

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ARCHÄOMETRIE
Altersbestimmung
mit Hilfe des
Erdmagnetfelds

JANUAR 2015

ASTRONOMIE

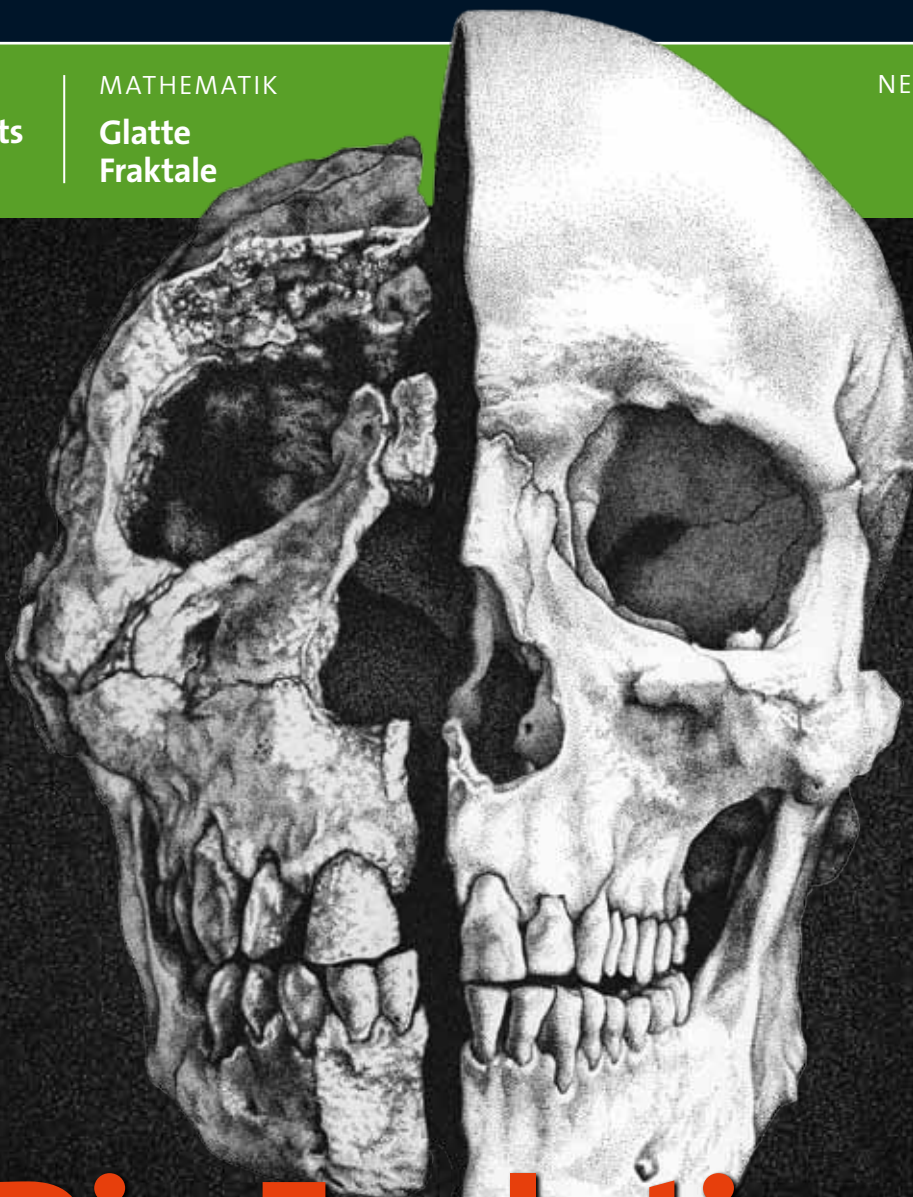
Die Welt jenseits
von Neptun

MATHEMATIK

Glatte
Fraktale

NEUE MATERIALIEN

Wunderstoff
Nanozellulose



NEUE
6-TEILIGE
SERIE

Die Evolution des Menschen

Neues von unseren urzeitlichen Verwandten

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



Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin



Jeden Donnerstag neu!

