länder nutzen allerdings ihre Vorkommen gar nicht – sondern fackeln sie ab. So wie im Nahen Osten: »Die Region hat sich bisher vorwiegend auf die Förderung und den Export von Erdöl konzentriert«, sagt Harald Andruleit vom Fachbereich Wirtschaftsgeologie der Bundesanstalt für Geowis-



senschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover. »Erst seit Kurzem entstehen dort auch Infrastrukturen für die Gasförderung – etwa in Katar.«

Allerdings ist der Transport von Gas ungleich schwieriger als der von Erdöl. Zur Wahl stehen Pipelines und Flüssiggastanker, wobei als Faustregel gilt: »Ab einer Entfernung von 3000 Kilometern ist der Transport von Flüssiggas günstiger als der durch Gasleitungen«, so Andruleit. Deutschland verfügt bisher jedoch über keinen Hafen, in dem solche Gasschiffe entladen werden können. Der Bau eines Terminals im Jade-Weser-Hafen in Wilhelmshaven wird zwar seit Jahren diskutiert – ob dieser jemals ausgeführt wird, ist ungewiss. Stattdessen muss das Erdgas in Anlagen in Belgien, Frankreich oder Italien in das europäische Fernpipelinennetz eingespeist und in die Bundesrepublik gepumpt werden – was die Kosten entsprechend in die Höhe treibt.

Deutschland fördert selbst nur 13 Prozent seines Bedarfs und bezieht sein Erdgas deshalb zurzeit vorwiegend aus Russland, Norwegen und den Niederlanden. Gerade wegen langfristiger Lieferabkommen waren diese Länder aus markt-

wirtschaftlicher Sicht bisher die besten Lieferanten.

Bis in die jüngere Vergangenheit profitierten alle Seiten von solchen Verträgen, denn Pipelines sind teuer. Mit russischen Firmen bestehen seit Langem gute Handelsbeziehungen – manche Verträge hatten Laufzeiten von bis zu 28 Jahren. Claudia Kemfert betont das besondere Verhältnis zum Rohstoffgiganten im Osten, sagt jedoch: »Diese engen Kontakte sorgen für die nötige Stabilität, haben aber auch einen Nachteil. Die Gaspreise sind in Deutschland vertraglich an die des Erdöls gebunden.« Und während der steigt, gibt es derzeit Gas im Überfluss. Mit den entsprechenden Folgen: »Der Preis ist auf dem internationalen Markt deutlich niedriger als auf dem deutschen.«

Schuld an den Veränderungen auf dem Gasmarkt sind neu erschlossene Quellen: »Durch die erfolgreiche Nutzbarmachung des so genannten Schiefergases in den USA hat sich die Weltlage geändert. Momentan herrscht ein Überangebot an Erdgas«, sagt Andruleit. Mittlerweile lässt sich der Brennstoff dank des technologischen Fort-

Sieht auf den ersten Blick aus wie das U-Bahn-Netz von Moskau. Tatsächlich ist es der Schaltplan im Kontrollzentrum des russischen Gaslieferanten Gazprom. Von hier wird das komplexe Netz der Pipelines rund um die Uhr überwacht.

DAS ÖL BESTIMMT DEN PREIS VON GAS

Seit 1965 sind die Gaspreise in vielen Staaten eng an den Ölpreis gekoppelt. Dabei handelt es sich nicht um eine gesetzliche Vorgabe, sondern um internationale Vereinbarungen zwischen Produzenten, Importeuren und Versorgern, die teilweise schon vor Jahrzehnten getroffen wurden. Sie sollten Investitionen in Förderanlagen und Pipelines schützen und verhindern, dass Konsumenten bei Bedarf zu günstigeren Energieträgern wechseln. Und so folgt der Gaspreis bis heute mit drei- bis sechsmonatigem Abstand dem Ölpreis – in beide Richtungen.

Vor dem Bundesgerichtshof und dem Bundesverfassungsgericht wurde schon erfolgreich gegen diese strikte Bindung geklagt. Energieversorger dürfen Gaspreise nun nicht mehr unmittelbar an den in Deutschland relevanten Heizölpreis koppeln, sondern müssen bei der Preisgestaltung auch sinkende Nebenkosten wie Netzgebühren berücksichtigen. Prinzipiell untersagten die Richter die Ölpreisbindung allerdings nicht.

In den USA und in Großbritannien – die beide über eigene große Vorkommen verfügen – wurde sie dagegen ausgesetzt. Beide Staaten diskutieren jedoch die Wiedereinführung, weil die Preise auf dem freien Markt mitunter extrem schwanken und so die Planungssicherheit von Großverbrauchern gefährden. Diese Kunden beziehen ihr Gas auf so genannten Spotmärkten: Börsen, an denen Lieferung, Abnahme und Bezahlung des Rohstoffs direkt abgewickelt werden.

schritts – in den USA zwischenzeitlich auch durch steigende Marktpreise – aus früher kaum nutzbaren Vorkommen rentabel extrahieren. Schiefergas wird dort derzeit so günstig angeboten, dass es sogar importiertes Flüssiggas vom Markt verdrängen konnte. Bis 2040 wollen die Vereinigten Staaten ihre Förderkapazitäten noch deutlich steigern, so eine Studie von Amy Myers Jaffe und ihren Kollegen vom Baker Institute der Rice University in Houston: Mehr als 280 Millionen Kubikmeter Gas sollen dann täglich aus den Lagerstätten strömen.

»Die geopolitischen Auswirkungen der ausweiteten US-Produktion werden gewaltig sein«, schreibt Amy Myers Jaffe. »Alternative Versorgungssicherheiten für Europa und ein generell größeres Angebot können den Einfluss russischer oder anderer Anbieter abschwächen.« Denn Lieferanten, die bislang in die Vereinigten Staaten verkauft haben, dürften sich nach neuen Abnehmern umsehen. In der Folge könnte Russlands Anteil am gesamteuropäischen Gasmarkt von 27 Prozent im Jahr 2009 bis 2040 um die Hälfte schrumpfen – allerdings bei insgesamt stark steigender Nachfrage.

Zudem sucht die Europäische Union selbst nach weiteren Exporteuren, um die eigene Versorgung auf möglichst viele Beine zu stellen – etwa mit

Hilfe der Nabucco-Pipeline, die von Zentralasien durch die Türkei und Südosteuropa nach Österreich führt. »Europa setzt also nicht nur auf die Leitung von Nord Stream«, sagt Claudia Kemfert. Das Projekt existiert allerdings bislang nur auf dem Papier – trotz höchster politischer Unterstützung: Joschka Fischer, der ehemalige deutsche Außenminister, berät die am Konsortium beteiligten Firmen RWE und OMV (Österreich).

Die Bauarbeiten für Nabucco sollen 2013 beginnen. Ab 2017 könnte die Leitung Erdgas aus den reichen Gasfeldern rund um das Kaspische Meer nach Westen führen. Die Konkurrenz mit anderen Anbietern würde steigen – und die Preise würden sinken. Noch ist ungewiss, wie viel Gas Nabucco liefern wird. Produzenten wie Aserbaidshan oder Turkmenistan gelten als unzuverlässig, Geschäfte mit dem Iran sind momentan schwierig oder politisch unerwünscht. Turkmenistan und Aserbaidshan haben zudem bereits in größerem Umfang Lieferverträge mit China beziehungsweise Russland geschlossen, was das Handelsvolumen für europäische Staaten vorerst einschränkt.

Weiterhin bereitet die Kostenexplosion für Bau und Betrieb von Nabucco den Verantwortlichen Kopfzerbrechen. »Nabucco kostet 12 bis 15 Milliarden Euro«, sagte EU-Energiekommissar Günther Oettinger auf einer Energiefachtagung im Mai 2011 in Stuttgart – zu Beginn kalkulierten die Betreiber mit etwa 7 Milliarden Euro. Zum Vergleich: Die Ostseepipeline von Nord Stream kostet am Ende 7,4 Milliarden Euro. Und schließlich erwächst Nabucco noch Konkurrenz durch Gazprom: mit South Stream – einer Pipeline durch das Schwarze Meer nach Südosteuropa und Österreich beziehungsweise, in einem zweiten Strang, nach Italien. South Stream würde die als unsicher geltenden Transitländer Weißrussland und die Ukraine umgehen, über die das Erdgas bislang in den Süden und Südosten der Europäischen Union gelangt. Dieses Projekt befindet sich allerdings noch im Planungsstadium.

Der erste Strang der Nord-Stream-Leitung vom russischen Wyborg nach Lubmin in Mecklenburg-Vorpommern liefert hingegen schon ab Ende 2011 Gas nach Westen. Rund 40 Jahre nach dem ersten Erdgasvertrag mit der Sowjetunion aus dem Jahr 1970 wird damit ein neues Kapitel in den deutsch-russischen Handelsbeziehungen aufgeschlagen. Die damals vereinbarten 500 Millionen Kubikmeter Gas jährlich würden heute in nur gut drei Tagen durch die Nord-Stream-Pipeline strömen.

Daniel Heldmann ist freier Journalist in Nürnberg.

1970 KONNTE DIE EU IHREN GASBEDARF VON 100 MILLIARDEN KUBIKMETERN PRO JAHR FAST VOLLSTÄNDIG SELBST DECKEN. HEUTE BETRÄGT DER VERBRAUCH 500 MILLIARDEN KUBIKMETER – WOVON 60 PROZENT IMPORTIERT WERDEN MÜSSEN

»Ich sehe die Pipeline als Stabilitätsfaktor«

Machen wir uns mit der Ostseepipeline zu abhängig von russischem Gas?

Ein Gespräch mit dem Politikwissenschaftler **Alexander Rahr** von der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik

Herr Rahr, machen wir uns mit der Ostseepipeline abhängig von Russland oder binden wir das Land enger an uns?

Das ist die Schlüsselfrage! Meine Idealvorstellung ist eine gegenseitige Abhängigkeit. Die kann ruhig sehr tief gehen, aber sie muss ebenbürtig sein. Russland hat die Rohstoffe – und wir haben die Technologie, diese zu fördern, vor Ort zu veredeln und gemeinsam zu verkaufen. Es geht nicht darum, dass wir wie eine Kolonialmacht Kontrolle über die Rohstoffe erlangen. Auch Russland ist keine Kolonialmacht mehr, die entscheiden kann, welcher Nachbar Gas bekommt und welcher nicht. Es geht vielmehr um Partnerschaft. Momentan sprechen wir von Rohstoff- und Energiepartnerschaften, die dann in Allianzen übergehen werden, wenn man sich stärker vertraut.