- mehr als 40 Seiten News, Hintergründe, Kommentare und Bilder aus der Forschung
- im Abo nur € 0,77 pro Ausgabe
- jederzeit kündbar
- mit exklusivem Artikel aus **nature** in deutscher Übersetzung
- als PDF einfach über E-Mail oder per Link zu beziehen



Lernen Sie **Spektrum – Die Woche** kostenlos kennen:

www.spektrum.de/testwoche



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

Der wahre Wert der Wissenschaft

Am 12. November setzte das Landegerät Philae auf den Kometen 67P/Tschurjumow-Gerasimenko auf, nach einem zehnjährigen Flug mit der Raumsonde Rosetta. Es ist lange her, dass ein wissenschaftliches Großereignis derart prominent in den Schlagzeilen vertreten war und viele Menschen es unter Hochspannung live verfolgten. Bei den Älteren kamen gar Erinnerungen an die erste Mondlandung 1969 auf.

Woher rührt die plötzliche Wissenschaftsbegeisterung in unserer angeblich ach so abgebrühten, desinteressierten Gesellschaft? Schließlich kann man das Projekt ja auch als eine immense Verschwendung von Steuergeldern ohne jeden konkreten Nutzen anprangern. Im Zeitalter von Bologna-Reform, achtjährigem Gymnasium und scheinbar alles dominierenden wirtschaftlichen Interessen wirkt es tatsächlich wie ein Relikt aus der Vergangenheit, Forschung allein um ihrer selbst und neuer Erkenntnisse willen zu betreiben.

Schon in den 1960er Jahren definierte der amerikanische Physiker Alvin Weinberg in seiner Aufsatzsammlung »Reflections on Big Science« die Grundlagenforschung als jene Wissenschaft, »die durch keinerlei Begründung gerechtfertigt werden kann, mit Ausnahme der Tatsache, dass sie die menschliche Neugier befriedigt«. Dieser Antrieb scheint auch heute noch recht stark zu wirken, wie der Trubel um Rosetta und Philae zeigt.

Natürlich sind praktische Umsetzung und Anwendungen von Forschungsergebnissen wichtig. Die Raumfahrt hat hier ihren Teil zum Fortschritt beigetragen, von speziellen Materialien, die dann später auch für Alltagsgegenstände genutzt wurden, über die Weiterentwicklung der Fotovoltaik bis hin zu den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Satelliten wie für Kommunikation und GPS.

Dennoch bringt die aktuelle Kometenmission (siehe auch den Artikel ab S. 34) den meiner Meinung nach wahren Wert der Wissenschaft wieder ans Tageslicht, der auf einer ideelleren Ebene angesiedelt ist: Es geht darum, das große innere Bedürfnis des Menschen zu stillen, mehr zu erfahren über sich und die Welt, in der er lebt und der er ausgesetzt ist. Diese Neugier ist etwas, was uns gemeinsam mit anderen kognitiven Fähigkeiten auszeichnet im Vergleich zu allen übrigen bekannten Lebewesen.

Damit erweist sich Grundlagenforschung sogar als fast unausweichliche Folge der Evolution des Menschen – die wiederum ein weiteres großes Gebiet der Grundlagenforschung darstellt. Hier hat es in den letzten Jahren Überraschungen gehagelt; was noch vor der Jahrtausendwende als gesichert galt, haben neuere Funde von Vor- und Frühmenschen inzwischen gründlich auf den Kopf gestellt. Einen Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse bietet Ihnen unsere sechsteilige Serie, die in diesem Heft mit einem detaillierten Blick auf den immer unübersichtlicher werdenden Stammbaum des *Homo sapiens* beginnt (ab S. 22).

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Dana Kralisch von der Universität Jena ist davon überzeugt: Nanozellulose hat eine große Zukunft – als vielseitiges Biomaterial und Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen (ab S. 78).



Mit Hilfe gentechnischer Methoden versucht **William Powell** vom College of Environmental Science and Forestry der State University of New York der dem Untergang geweihten Amerikanischen Kastanie eine zweite Chance zu geben (ab S. 66).



Archäologische Herdstellen datiert die Geophysikerin **Elisabeth Schnepf** von der Montanuniversität Leoben anhand von deren magnetischen Besonderheiten (ab S. 54).

3 Editorial

6 Spektrogramm

Laserverdrillung erlaubt Datentransfer • Wikinger als fleißige Burgenbauer • Virus soll Steppenläufer ausrotten • Echoortung erfordert Körpergefühl • Radioteleskop zeigt sehr frühe Galaxien • Mensch klettert mit »Geckofüßen«

9 Bild des Monats

Magengeschwür in der Petrischale

10 Forschung aktuell

Modell des Universums
Täuschend echt simuliert!

Frühe Höhlenmalerei
Neudatierung asiatischer Felskunst irritiert Forscher

Wann wird Kupfer knapp?
2040 könnte der Förderhöhepunkt überschritten werden

Fields-Medaille für Manjul Bhargava
Vom Rubik-Würfel bis zu hyperelliptischen Kurven

SPRINGER'S EINWÜRFE
Der Forscher als Kinofigur
Sein Bild wird heller, bleibt aber immer noch verschwommen

34



NASA / JPL / CALTECH

44



VINCENT BORRELLI, SAÏD JABRANE, FRANCIS LAZARUS, DAMIEN ROHMER UND BORIS THIBERT

54



ELISABETH SCHNEPP / AUSSTELLUNGSHAUS KERAMIKUM FREDELSLOH

PHYSIK & ASTRONOMIE

► 34 **Jenseits von Neptun**

Erstmals treffen Sonden auf Himmelskörper aus einer kaum erforschten, eisigen Region außerhalb unserer Planeten: dem Kuipergürtel. Zu erwarten sind einmalige Einblicke in die Entstehungsgeschichte des Sonnensystems.

Michael D. Lemonick

SCHLICHTING!

42 **Kristalline Schönheiten**

Damit aus Wasser eine Schneeflocke werden kann, müssen verschiedene Wachstumsprinzipien ineinandergreifen.

H. Joachim Schlichting

MENSCH & KULTUR

► 44 **Glatte Fraktale**

Man kann ein Quadrat längentreu auf einen Torus abbilden – allerdings um den Preis unendlich vieler Verzerrungen. Jetzt ist es gelungen, das dabei entstehende neuartige geometrische Objekt zu visualisieren.

Vincent Borrelli, Francis Lazarus und Boris Thibert

► SERIE »ARCHÄOMETRIE« TEIL 3

54 **Produktionsdatum: siehe Magnetfeld**

Wo immer der Mensch hohe Temperaturen einsetzte, entstanden oft auch magnetische Minerale. Weil diese die Richtung des damaligen Erdmagnetfelds speicherten, können Archäologen sie nun zur Datierung nutzen.

Elisabeth Schnepf

62 **Met & Co. – Alkopops bei den Nordmännern**

Wie kann man etwas über die Trinksitten im Skandinavien des 1. Jahrtausends v. Chr. erfahren? Indem man Getränke Rückstände in Grabbeigaben chemisch analysiert.

Annine Fuchs



NEUE
6-TEILIGE
SERIE

► TITELTHEMA

Die Evolution des Menschen

22 Menschwerdung in neuem Licht

Entdeckungen der letzten Jahre stellen das Lehrbuchwissen zu unserer Herkunft in Frage.

Kate Wong

27 Unsere unübersichtliche Verwandtschaft

Der menschliche Stammbaum gleicht eher einem Busch. So lebten fast immer mehrere Homininenarten nebeneinander.