Wie beschreiben Sie das deutsch-russische Verhältnis heute?

Es ist in einer gewissen Schiefelage. Aus Umfragen wissen wir, dass in Deutschland selbst viel weniger Menschen ein positives Russlandbild haben, als umgekehrt Russen ein gutes Deutschlandbild pflegen. Deutschland gilt als der mit Abstand angenehmste Modernisierungspartner. Zudem dienen wir auch als Vorbild, was die wirtschaftliche Entwicklung angeht. In Deutschland herrschen zwei Denkschulen vor: Es gibt viele, die glauben,

dass ohne Russland kein Europa aufzubauen ist. Sie sind dankbar für die deutsche Wiedervereinigung und tun alles, um Russland zu unterstützen. Sie glauben auch, dass dieser Staat ein natürlicher Partner des Westens und der Deutschen ist, weil man in den letzten 40 Jahren unter dem Strich gute Erfahrungen im Gashandel gemacht hat. Das Resultat dieser Zusammenarbeit ist die Nord-Stream-Pipeline. Auf der anderen Seite sehen wir viele Deutsche, die dem Land sehr kritisch gegenüberstehen, da es gewagt hat, sich der westlichen Liberalisierung zu widersetzen – anders als etwa Polen.

Glauben Sie, dass die Pipeline das West-Ost-Verhältnis langfristig verbessern wird?

Die Gasleitung wird Teil des Alltags werden, man wird nicht mehr viel über sie schreiben. Irgendwann werden sich alle beruhigen, und vielleicht wird dann der Dialog über weitere Pipelines das Zusammenwachsen Europas beschleunigen.

Die Ostseepipeline startete als europäisches Projekt und hat sich zum Schluss vor allem zu einem deutsch-russischen Projekt gewandelt. Wie muss sich das für den Rest Europas anfühlen, dass Deutschland jetzt den Gasmann spielt?

Wir sind nicht der große Kontrolleur, sondern eher ein Güterbahnhof. Wir werden für einen Teil der europäischen Gasimporte zu dem, was Rotterdam schon lange für Öl in Europa bedeutet. Die Niederlande könnten dieses Öl ja auch nicht als Druckmittel einsetzen. Ich sehe die Pipeline als Stabilitätsfaktor. Wir bekommen so Einfluss auf Russland, den andere Länder nicht haben.

Wir können für mehr Sicherheit sorgen, wir können moderieren. Ich glaube, dass uns diese Aufgabe gut stehen wird. Das hätten wir ohnehin von Anfang an machen sollen, statt immer nur auf die Europäische Union zu hoffen, was manchmal, aber eben nicht immer funktioniert. Es ist meiner Ansicht nach wichtig, dass Länder mit traditionellem Austausch mit Russland auch eine

Russland und Deutschland sind gute Partner, meint der Politikwissenschaftler Alexander Rahr (links) im Gespräch mit Hanno Charisius.



JAN-PETER BOENING

Vorreiterrolle übernehmen, um die Versorgungssicherheit Europas zu garantieren.

Glauben Sie, dass Deutschland angemessen mit den Ängsten anderer Länder umgegangen ist?

Ich denke schon, aber man hätte sicher noch die eine oder andere politische Geste mehr machen können – etwa indem beim ersten strategischen Treffen ein polnischer Repräsentant eingeladen worden wäre. Aber man muss auch sehen, dass vor allem einige Länder in Mittelosteuropa zu dieser Zeit noch nicht bereit waren, einen Dialog zu beginnen oder auch nur unsere Argumente anzuhören. Viele dieser Staaten wurden inzwischen in die Nato und in die EU aufgenommen und sind damit zu einem Teil des Westens geworden.

Wir sind heute mehr als eine Schicksalsgemeinschaft, wir sind ein Bündnis und werden alle Partner schützen. Aber niemand kann erwarten, dass die Deutschen die guten Entwicklungen und Erfahrungen mit Russland unter Gorbatschow, Jelzin und Putin einfach wegwerfen, nur um anderen Ländern zu gefallen.

Wie sieht Russland die Nabucco-Pipeline, die verschiedene Länder jetzt im Süden planen, um Gas aus Asien nach Europa zu bringen?

Russland sieht die Pipeline als Konkurrenz, kann sie aber nicht verhindern, wenn der politische Wille vorhanden ist und das Geld der Firmen sowie das notwendige Gas zur Verfügung stehen. Diese drei Voraussetzungen sind jedoch momentan nur teilweise erfüllt. Zudem hat Russland ein Gegenmodell zu Nabucco entwickelt: die South-Stream-Pipeline.

Die wieder russisches Gas nach Europa pumpen würde.

Insofern wäre es eigentlich der goldene Weg, South Stream und Nabucco zusammenzulegen. Letztendlich benötigen wir zukünftig das Gas in großen Mengen, so dass wir vielleicht sogar bald die Sicherheit von zwei Pipelines im Süden brauchen. In jedem Fall würde dieses Gas nicht direkt nach Deutschland fließen: Andere Länder spielen dann die Rolle als Verteiler von russischem oder zentralasiatischem Gas. Österreich oder Italien könnten die Position übernehmen, die wir im Norden innehaben.

Das ist kein Wettbewerb, sondern eine Aufteilung von Verantwortung für die Energiesicherheit in Europa und die Diversifizierung der Versorgung. Wichtig ist, dass ein gemeinsamer europäischer Gasmarkt entsteht, wir uns über Pipelines vernetzen und uns damit gegenseitig helfen, um krisensicher zu werden.

Bedeutet das, dass wir uns jetzt noch nicht für die nächsten 50 Jahre beruhigt hinlegen können,



JAN PETER BOENING

nen, sondern weiter nach neuen Gas- und regenerativen Energiequellen suchen müssen?

Wir müssen uns zukünftig unabhängiger von Energie- und Rohstoffimporten machen. Die Förderung der regenerativen Energien kann zudem der deutschen Industrie große Impulse geben. Wir stehen möglicherweise vor einem Umbruch der Industrie und könnten neue Produkte liefern, die andere Länder so schnell nicht entwickeln. Hier bauen wir derzeit einen sehr schönen Vorsprung aus. Russland beobachtet das natürlich und weiß, dass sich in 50 Jahren kaum noch Länder für sein Erdgas interessieren werden. Deshalb versucht die Nation jetzt so viel wie möglich zu verkaufen, zum Beispiel auch an China.

Glauben Sie, dass die neu gefundenen Erdgasvorkommen in Westeuropa, die so genannten Schiefergaslager, einen Beitrag zur europäischen Energiesicherheit leisten werden?

Politisch ist das sehr wichtig, etwa für Polen. Ich hoffe aber, dass es niemals notwendig sein wird, dieses Gas zu fördern, weil es mit großer Umweltverschmutzung einhergeht. Die USA sammeln damit gerade viele und nicht nur gute Erfahrungen auf ihrer riesigen Staatsfläche. Im eng besiedelten Europa dürfte das sicherlich noch viel problematischer ausfallen. Wichtig ist der psychologische Faktor: Falls jemand versuchen wollte, uns mit Gaslieferungen unter Druck zu setzen, wissen wir jetzt, dass wir Schiefergas fördern könnten. Natürlich mit einer schwierigen und teuren Technologie, aber wir müssen uns nicht mehr so stark vor einseitigen Abhängigkeiten fürchten wie noch vor wenigen Jahren.

Die Fragen stellte Hanno Charisius.

Alexander Rahr ist Leiter des Berthold-Beitz-Zentrums der Deutschen Gesellschaft für Auswärtige Politik (DGAP) in Berlin. Er hat Geschichte und Politikwissenschaft in München studiert, erhielt 2003 das Bundesverdienstkreuz und ist Ehrenprofessor an der Moskauer Staatsuniversität für internationale Beziehungen. 2008 hat er das Buch »Russland gibt Gas« veröffentlicht, 2011 soll »Der kalte Freund« folgen. Darin beschreibt er, wie Russland dank seiner Ressourcen wieder zur Großmacht erstarkte und als Profiteur aus der Finanzkrise hervorging.



In Lubmin bei Greifswald taucht die Ostseepipeline aus dem Meer auf – und speist das europäische Gasnetz. Welche Folgen haben Bau und Betrieb der Leitung für das Ökosystem Ostsee?

Die Pipeline und das Meer

Die Energiewende ist beschlossene Sache. Doch Wind- und Solarkraftanlagen allein können Europas Hunger nach Energie vorerst nicht stillen. Mit Gas aus Russland wollen Politiker und Energieunternehmen die Versorgungslücke schließen. Geht dies auf Kosten der Natur?

Von Stefanie Reinberger



AUF EINEN BLICK

1. Eine Unterwasserpipeline gilt als umweltfreundlichster Transportweg für Gas. Ihr Betrieb setzt kaum CO₂ frei und spart Energie.
2. Sorgen bereiten Umweltschützern jedoch die Verlegearbeiten quer durch das empfindliche Ökosystem Ostsee.
3. Infolge umfangreicher Monitoring- und Schutzprogramme konnten die Auswirkungen erheblich minimiert werden.

Wenn ausgerechnet zwischen Greenpeace und der Energiewirtschaft Einigkeit herrscht, macht das stutzig – zumal, wenn es nicht um den Bau neuer Wind- oder Solaranlagen geht, sondern um die Förderung eines fossilen Brennstoffs. Nach einem Ökoprotokoll klingt der Bau mehr als 1200 Kilometer langer Pipelines quer durch die Ostsee wahrlich nicht. Doch die Lieferung von russischem Erdgas an Europas Fabriken und Haushalte stößt bei Umweltschützern kaum auf Widerstand. Der Grund: Die Pipelines gefährden den Umstieg auf erneuerbare Energien nicht, sie erleichtern ihn. »Gas ist der einzige Energieträger, der den Namen ›Brücke zu den erneuerbaren Energien‹ wirklich verdient«, sagt Andree Böhling, Energieexperte bei Greenpeace.

Stützen kann er sich dabei auf eine Studie des renommierten Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt, Energie. In der Tat ist die Nutzung von Erdgas für die Stromerzeugung vergleichsweise klimafreundlich – und zwar, weil bei seiner Verbrennung pro erzeugter Energieeinheit viel weniger Kohlendioxid freigesetzt wird als bei der Verfeuerung von Steinkohle (siehe Grafik unten): Würde man die Kohle- durch Gaskraftwerke ersetzen, so rechneten die Wuppertaler Forscher vor, könnte man den Ausstoß von Treibhausgasen im Zuge der Stromerzeugung um rund 40 Prozent reduzieren. Zudem lassen sich insbesondere die modernen Gas- und Dampf-Kombikraftwerke bei Laständerungen besser und schneller steuern als Kohle- oder Atomkraftwerke. Steigt die Zahl der Wind- und Sonnenenergieanlagen, spielen sie also eine wichtige Rolle beim Ausgleich nachfrage- oder wetterbedingter Schwankungen.

Auch die Entscheidung für eine Verlegung der Pipeline am Meeresgrund schlägt, darin sind sich Umweltschützer und Energiekonzerne einig, in der Klimabilanz positiv zu Buche. Denn die Trasse durch die Ostsee folgt nicht nur der kürzesten

Verbindung zwischen den sibirischen Gasfeldern Russlands und Westeuropa, bei ihrem Betrieb werden zudem rund 40 Prozent weniger Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen als im Fall einer Überlandleitung. So bedarf es wegen des hohen Wasserdrucks und der niedrigen Temperaturen am Meeresgrund entlang der Strecke keiner zusätzlichen energiezehrenden Pumpstationen. »Auf Grund der kurzen Leitungen und der effizienten Druckerzeugung sparen wir in den kommenden 50 Jahren mehr als 200 Millionen Tonnen CO₂ ein«, unterstreicht Werner Rott, Nord Streams Deputy Project Director Engineering. Zum Vergleich: 2009 lag der Gesamtkohlendioxid-ausstoß Deutschlands bei 760 Millionen Tonnen.

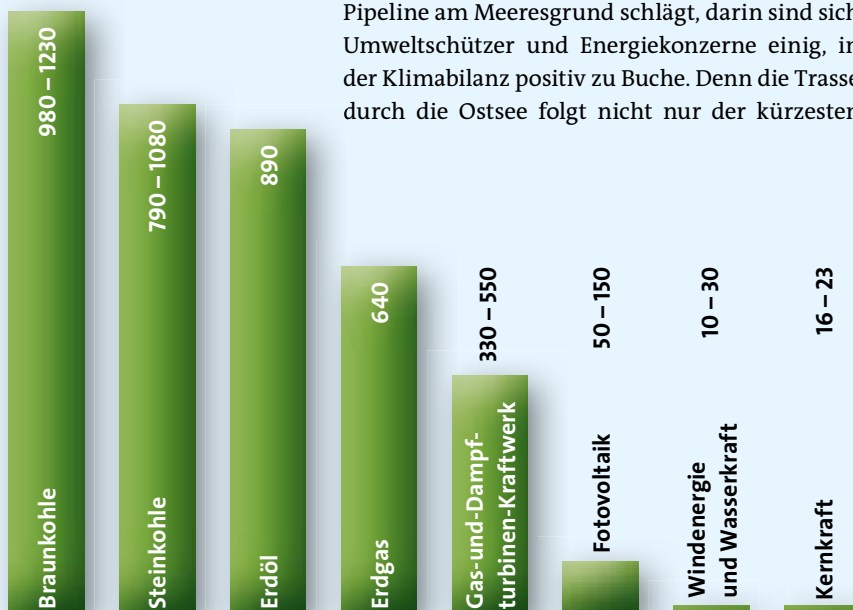
ANRAINER MIT ARGUSAUGEN

Ganz unumstritten war die Verlegung der beiden mehr als 1200 Kilometer langen Stahlrohre dann aber doch nicht. Seit Beginn der Planungen drängten Wissenschaftler, Umweltorganisationen und Behörden aller betroffenen Länder auf eine umfassende wissenschaftliche Begleitung des Projekts und forderten eine Einschätzung der kurz- und langfristigen Folgen. Dazu musste Nord Stream mehr als 100 Millionen Euro in die Hand nehmen, an 96 Messstationen über 1000 Wasser- und Bodenproben analysieren und an 77 weiteren Standorten das Verhalten von Fischen, Meeres-säugetieren und Vögeln beobachten lassen. Im Rahmen von vier Untersuchungskampagnen wurden außerdem geologische Studien auf mehr als 40 000 Kilometern Gesamtdistanz durchgeführt.

Alles in allem musste die Betreibergesellschaft Genehmigungen aus fünf Ländern einholen: Russland, Finnland, Schweden, Dänemark und Deutschland. »Natürlich haben sich die nationalen Behörden auch international abgestimmt – gerade in Sachen Umwelt, Schifffahrt, Fischerei und Sicherheit«, erklärt Ludwig Krämer, Honorarprofessor für Deutsches und Europäisches Umweltrecht an der Juristischen Fakultät der Universität Bremen. »Allerdings wurden immer die Kriterien des jeweiligen nationalen Rechts berücksichtigt – etwa hinsichtlich des Abstands zu Naturschutzgebieten oder des Schutzes von Laichgründen.«

Die Ostsee gilt als besonders fragiles Ökosystem. Denn das kleine Nebenmeer ist lediglich über die dänischen Meerengen mit der Nordsee und damit dem Atlantik verbunden. Zudem ist es im Schnitt selten tiefer als 50 Meter. »Die Folge ist ein äußerst geringer Wasseraustausch«, erklärt Günther Nausch, Meeresbiologe und Leiter der Arbeitsgruppe Allgemeine Meereschemie am Leibniz-Institut für Ostseeforschung in Warnemünde.

CO₂-Ausstoß pro Kilowattstunde (in Gramm)



»Während sich das Wasservolumen in der Nordsee alle zwei bis drei Jahre vollständig austauscht, dauert dies in der Ostsee mehr als 30 Jahre.« Das heißt, was an gelösten Stoffen in die Ostsee gelangt oder im Zuge der Baumaßnahmen vom Grund aufgewirbelt wird, kann das Ökosystem des Baltischen Meers über Jahrzehnte beeinflussen.

Eine weitere Besonderheit: Die Ostsee ist ein Brackwassermeer und an tieferen Stellen durch unterschiedlich salzhaltige Wasserschichten gekennzeichnet. Die oberen rund 60 Meter Wasser sind sauerstoffreich und brackig, weisen also nur einen geringen Salzgehalt auf. Darunter befindet sich häufig eine salzreichere und zugleich sauerstoffarme Schicht, die oft als Todeszone bezeichnet wird. Hier ist höheres Leben nicht möglich.

Auf ihrem Grund sammeln sich Nährstoffe wie organische Substanzen, Phosphat und Ammonium. Das meiste davon stammt aus den intensiv genutzten landwirtschaftlichen Flächen und wird seit Jahrzehnten über die Flüsse in die Ostsee geschwemmt. »Im Normalfall beeinflussen diese Verbindungen den Nährstoffhaushalt des Oberflächenwassers nicht«, so Nausch. Gelangen sie jedoch während der Arbeiten in höhere Schichten, wirken sie dort wie Dünger. Algen können sich geradezu explosionsartig vermehren – mit der Folge, dass nach ihrem Absterben viel mehr organische Substanz zum Meeresgrund sinkt, wo ihr Abbau zusätzlich an den ohnehin knappen Sauerstoffreserven zehrt: Die Todeszonen breiten sich aus. Die Konsequenzen für die Umwelt, aber auch für die Fischerei wären dramatisch (siehe Kasten S. 38).

Deshalb waren sich alle Anrainerstaaten einig, dass ebendieses gefährliche Aufwirbeln von Sedimenten während der Bauphase unbedingt minimiert werden muss. In schwedischen Gewässern verläuft die Stahlröhre in der Nähe von gleich drei »Natura 2000«-Gebieten, länderübergreifenden Schutzräumen der Europäischen Union. Hier nehmen Forscher von Schwedens Meteorologischem und Hydrologischem Institut (SMHI) und der dänischen DHI Group Wasserproben, messen am Meeresgrund, wie sich die Sedimentationsraten verändern, und untersuchen das Wachstum von Muscheln. So können sie sicherstellen, dass die Grenzwerte infolge der Bauarbeiten nicht überschritten werden und empfindliche Ökosysteme unversehrt bleiben.

Mit besonderer Sorge schauen die Finnen auf das Vorhaben. Aus gutem Grund: In ihren Gewässern schlummert das gefährliche Erbe aus zwei Weltkriegen. Chemische Kampfstoffe, Minen und Munition wurden hier unter Wasser »endlagert«. Nach dem letzten Krieg waren es die Alliierten,



ten, die in Deutschland beschlagnahmte Munition in die Ostsee kippten. Später entsorgten auch Anrainerstaaten auf diese Weise chemische Kampfstoffe. Die DDR tat das noch bis in die frühen 1960er Jahre. Insbesondere derlei hochgiftige Substanzen dürften also auf keinen Fall verwirbelt werden.

»Mehrfach«, so Nord-Stream-Sprecher Frank Dudley, »musste deshalb der Streckenverlauf angepasst und die Leitung in großem Bogen um die Gefahrenstellen herumgeführt werden« (siehe Artikel ab S. 42). Besorgt waren auch die Esten, deren Hoheitsgewässer zwar rechtlich gesehen unberührt bleiben, aber nicht gegen womöglich vergiftete Meeresströmungen gefeit wären. Im Rahmen seines Umweltmonitorings für Finnland verpflichtete sich Nord Stream daher, auch die Wasserqualität vor der estnischen Küste zu überwachen. Im April 2011 schließlich kam das estnische Umweltministerium auch auf Basis eigener Untersuchungen zu dem erleichternden Er-

Vor Bornholm zogen Umweltexperten immer wieder Bodenproben. Der Schlick ist hier teilweise mit chemischen Kampfstoffen verunreinigt, die durch die Bauarbeiten aufgewirbelt werden könnten (oben). Ob sich tatsächlich Schadstoffe verbreiten, sollte ein Experiment mit Muscheln erweisen: Biologen ließen die Tiere in gefährdeten Zonen wachsen und verglichen ihre Belastung anschließend mit Exemplaren aus unbeeinträchtigten Zonen (unten).