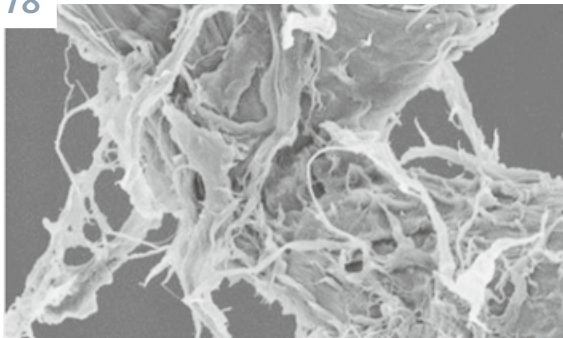
Bernard Wood

66



ANDY NEWHOUSE, SUNY COLLEGE OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND FORESTRY

78



EMPA, SCHWEIZ

ERDE & UMWELT

66 Die Auferstehung der Amerikanischen Kastanie

Ein eingeschleppter Pilz vernichtete einst riesige Kastanienwälder Nordamerikas. Nun könnten sie in absehbarer Zeit wieder entstehen – dank Gentechnik.

William Powell

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

72 Verbunden werden auch die Schwachen mächtig

Auch Kräfte, die längst nicht so stark sind wie echte chemische Bindungen, bestimmen das Verhalten von Molekülen.

Ronald Hoffmann

TECHNIK & COMPUTER

► 78 Nanozellulose – ein bakteriell erzeugtes Hochleistungspolymer

Ein nachhaltiges, bioverträgliches Material eignet sich wegen seiner einzigartigen Kombination von Eigenschaften für die unterschiedlichsten Zwecke: von Wundverbänden über Kosmetikartikel bis zu Chipkarten.

Dana Kralisch

85 Wissenschaft im Rückblick

Vom Platinboom zur künstlichen Erbsubstanz

86 Rezensionen

Alexander von Humboldt: Das graphische Gesamtwerk • *Timm Sigg*: Statistik-Formeln für Dummies • *Ben Moore*: Da draußen • *Michael Prestwich*: Von Karl dem Großen bis Gutenberg • *Günter Jaritz*: Seltene Nutztiere der Alpen u. a.

94 Leserbrief/Impressum

96 Futur III

Erica L. Satifka: »Sei nützlich!«

98 Vorschau

Titelmotiv: Katy Wiedemann

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

PHYSIK

Verdrehter Laserstrahl übermittle Daten

Forscher haben Porträts berühmter Personen mit einem speziellen Laserstrahl über eine Distanz von drei Kilometern gesendet – durch die turbulente Luft über den Dächern Wiens. Bislang funktionierte die Methode nur unter Laborbedingungen und auf kurzen Strecken.

Ähnlich wie Radio- lassen sich auch Lichtwellen nutzen, um Informationen zu übertragen. Verschiedene Wellenlängen dienen dabei als unterschiedliche Kanäle. Bei einem Laser ist die Wellenlänge konstant, dennoch kann er auf mehreren Kanälen senden, indem er Informationen in unterschiedlichen Schwingungsrichtungen (Polarisationsebenen) transportiert. Da sich die Polarisationsebene von Licht beim Durchgang durch Luft kaum ändert, wurden mit diesem Verfahren bereits Daten über mehrere hundert Kilometer gesendet. Aller-



NEW JOURNAL OF PHYSICS / IOP PUBLISHING: KRENN, M. ET AL., NEW J. PHYS. 16, 113028, 2014, FIG. 1



KRENN, M. ET AL., NEW J. PHYS. 16, 113028, 2014, FIG. 3A

Mit speziellen Lasern übermitteln Forscher die Daten von Porträtbildern (links) quer durch Wien (oben).

dings ist die Zahl der unterscheidbaren Polarisationszustände begrenzt und somit auch die Menge der gleichzeitig transportierbaren Information.