Umwelt unter Beobachtung

Wie beeinflusst die Pipeline Flora und Fauna der Ostsee? Messstationen an mehr als 1000 Standorten entlang der Trasse helfen Nord Stream, diese Frage zu beantworten.

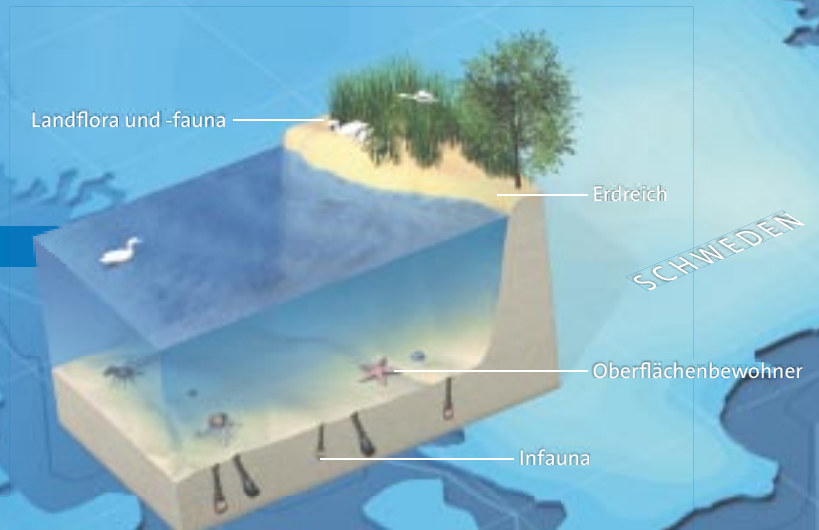
Im Auftrag des Pipelinebetreibers beobachteten Forscher insgesamt 16 entscheidende Eigenschaften des Ökosystems Ostsee. Dazu zählten die Wasserqualität und der Aufbau des Meeresbodens sowie die Populationsgrößen von Vögeln, Fischen und Säugetieren. Außerdem erfasste Nord Stream Auswirkungen auf die Fischerei und das archäologische Kulturerbe. Die Ergebnisse wurden nicht nur den zuständigen Behörden, sondern auch der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Bis ins Jahr 2016 wird diese Überwachung andauern, die Nord Stream vermutlich rund 40 Millionen Euro kosten wird.

WASSERQUALITÄT

Die Trübung durch aufgewirbelte Sedimente ist ein guter Indikator für die Wasserqualität. An bestimmten Stellen setzen Experten mit Messgeräten ausgerüstete Bojen ein, um diesen und andere Parameter zu erfassen. So stellen sie sicher, dass die Grenzwerte bei Erdbewegungen unter Wasser nicht überschritten werden und dass im Bedarfsfall rasch Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Die Trübungsfahnen werden von Schiffen und Flugzeugen aus verfolgt. Sollten sich Schadstoffe ausbreiten, lässt sich dies anhand von Miesmuschelkörben feststellen. Dabei wird der Gehalt an Chemikalien in diesen Muscheln mit dem Gehalt in Referenzkörben verglichen.

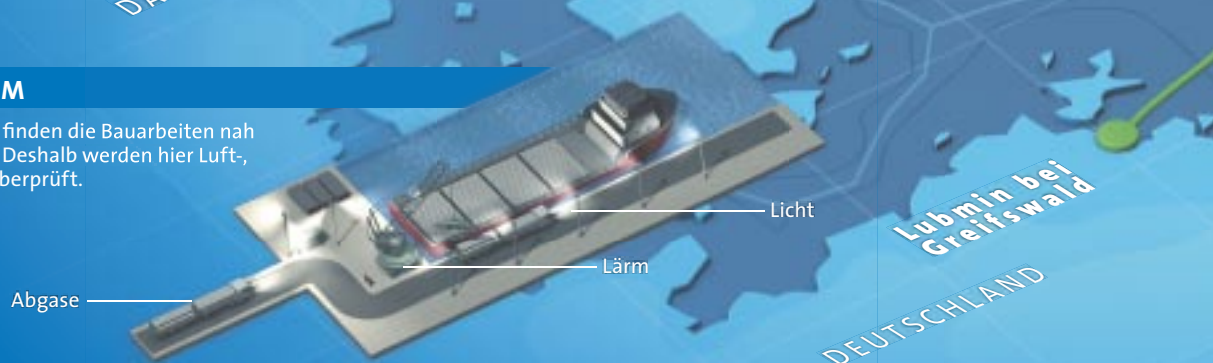
FLORA UND FAUNA DES MEERESBODENS

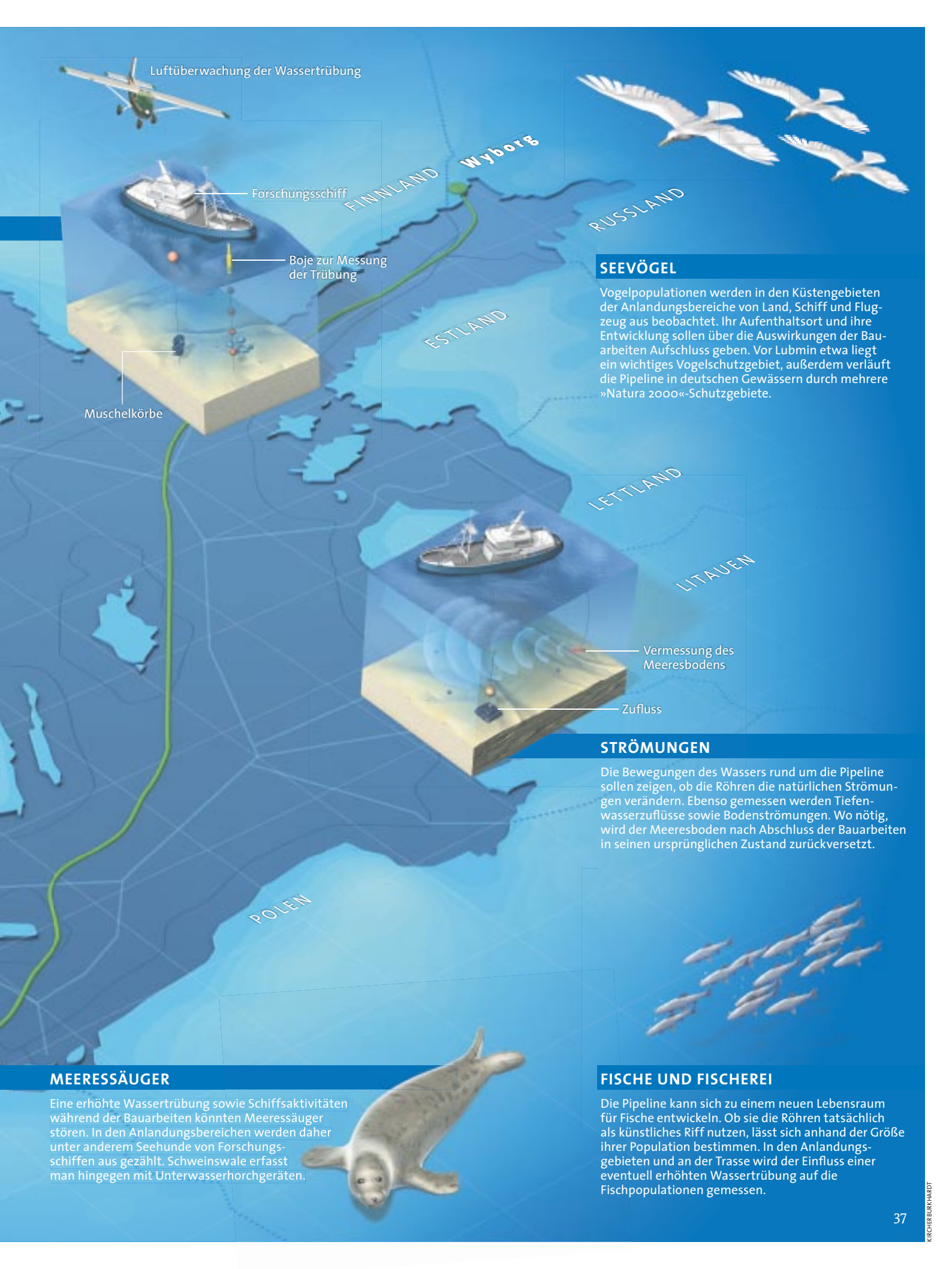
Entlang der gesamten Pipeline werden die am Grund lebenden Organismen beobachtet. Wo Grabungsarbeiten den Meeresboden aufgerissen haben, überwacht man, ob sich im Sand lebende Tiere (Infauna) erholen. Auch die Ansiedlung von Lebewesen auf der Pipeline wird registriert. Die Studien zur Regeneration werden nach Abschluss der Bauarbeiten über mehrere Jahre weitergeführt.



LUFT, LICHT UND LÄRM

In den Anlandungsbereichen finden die Bauarbeiten nah an besiedeltem Gebiet statt. Deshalb werden hier Luft-, Licht- und Lärmemissionen überprüft.





Luftüberwachung der Wassertrübung

Forschungsschiff

Boje zur Messung der Trübung

Muschelkörbe

FINNLAND
Wyborg
RUSSLAND
ESTLAND

SEEVÖGEL

Vogelpopulationen werden in den Küstengebieten der Anlandungsbereiche von Land, Schiff und Flugzeug aus beobachtet. Ihr Aufenthaltsort und ihre Entwicklung sollen über die Auswirkungen der Bauarbeiten Aufschluss geben. Vor Lubmin etwa liegt ein wichtiges Vogelschutzgebiet, außerdem verläuft die Pipeline in deutschen Gewässern durch mehrere »Natura 2000«-Schutzgebiete.

LETTLAND
LITAUEN

Vermessung des Meeresbodens

Zufluss

STRÖMUNGEN

Die Bewegungen des Wassers rund um die Pipeline sollen zeigen, ob die Röhren die natürlichen Strömungen verändern. Ebenso gemessen werden Tiefenwasserzuflüsse sowie Bodenströmungen. Wo nötig, wird der Meeresboden nach Abschluss der Bauarbeiten in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt.

POLEN

MEERESSÄUGER

Eine erhöhte Wassertrübung sowie Schiffsaktivitäten während der Bauarbeiten könnten Meeressäuger stören. In den Anlandungsbereichen werden daher unter anderem Seehunde von Forschungsschiffen aus gezählt. Schweinswale erfasst man hingegen mit Unterwasserhorchgeräten.