Forscher um Anton Zeilinger von der Universität Wien haben daher ein neues Verfahren der Informationsübertragung entwickelt. Sie geben der Wellenfront des Lasers quasi einen

Drehimpuls mit, so dass die Schwingungsebene der Lichtteilchen rotiert. Je nach Stärke dieser Drehung wird der Laserstrahl mehr oder weniger intensiv »verdrillt«. Innerhalb ein und desselben Strahls können beliebig viele »Drehimpulse« transportiert werden, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Die praktisch erreichbaren Übertragungsraten der Methode betragen in Glasfasern derzeit bis zu 2,5 Terabit pro Sekunde – deutlich mehr als beim Polarisationsverfahren.

Zeilingers Team nutzte 16 »Drehimpuls-Kanäle« und übermittelte auf jedem davon einen definierten Grauwert, der bestimmten Bildpunkten eines Porträts zugeordnet war. Ein Computerprogramm setzte die Pixel wieder zusammen. Das Ziel der Forscher lautet, mittels dieser Methode mit Satelliten zu kommunizieren.

New J. Phys. 16, 113028, 2014



Mehr Aktualität!

Auf Spektrum.de berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

GESCHICHTE

Wikingen waren fleißige Burgenbauer

Eine verfallene Ringburg nahe der dänischen Stadt Køge stammt aus der Wikingerzeit, haben Datierungen jetzt ergeben. Bislang hatten Forscher sie in der römischen Eisenzeit angesiedelt, also für viel älter gehalten. Die Borgring genannte Anlage stellte offenbar ein Zwillingbauwerk der berühmten Trelleborg-Festung dar. Die Burg liegt an einer Meeresbucht und befand sich im 10. Jahrhundert an einem Verkehrsknotenpunkt. Sie war durch Gräben geschützt, hatte zirka 150 Meter Durchmesser und besaß zwölf Meter breite Wälle, die von einer Palisade gekrönt waren. Vier Tore führten in ihr Inneres.

Als Archäologen von der Universität Aarhus (Dänemark) die Holzreste aus Borgring mit der Radiokohlenstoffmethode datierten, kamen sie auf die Zeit zwischen 893 und 1017. Die

Wissenschaftler halten es für möglich, dass der dänische König und Wikingerführer Harald Blauzahn die Burg in Auftrag gab. Er lebte von zirka 910 bis 987 und regierte mehrere Jahrzehnte.

Borgring ähnelt im Aufbau den Wehranlagen Fyrkat, Aggersborg, Trelleborg und Nonnebaken – allesamt in Dänemark gelegen und nach derzeitigem Kenntnisstand im 10. Jahrhundert errichtet. Offenbar betrieben die Dänen damals ein groß angelegtes Burgenbauprogramm. Möglicherweise diente Borgring einst als Herrschersitz Blauzahns.

Um das Bauwerk tobten offenbar Kämpfe: Wie Archäologen bei den Ausgrabungen feststellten, wurden mindestens zwei Tore durch Brand zerstört.

Pressemitteilung der Universität Aarhus, 18. November 2014

LANDWIRTSCHAFT

Den Steppenläufern geht es an den Kragen



Fehlt bloß noch der Revolverheld: Steppenläufer sorgen in Westernfilmen für zünftige Atmosphäre – im wirklichen Leben aber sind sie eine Plage.

JEZ ARNOID / CC-BY-SA-2.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSING/SIBY-SA-2.0/LEGALCODE)

Sie wurden zur Standardkulisse von Wildwestfilmen: vertrocknete Gewächse, die im Wind durch staubige Straßen und einsame Gegenden rollen. Diese Steppenläufer, auf Englisch »tumbleweed« genannt, sind in den USA eine große Plage. Sie verbreiten sich unkontrolliert, trocknen die Böden aus, verstopfen Gullys und Kanäle, bleiben massenhaft an Zäunen und in Getreidefeldern hängen.