FISCHE UND FISCHEREI

Die Pipeline kann sich zu einem neuen Lebensraum für Fische entwickeln. Ob sie die Röhren tatsächlich als künstliches Riff nutzen, lässt sich anhand der Größe ihrer Population bestimmen. In den Anlandungsbereichen und an der Trasse wird der Einfluss einer eventuell erhöhten Wassertrübung auf die Fischpopulationen gemessen.





SCHAUT DER FISCHER IN DIE RÖHRE?

Der Fischfang in der Ostsee hat eine lange Tradition und ist daher nicht nur eine wichtige Einkommensquelle, sondern auch von kultureller Bedeutung. Über 100 Salz-, Brack- und Süßwasserfischarten sind in dem kleinen Nebenmeer beheimatet – darunter Dorsch, Hering und Sprotte. Diese Arten sind für die Fischerei lebenswichtig, doch immer seltener sind die Netze so voll wie früher. Seit den 1980er Jahren sanken die Erträge infolge von Umweltveränderungen und Überfischung um 40 Prozent!

Die Pipeline durfte den angeschlagenen Wirtschaftszweig also auf keinen Fall zusätzlich belasten. Eine besondere Gefahr könnte sie für die Schollen- und Garnelenfischer darstellen, die ihre Schleppnetze über den Meeresboden ziehen. Deshalb wurden die Oberflächen der Gasrohre so eben gestaltet, dass die Netze gefahrlos darüber hinweggleiten. Weil Nord Stream nachweisen konnte, dass weder Pipeline noch Schleppnetz Schaden nehmen, ließ Dänemark seinen Plan, die Schleppnetzfischerei entlang der Pipelinetrasse zu verbieten, wieder fallen.

Während der Baumaßnahmen sind Einschränkungen des Fischereibetriebs hingegen unvermeidlich. So gilt rings um die Verlegeschiffe »Zufahrt verboten« – wofür die Fischer finanziell entschädigt wurden. Viel kritischer sahen Forscher jedoch die Folgen der Baggerarbeiten in den flachen Gewässern. »Was ist, wenn aufgewirbelte Sedimente den empfindlichen Fischlaich bedrohen?«, fragte Christian von Dorrien, Fischereibiologe vom Institut für Ostseefischerei des staatlichen Johann Heinrich von Thünen-Instituts in Rostock – und forderte, dass die Bauarbeiten nicht vor Juni 2010 starten sollten. Letztlich einigten sich Forscher und Pipelinebetreiber auf einen Baubeginn Ende Mai 2010 – so konnte der Zeitplan eingehalten werden, während andererseits der Heringsnachwuchs nicht übermäßig beeinträchtigt wurde. Zählungen des Instituts haben mittlerweile bestätigt, dass der Fischbestand keinen Schaden nahm.

gebnis, dass in den meeresbodennahen Zonen keine verstärkte Trübung messbar sei, die mit den Bauarbeiten in Verbindung stehen könnte. Zudem blieb die Belastung von Heringen mit Dioxin unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte (dieser hochgiftige Stoff stammt vor allem aus Müllverbrennungsanlagen und gelangt über Niederschläge in die Ostsee). Man könne daher davon ausgehen, so Heidi Käär, Meeresspezialistin des estnischen Umweltministeriums, dass von den Verlegearbeiten keinerlei Gefahr für die marine Umwelt vor Estland entstehe.

Auch im Bereich des flachen Greifswalder Boddens vor Mecklenburg-Vorpommern bangten

Umweltschützer und Fischer gleichermaßen um den hier alljährlich abgelegten Laich der Heringe. An dieser Stelle wird die Pipeline, bevor sie bei Lubmin das Land erreicht, zum Schutz vor etwaigen Schiffshavarien in einem untermeerischen Graben verlegt. Würde hier insbesondere bei den Aushubarbeiten verstärkt Sediment aufgewirbelt, könnten die Licht- und Sauerstoffverhältnisse derart beeinträchtigt werden, dass der Fischnachwuchs ernsthaft gefährdet würde. »Tatsächlich stieg die Trübung in 500 Meter Abstand zu den Aushubarbeiten aber niemals über die natürlichen Werte«, sagt Jan Kube, Meeresbiologe und bei Nord Stream zuständig für das deutsche Umweltmonitoring. »Einzig in unmittelbarer Nähe zu den Baggern haben wir deutliche Trübungen gemessen.« Auch dies sei kein Grund zur Besorgnis, da die Partikelkonzentration immer wieder auch auf natürliche Weise – nämlich schon bei etwas stärkerem Wind – sprunghaft ansteigt. Und so verwundert es nicht, dass Fischereibiologen des Johann Heinrich von Thünen-Instituts in Rostock bisher keinen Rückgang der Larven des beliebten Speisefischs beobachten konnten.

GERÄUSCHEMPFINDLICHE WALE

Die dem Greifswalder Bodden vorgelagerte Pommersche Bucht ist darüber hinaus Tummelplatz für die seltenen Schweinswale. Würden sie durch die Bauarbeiten in Mitleidenschaft gezogen, wären die ohnehin geringen Bestände womöglich dauerhaft bedroht. »Schweinswale orientieren sich mit Hilfe von Ultraschall«, erklärt der Meeresbiologe Ansgar Diederichs von der Firma BioConsult SH in Husum. »Wird ihr Hörsinn beeinträchtigt, kann dies dramatische Konsequenzen haben.« Allerdings gehe von den Verlegearbeiten kaum eine Gefahr aus. Weil der Lärm von den Baggern und Schiffen eher langsam anschwillt und gleichmäßig wieder abklingt, haben die Tiere Zeit, sich darauf einzustellen und gegebenenfalls in ruhigere Zonen auszuweichen. Die explosionsartigen Geräusche, die etwa bei den Rammarbeiten beim Bau von Offshore-Windparks entstehen, hält Diederichs für bedenklicher.

Mit Hilfe von Unterwassermikrofonen, so genannten Hydrofonen, hat der Forscher nach den typischen Klicklauten der Schweinswale gefahndet und herausgefunden, dass sich die Meeressäuger tatsächlich im Bereich der Verlegeschiffe aufhielten. »Überraschenderweise tauchten die Tiere vor allem dann auf, wenn die Bagger arbeiteten«, so Diederichs. Welche Gründe dies hat, ob die Wale vielleicht sogar schlichtweg neugierig waren, darauf hat der Forscher bisher keine Antwort.

»Die Angst vor Umweltschäden war riesengroß«

Neel Strøbæk berät den Pipelinebetreiber Nord Stream in Sachen Umweltschutz und half dabei, alle Baugenehmigungen einzuholen. Wir befragten sie zu den Auswirkungen des Pipelinebaus und möglichen Spätfolgen.

Frau Strøbæk, als Projektmanagerin bei Rambøll unterstützten Sie Nord Stream darin, die vielfältigen Naturschutzinteressen der Anrainerstaaten beim Pipelinebau zu berücksichtigen. Waren Sie erfolgreich?

Auch wenn es in einzelnen Fällen etwas länger gedauert hat, am Ende hat Nord Stream alle Baugenehmigungen bekommen. Für uns war das eine enorme organisatorische Herausforderung: Jedes der angrenzenden Länder hat seine eigenen Vorschriften und Auflagen. Zu Spitzenzeiten arbeiteten wir mit 60 Koordinatoren an den Genehmigungsverfahren.

Welche Rolle spielten Umweltfragen beim Bau der Ostseepipeline?

Eine sehr große. Meist planen Firmen ein Projekt nur nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Am Ende müssen dann Umweltberater wie wir schauen, was noch zu retten ist. In diesem Fall war es aber anders: Die Belange des Natur- und Umweltschutzes wurden schon bei der Planung berücksichtigt.

Ein Grund für die hohen Standards im Umweltschutz dürfte sein, dass sich Naturschutz- und Umweltverbände im Vorfeld lautstark zu Wort meldeten.

Ja, das stimmt. Die Angst vor Umweltschäden war in der Tat riesengroß. Teils wurde befürchtet, die Bauarbeiten und der Betrieb der Pipeline könnten eine regelrechte Umweltkatastrophe anrichten. Man hatte in der Ostsee, die ja viel flacher ist als beispielsweise die Nordsee, wo tausende Kilometer solcher Leitungen liegen, noch nie Erfahrungen damit gesammelt. Entsprechend herrschte auch bei den Genehmigungsbehörden in den betroffenen Ländern starke Unsicherheit.

Und die konnte Nord Stream ausräumen?

Ja, es gab ein intensives begleitendes Umweltuntersuchungsprogramm, in das mehr als 100 Millionen Euro investiert wurden. Wir haben die Experten vor Ort schon lange vor den Bauarbeiten

beauftragt, den Zustand der betroffenen Gebiete zu dokumentieren. Dann wurde während und nach der Pipelineverlegung weiterbeobachtet. Zudem liegen in der Ostsee viele gefährliche Munitionsreste, die natürlich auch erfasst und – wo nötig – entsorgt werden mussten. Wieder andere Fachleute haben sich speziell mit Fischen, Seevögeln oder Meeressäugern beschäftigt.

Sind denn die befürchteten negativen Konsequenzen eingetreten?

Eine Hauptsorge war, dass es durch aufgewirbelte, nährstoffreiche Sedimente zu Algenblüten kommt. Allen Messergebnissen nach zu urteilen sind sie aber nirgendwo aufgetreten. Entwarnung können wir auch für die Tierwelt geben. Wichtige Laichgebiete des Herings wurden nicht beeinträchtigt, und auch für Vögel und Meeressäuger besteht aus unserer Sicht keine Gefahr.

In einigen Abschnitten wurden Gräben für die Pipelinerohre ausgehoben. Ist das nicht ein massiver Eingriff?

Durch die Baggerarbeiten wird der Meeresboden natürlich erst einmal gestört. Aber das ausgehobene Material wurde den Auflagen entsprechend zwischengelagert und nach der Verlegung wieder zurückgebracht. Wir sind daher optimistisch, dass es dort unten nach einiger Zeit wieder genauso aussehen wird wie zuvor. Das Monitoringprogramm wird bis zum Jahr 2016 weiterlaufen. Die Daten werden öffentlich zugänglich gemacht, so dass sie jeder Wissenschaftler auch für seine eigenen Forschungsprojekte nutzen kann.

Die Pipeline soll mindestens 50 Jahre in Betrieb bleiben. Mit welchen Spätfolgen rechnen Sie?

Wir rechnen eigentlich nicht mit Langzeitfolgen. Etwas anderes ist es natürlich, wenn man die Rohre eines Tages wieder rausholen will. Aber das steht momentan nicht zur Debatte.

Die Fragen stellte Kerstin Viering, freie Journalistin in Lehnin, Brandenburg.



MIT FRED. GEN. VON RAMBØLL (WWW.RAMBØLL.COM)

Neel Strøbæk ist Spezialistin für Umweltverträglichkeitsprüfungen und internationale Genehmigungsverfahren. Als Projektmanagerin bei der dänischen Beratungsfirma Rambøll bereitet sie maßgeblich die Umweltverträglichkeitsstudie vor, die die Voraussetzung für die Erteilung der Baugenehmigungen darstellt.



WAS PASSIERT EIGENTLICH WENN DIE PIPELINE PLATZT?

Mit rund 60 000 Schiffspassagen pro Jahr gehört die Ostsee zu den weltweit am stärksten befahrenen Meeren – Havarien sind also nicht ausgeschlossen. Dabei kann auch die Gaspipeline am Meeresgrund (siehe Bild oben) beschädigt werden und leckgeschlagen.

In einem solchen Fall würden Sensoren sofort den Druckabfall in der Pipeline registrieren und im Notfallschutzzentrum von Nord Stream in Zug in der Schweiz Alarm auslösen. Es käme zur automatischen Schließung aller Ventile auf russischer Seite, während in Deutschland alle Ventile geöffnet würden. Auf diese Weise entweicht so wenig Gas wie möglich.

Negative Auswirkungen auf die Umwelt sind dabei nicht zu erwarten. Der Grund: Anders als im Fall einer gebrochenen Erdölleitung kann es nicht zu einer Wasserverschmutzung kommen. Das Gas würde aufsteigen und in die Atmosphäre entweichen.

Weitere Erkenntnisse erhofft er sich von den Beobachtungen beim Bau der zweiten Röhre, die im Frühjahr 2012 fertig sein soll. »Bedauerlicherweise ist die Zahl der Wale in der Ostsee aber so gering«, sagt Diederichs, »dass wir froh sind, wenn wir überhaupt welche sehen.« Ob er am Ende seiner Beobachtungen statistisch gesicherte Aussagen machen kann, weiß er daher nicht.

Während die Verlegeschiffe und mit ihnen Lärm und Erschütterungen an jedem Tag mehrere Kilometer weiterziehen, bleibt die Pipeline selbst für immer am Meeresgrund liegen. Wichtiger als die kurzfristigen Störungen könnten deshalb die langfristigen Auswirkungen auf die komplexen und empfindlichen Ökosysteme sein. Egal, ob die Rohre unmittelbar auf dem Meeresboden abgelegt werden oder ob in flachen Gewässern zunächst ein Graben ausgehoben werden muss: Biologen und Umweltschützer fürchten die Folgen dieser Eingriffe. Wie geht die Natur in den kommenden Jahrzehnten mit dem Fremdkörper am Ostseegrund um? Diese und ähnliche Fragen gilt es nun im Rahmen verschiedener Monitoringprogramme zu beantworten.

DAS TAUSEND-KILOMETER-RIFF

Auf deutscher Seite etwa beobachten Wissenschaftler vom Institut für Angewandte Ökosystemforschung in Neu Broderstorf bei Rostock die Entwicklungen am Ostseegrund. Dazu haben sie zunächst schon vor Beginn der Bauarbeiten akribisch Sandbänke, Riffe und Felsen kartiert – und erkundet, welche Tiere und Pflanzen dort leben. Sobald die Bagger weitergezogen waren, verglich das Team um die Meeresbiologin Anja Schanz das Nachher mit dem Vorher.

Die ersten Ergebnisse erscheinen ernüchternd, waren aber zu erwarten. Zwar haben die Bagger wie vereinbart die Unterwasserlandschaft wieder so hergestellt, wie sie sie vorgefunden haben – wo vorher größere Gesteinsbrocken lagen, befinden sich auch jetzt wieder welche. Bislang haben Tiere und Pflanzen die Narbe im Meeresgrund jedoch nicht wieder besiedelt. Der Lebensraum mit seinen vielfältigen Organismen – Wissenschaftler sprechen vom Benthos – war entlang der Gasroute weit gehend zerstört. Doch die Biologin ist zuversichtlich: »Schon im nächsten Jahr wird sich hier neues Leben ansiedeln«, sagt sie und verweist auf Erfahrungen mit anderen Pipelineprojekten, wie etwa dem zwischen Baltrum und Langeoog in der Nordsee. Dort erfolgte die Wiederbesiedlung durch alle charakteristischen Arten sehr schnell.

Auch – und gerade – dort, wo die Pipeline nicht in einem Graben verläuft, sondern sich unmittel-

bar über den Meeresboden schlängelt, wird neues Leben einziehen. »Die Röhren wirken wie ein künstliches Riff und werden rasch von entsprechenden Organismen in Beschlag genommen«, so Schanz. Dort siedeln sich dann auch Arten an, die es im sonst überwiegend weichsandigen Untergrund vorher gar nicht gab. Genau das beobachten Wissenschaftler nicht nur an den Fundamenten der großen Windanlagen vor der Nordseeküste, sondern auch an dem künstlichen »Riff Nienhagen« unweit von Warnemünde, wo Forscher die Auswirkungen menschengemachter Strukturen am Meeresgrund auf Flora und Fauna erkunden. »Es dauert nur ein Jahr, bis die metergroßen Elemente aus Stein und Beton über und über besiedelt sind«, sagt Thomas Mohr von der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern. Nach vier bis fünf Jahren könne man im Fall eines künstlichen Riffs von einem relativ stabilen, sich jahreszeitlich verändernden Ökosystem sprechen. Im Fall der Pipeline dürfte das nicht anders ablaufen.

Einen Haken hat die Sache allerdings: Das mit Beton ummantelte Stahlrohr lockt auch invasive Tier- und Pflanzenarten an, also solche, die in den betreffenden Regionen der Ostsee eigentlich nicht beheimatet sind. So weiß man von den Offshore-Windparks in der Nordsee, dass sich an deren Fundamenten Seescheiden niederlassen, eingeschleppte wirbellose Organismen, die nicht selten die Ökosysteme in ihrer neuen Umgebung dominieren und eigentlich hier heimische Arten verdrängen. So mag sich trotz aller Vorsichtsmaßnahmen langfristig etwas am Meeresgrund verändern. Ob und in welchem Ausmaß dies geschieht, wird sich erst in den kommenden Jahren zeigen.

Auf Grund der bisherigen Erfahrungen mit ähnlichen Projekten in aller Welt sind jedoch auch Umweltschützer optimistisch. Sie hoffen, dass die Ostseepipeline im wahrsten Sinn eine Brücke in eine neue Zeit sein kann. Denn längst sind die Auswirkungen des globalen Klimawandels auch in Europa spürbar – und in den Gesellschaften ist infolgedessen ein breiter Stimmungsumschwung bemerkbar. Darüber hinaus befeuern Umweltkatastrophen wie die Havarie der »Deepwater Horizon« im Golf von Mexiko oder der GAU im Atomkraftwerk von Fukushima das Verlangen nach einer klimafreundlichen, schadstofffreien und ungefährlichen Energieversorgung. Die Zukunft für die erneuerbaren Energien ist rosiger als je zuvor.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.



SECURING DIVERSITY IN ENERGY SUPPLIES

Today's world calls for creative and sustainable energy solutions that co-exist with the existing environment. With strong Scandinavian roots and offices in more than 20 countries, we provide inspiring and exacting solutions that make a genuine difference to our customers, the end-users and society as a whole.

WWW.RAMBOLL.COM

RAMBOLL



Specialist divers were deployed before construction began.

Detective Work on the Seabed

The floor of the Baltic Sea is littered with the explosive legacy of two world wars. Nord Stream vessels spent four long years searching for bombs and shells—to the delight of underwater archaeologists.

By Kerstin Viering

This does not look good. A mysterious piece of metal is lying on the seabed of the Bay of Greifswald, about eight kilometers northeast of the north German state of Lubmin. A thick layer of rust and mussels encases the barrel-shaped object. The combined forces of water, salt and marine animals have been taking their toll for some time now. But what exactly is it? At first glance it's hard to tell. It is possible that the truth may not be too pleasant, because hidden deep beneath the surface of the Baltic Sea lies the legacy of several wars. Sea mines and grenades, bombs and poison gas munitions—there are many things resting quietly down there that, if stirred, just might blow up. So what happens if the strange metal cylinder is full of explosives?

There is little time for the matter to be resolved. It is May 2010, not long before excavators are set to create a 27-kilometer-long ditch through the bay to make way for the Baltic pipeline to be laid. Naturally, the company in charge of the operation, Nord Stream, does not want any explosive surprises. So just before the start of construction, it has asked SeaTerra, a Wandlitz, Germany-based firm specializing in geophysics and unexploded munitions clearance, to take one more really good look at the seafloor. A metal object of this shape and size is always suspicious. But the experts can finally give the all clear. It is not a bomb, but a cast-iron stove with decorative lion's feet. Not at all dangerous—but still exciting. Research divers from the State Office for Culture and Heritage in Schwerin investigate the site of the find, and lo and behold: the oven is just the beginning. Buried under the mud and sand they uncover a shipwreck more than 200 years old.

Discoveries such as these are not unexpected for workers on the pipeline project. "It was clear that we'd find something interesting in our preliminary investigations," said Nord Stream employee Steffen Ebert. After all, there are believed to be around 100,000 shipwrecks on the Baltic Sea floor, and the tens of thousands of mines from the First and Second World Wars have by no means all been removed. It would be most unusual if the pipeline's route just happened to be completely free of munitions and wrecks.

EXPLOSIVE FINDINGS

"We've tried to avoid problem areas while planning the route," Ebert emphasizes. For example, the region around Bornholm caused quite a few headaches. Originally, the pipes were intended to pass to the south of this Danish island—until the country's authorities pointed out there is a known dumping ground for chemical weapons in the area. "After the Second World War, the Allies ordered the German poison gas stocks be destroyed," explains Robert Mollitor, from the Mecklenburg-Vorpommern State Munitions Recovery Service in Schwerin. Simply throwing the ammunition into the sea was seen as a perfectly acceptable way of disposing of it at the time. Fishermen, sailing under the supervision of the Russian military, were paid to drop their toxic cargo in certain regions of the Baltic Sea. "We also know about dumping grounds near the Gotland Basin and Bornholm," says the munitions expert. Building a pipeline through these chemical weapon graveyards would have been too risky. The planners searched for a new pathway north of Bornholm, but it was found to

AT A GLANCE

1. All in all, the ships commissioned by Nord Stream explored more than 40,000 kilometers of the Baltic Sea.
2. Many mines had to be destroyed. Where this was not possible, the pipeline builders bypassed the explosive finds.
3. Again and again, wrecks were found that archaeologists were able to secure or salvage.

MINES ARE ONLY ONE OF AROUND 1,000 TYPES OF SUSPICIOUS FINDS—THE OTHERS ARE MAINLY PIECES OF SCRAP WHICH HAVE BEEN THROWN OVERBOARD, SUCH AS BICYCLES, SHOPPING CARTS AND REFRIGERATORS

The munitions can only be inspected safely by using diving robots. Even though they have been under water for decades, the mines could still explode.

be too close to a major shipping zone. So the final pipeline route runs south of Bornholm, skirting around the munitions area.

However, it is still most unfortunate that the location of many of the Baltic Sea's military contamination sites remain unknown. "The seabed has never been completely surveyed in this respect," says Mollitor. This meant Mollitor and his colleagues were unable to rule out the possibility of risky explosives being found in the Bay of Greifswald, or that the long-standing rumors about poison gas close to the German coast might be true. Did the fishermen hired after the war really take the ammunition all the way to Bornholm? Or did they just dump their cargo overboard shortly after setting sail? Nobody knows.

"We put a great deal of emphasis on thorough preliminary investigations because of this," says Ebert. Since 2005, research ships commissioned by the pipeline operator have covered more than 40,000 kilometers along the route and studied the sea bottom in several stages with ever-increasing detail. Experts used the data to decide on the best route, and the 15-meter-wide strip was then scoured yet again, even more thoroughly this time.

This research employed the most varied technical assistance available. Sonar devices provided a clear picture of the Baltic Sea bed and the objects lying on it. With the help of a sediment echo sounder, the seabed was scanned with ultrasound, allowing the various geological layers

to be uncovered. A magnetometer dragged across the seafloor helped detect telltale traces of magnetic ferrous material. More highly sensitive metal detectors called gradiometers enabled the detection of pieces of iron buried in sediment. Researchers used remotely operated underwater vehicles to traverse the pipeline's route in order to collect the gradiometer data, as well as detailed images of the seafloor.

SHELLS, SHIPWRECKS AND SHOPPING CARTS

"These recordings show all of the various things which lie on the seabed of the Bay of Greifswald," says Mollitor. "Lots of shopping carts, for example, old cars and some things which are hard to recognize." In these cases, Nord Stream hired specialist divers to clear the sediment and provide an accurate analysis of the suspect finds. "It's often only specialists who can distinguish whether a find is actually dangerous," explains Mollitor. Live ammunition and harmless practice munitions can be confusingly similar when you are unsure which tiny screw differentiates one from the other.

In order to remove the dangerous legacy of the wars, Nord Stream collaborated with the British mine clearing company BACTEC and the relevant authorities of the various countries involved. In total, the experts have exploded about one hundred mines along the route of the pipeline, primarily in the Gulf of Finland. By contrast, in the German coastal waters they found mostly blank ammunition. In the end, controlled explosions were not necessary and, fortunately, the rumors of large amounts of poison gas having been dumped were not confirmed.

Nonetheless, the laying of the pipeline in the area of the Bay of Greifswald would need to be handled with the utmost care. Although the pipeline simply lies on the Baltic seabed for great stretches of its route, for safety reasons it needed to be laid in a trench, which then had to be filled in. These kinds of disruptive activities always come with a large amount of risk. "Just before the start of construction the divers from SeaTerra had another close look at all of the metal objects on the route," says Ebert. It was only at this point, in May 2010, that the lion-footed oven and the shipwreck underneath were discovered off the coast of Lubmin.

"The ship was completely hidden beneath the sediment, so no one had seen it during the





REUTERS / INTS KALININS

A huge water fountain shows that a mine deep under the sea has been detonated. Expert demolition squads had to destroy the dangerous finds on the spot.

preliminary studies,” explains Detlef Jantzen, head of the Department of Archaeology at the State Department for Culture and Heritage in Schwerin. Using an underwater vacuum cleaner, his colleagues gradually revealed a small freighter, most likely dating from around 1800, which had been crossing the Baltic Sea with a cargo of lime. The researchers have carefully examined the wreckage, made drawings and taken photographs—and also discovered why the nearly ten-meter-long vessel ended up on the Baltic seabed. It appears the stove was to blame. Burn marks around it reveal that a fire had broken out on the ship. A few tools and cooking utensils, glass bottles and shards of pottery still tell of life on board. One of the sailors had a pipe, for example, with a colorful porcelain bowl and a woman painted on it. But what became of him and the rest of the crew, whether they saved themselves or drowned, we will probably never know.

The wreck is of great interest to the Schwerin-based researcher. “There are not many ships from that time which are so well preserved,” explains Jantzen. So he and his colleagues developed a plan to rescue the freighter from the depths of the Baltic. “That was an exciting project,” says the archaeologist. “The ship was so stable that we were able to raise it and move it

in one piece.” Employees of the Dutch salvage company Periplus Archeomare took charge of the difficult task. Constrained by two strong belts that crisscrossed under the hull and were attached to a metal frame, the wreck was initially left floating just below the surface of the water. It was then transported to its new destination. Supported by sandbags and wrapped in special textiles to protect against erosion and ship worms and covered again with sediment, the ship now rests in a pit about 120 meters away from the site where it originally sank.

A VALUABLE CARGO OF COPPER

But there was still plenty more work ahead for the wreck rescuers from Schwerin. In early June 2010, while excavation was still underway on the ship with the oven, Nord Stream announced the next find, situated a short distance outside of the Bay of Greifswald. Once again, the divers leapt into action. This time, buried in the sediment, at a depth of about seven meters, they discovered the remains of a copper-laden shipwreck from the mid-15th century. “This is a particularly exciting discovery,” says a delighted Jantzen. The copper plates on board could reveal details of numerous medieval trade relationships. In those days the metal was sold in disc form, with many of the pieces bearing the

At first this potbellied stove was mistaken for a bomb. Divers eventually realized that it belonged to a sunken ship.



LANDESAMT FÜR KULTUR UND DENKMALPFLEGE, ABTEILUNG ARCHÄOLOGIE UND DENKMALPFLEGE SCHWERIN / SABINE SUHR

An Explosive Job

The Baltic Sea contains the dangerous remnants of two world wars. More than 80 items were cleared from the path of the Nord Stream pipeline.

Nord Stream profited from the experience of the naval units of the countries involved. Within the framework of “Partnership for Peace,” an initiative from NATO and 22 other countries, over 1,000 mines have been cleared since 1996.

In Russian waters, in the Baltic pipeline’s security and anchor corridor, about 30 mines were found and removed by the Russian Navy. In the Finnish “exclusive economic zone” specialists from the British company BACTEC International disposed of around 35 mines, as well as seven in Swedish waters and two munitions dumps in the German area.

ROV SUPPORT VESSEL

A munitions disposal team of 15 is on the vessel along with the crew. VHF (very high frequency) radio ensures that nearby ship traffic is aware of clearance operations.



Survey Vessel

CLEARANCE PROCEDURES

- 1** The ROV carries out a site survey of the seabed with a 1,000-meter radius while the support vessel is waiting at a safe distance.
- 2** The survey confirms the state of the mine. The ROV is recovered. A mammal protection system is set up and the marine mammal observers begin monitoring.
- 3** The clearance plan is finalized and authorities are advised. The ROV maneuvers the frame with the explosives into position for demolition.
- 4** The RIB lays the Firing Line and then begins scanning for fish and marine mammals in the area. A warning to all ship traffic is issued.
- 5** The fish-scarer charge is fired and is immediately followed by the main charge.
- 6** The RIB visually checks the surface. The ROV confirms the demolition. Fragments of scrap and equipment are recovered.

SEAL SCRAMMER

The seal scrammer acoustic device emits very high intensity sounds that can be heard for many kilometers underwater. This noise makes the vicinity uncomfortable for marine mammals and causes them to vacate the area.



TMS

The TMS (tether management system) is the ROV’s “garage.” It eliminates the effect of drag of the long length of umbilical attached to the ROV. It also provides protection to the ROV during its launch and recovery.



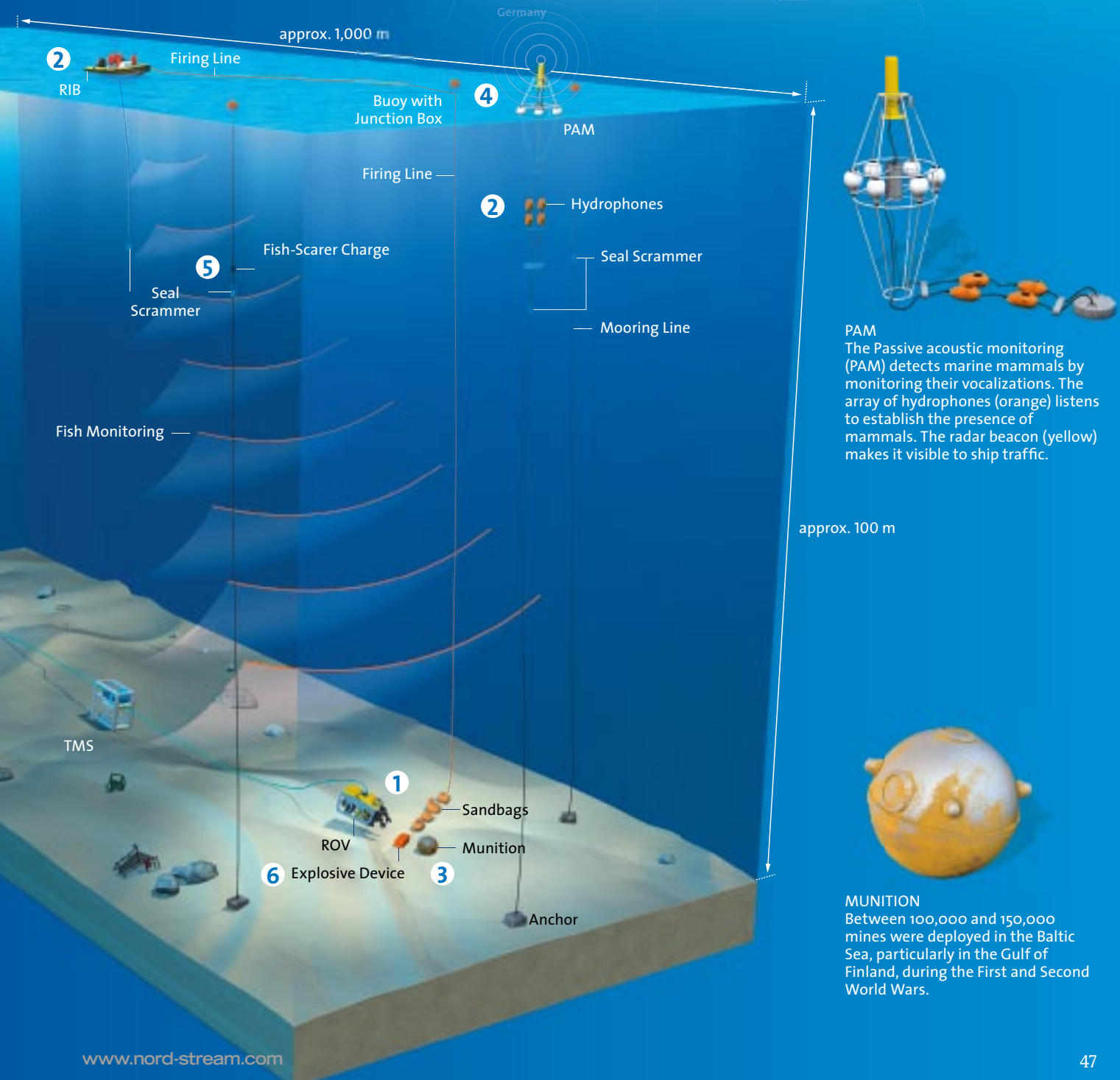
ROV

Via an umbilical, the ROV (remotely operated vehicle) transmits survey data to the support vessel. With its manipulator arms it deploys the explosive charge and collects scrap after the demolition.



Identified Munition Nord Stream Route

RIB
The RIB (rigid inflatable boat) accommodates the marine mammal observers, and undertakes fish monitoring.



PAM
The Passive acoustic monitoring (PAM) detects marine mammals by monitoring their vocalizations. The array of hydrophones (orange) listens to establish the presence of mammals. The radar beacon (yellow) makes it visible to ship traffic.



MUNITION
Between 100,000 and 150,000 mines were deployed in the Baltic Sea, particularly in the Gulf of Finland, during the First and Second World Wars.



In the murky waters of the Bay of Greifswald, Nord Stream came across the remains of old freighters. The wreckage revealed a lot about how such ships were built.

hallmarks of the buyer or seller. The place where the copper was smelted can sometimes also be identified.

However, because of its advanced age, this ship did not prove to be as robust as was hoped. Moving it in one piece was simply out of the question. Instead, the archaeologists took the wreck apart, piece by piece, and then brought the individual parts to the surface. Since any wood or metal that has spent centuries on the seabed cannot be brought onto dry land without extensive conservation measures, the pieces are now stored in large water-filled containers in Schwerin, awaiting further investigation.

Another vessel from the Baltic seabed tells the story of a military plot gone awry. This wreck, from the 18th century, belongs to a line of twenty ships that form a chain along the floor of the Boddensandschwelle, the sand bank at the entrance of the Bay of Greifswald. In 1715, during the Great Northern War, the Swedish military sank one small boat every forty to sixty meters in the shallow water to stop the enemy Danish fleet from entering the bay.

GENTLY THROUGH THE CORDON

In military terms, the plan turned out to be a complete failure, as a local fisherman showed the Danes the only navigable route through the wrecks. However, almost 300 years later, in the 1990s, the rediscovered ships proved to be a serious obstacle. This time it was not an advancing army being hindered, but rather the builders of the pipeline. And there would be no traitorous insider tips from fishermen to help them find their way. “We looked into which of the ships would be the best one to move,” says Jantzen. In the end, the smallest and most poorly preserved wreck was chosen. Of the original, possibly 20-meter-long boat, not much more than a pile of ballast stones and planks remained.

It is also fair to assume that the boat was not in very good shape before it met its end. “Of course, the Swedes wouldn’t have sunk particularly valuable ships,” says the archaeologist. The annual rings in its wood planks reveal that the small freighter had probably seen several decades’ service before its final voyage. Nevertheless, preserving the boat is still seen as a worthwhile exercise. “If you want to learn something about ships from that time you need originals,” says Jantzen. Only a few of these have survived. As with the medieval vessel, the State Office archaeologists lifted the boat up in separate parts. In this case, preservation on land would have been too expensive, so the freighter was placed in a new berth about twenty kilometers away. There, wrapped in special textiles, in a pit dug by the experts, the many broken pieces of the wreck were once again laid to rest in the sand of the Baltic Sea. Another witness to history saved, this small ship is sure to have its own tale to tell researchers in the future.

Kerstin Viering is a freelance science journalist living in Lehnin, Brandenburg.

Life only changes when you challenge convention.



At Sumitomo, we believe that just because something has never been done, it doesn't mean it can't be. We exist to challenge possibilities, even as we create opportunities for businesses and people. As a global company, solving problems and seeking revolutionary solutions to real needs are goals we truly cherish. And even if these goals are far, you can be sure we're up to the challenge so you are never left high and dry.

Striving Today for a Thriving Tomorrow

 **Sumitomo Corporation**

<http://www.sumitomocorp.co.jp/english/>

DAS LETZTE ...



WÜRDE MAN DIE 1224 KILOMETER
LANGE PIPELINE SO SEHR VERKLEINERN,
BIS SIE DÜNN WÄRE WIE EIN MENSCHLICHES HAAR –
SIE HÄTTE NOCH IMMER EINE LÄNGE VON UNGEFÄHR 70 METERN!

R U S S I A



THE UNDERSEA WORLD OF OMK

Pipes for subsea gas pipelines are the trademark of one of Russia's largest metallurgical corporations, United Metallurgical Company (OMK). The projects of the past decade are as follows: Nord Stream gas pipeline (one of the most sophisticated projects), submerged crossing of the Bovanenkovo–Ukhta gas pipeline across the Baydaratskaya Bay, Dzhubga–Lazarevskoye–Sochi main gas pipeline, and OML 58 O.U.R. (Obite–Ubeta–Rumuji) gas pipeline in Nigeria (project operator: Total).

The production of large-diameter pipes for subsea gas pipelines was launched at Vyksa Steel Works (VSW), part of United Metallurgical Company, in 2005–2007. In November 2007, OMK entered into the contract for the production of pipes for the first line of the Nord Stream gas pipeline. Under the contract, VSW produced more than 260 thousand tonnes of pipes of 1,220 mm in diameter with wall thicknesses of 30.9, 34.6, and 41.0 mm [steel grade: SAWL 485 IFD (Kh70)]. The pipes are made of steel SAWL 485 IFD (Kh70) and have an external three-layer corrosion-resistant coating and an internal friction-reducing coating. The pipes of 41 mm in wall thickness are unique in terms of their characteristics and withstand a working pressure of 220 atmospheres. All pipes meet Norway-based Det Norske Veritas's (DNV) standards for subsea gas pipelines and additional requirements of the Nord Stream project.

For Phases 1 and 2 of the Nord Stream gas pipeline construction, VSW produced a total of more than 460 thousand tonnes of large-diameter pipes.

"United Metallurgical Company can be proud that it entered the league of global leading suppliers of pipes for the biggest megaprojects," emphasized Henning Kothe, Nord Stream Project Director. "We are satisfied with the way OMK fulfills its obligations. While selecting suppliers of pipes for the second link, we employed an integrated approach, taking into account their track records in the supply of their products as well as their proposals as to quality, prices, and other characteristics."

High mechanical properties of pipe base material and weld seams allow OMK pipes to be used for pipeline construction in different climatic regions, including Far Northern areas. Production of sophisticated high quality pipes is possible owing to the Company's investment policy. Over the past seven years, OMK has invested \$4 billion in the modernization of its production facilities. The large-scale investment program enabled the Company not only to profoundly upgrade its existing facilities, but also construct two unique greenfield projects: a complete cycle plant for the

production of hot-rolled steel coils and Mill 5000 for the production of wide thick sheets further used to make pipes for main pipelines.

"Owing to our investment in the replacement of pipe facilities, our Company can manufacture pipes of any level of complexity, including pipes for the most sophisticated and responsible projects for the construction of subsea gas pipelines," said OMK President Vladimir Markin.

Meanwhile, the Company is getting ready to submit bids for supplying large-diameter pipes to new main pipelines: South Stream, Shtokman, Nabucco, and others. OMK has a good "subsea track record," which raises its hopes of being awarded contracts under these and other large projects.

On the photo: A. Parunov, Export Sales Director, V. Markin, Member of the OMK Board of Directors, OMK President, A. Sedykh, Chairman of the OMK Board of Directors, O. Davydyuk, Advisor, Member of the OMK Board of Directors, A. Kastravets, PR Director





Bereit für den Transport

Der erste Leitungsstrang der Nord Stream-Pipeline ist bereit für den Transport von Erdgas: von den riesigen Gasvorkommen in Russland über das europäische Fernleitungsnetz hin zum stetig wachsenden europäischen Energiemarkt. Ermöglicht wurde das technische Meisterstück, das 1.224 Kilometer durch die Ostsee führt, durch den großen Einsatz aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Nord Stream. Es ist ebenso das Resultat der konstruktiven Unterstützung unserer Anteilseigner, Partner, Auftragnehmer und der Experten aus der Ostsee-Region. Ein besonderer Dank gilt allen, die zur Stärkung der europäischen Energieversorgung beigetragen haben. www.nord-stream.com