Wie die Branchenzeitschrift »Western Farm Press« und das Fachmagazin »Science« berichten, plant das US-Landwirtschaftsministerium, die Pflanzen auszurotten. Zwei Virenstämme, die aus Russland und Ungarn importiert wurden, sollen den Gewächsen den Garaus machen. Die

Viren seien an dutzenden Pflanzenarten auf ihre Spezifität getestet worden, und derzeit ersuche das Ministerium um Erlaubnis, sie freizusetzen.

Einer der bekanntesten Steppenläufer ist das Ruthenische Salzkraut (*Kali tragus*). Vermeintlich typisch Wildwest stammt es eigentlich aus Europa und Asien, von wo es in den 1870er Jahren nach Nordamerika eingeschleppt wurde. Im ursprünglichen Verbreitungsgebiet von *Kali tragus* kursieren natürliche Viren, die auf die Pflanzen spezialisiert sind. Aus entsprechend befallenen Gewächsen haben Forscher die Viren extrahiert, die jetzt freigesetzt werden sollen.

Western Farm Press, 5. November 2014

MEDIZIN

Echoortung erfordert gutes Körpergefühl

Wenn Blinde sich mit Schnalzlauten orientieren, benötigen sie dafür nicht nur ihren Hör-, sondern auch ihren Gleichgewichtssinn; sie müssen ein Empfinden für die Lage und die Bewegungen ihres Körpers im Raum haben. Das berichten Forscher um Lutz Wiegrebe von der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Bei der Methode des so genannten Klicksonars geben Blinde Geräusche von sich – etwa Zungenschnalzer – und lauschen deren Echos. Der zurückkommende Schall vermittelt ihnen

einen Eindruck von der Umgebung und lässt sie Hindernisse erkennen. Manche können damit sogar Rad fahren.

Wiegrebe und sein Team trainierten normal sehende Versuchsteilnehmer in diesem Verfahren. Anschließend sollten die Probanden sich damit in einem virtuellen Korridor zurechtfinden. Je nach Ort und Orientierung innerhalb des Korridors spielte ihnen ein Computersystem die passenden Echos vor, sobald sie Schnalzlauten von sich gaben. Die Probanden sollten sich dann zur Längsachse des virtuellen

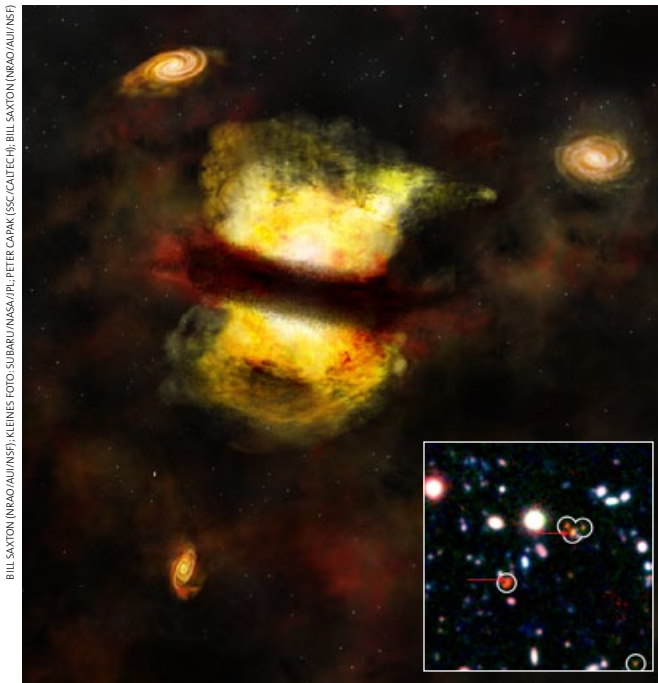
Raums ausrichten – entweder indem sie sich selbst bewegten oder den Korridor per Joystick drehten.

Durften die Teilnehmer lediglich den Joystick betätigen, versagte ihre Navigationsfähigkeit. Erst eigene Kopf- und Körperbewegungen ermöglichten es ihnen, sich korrekt auszurichten. Die Methode des Klicksonars fordert offenbar nicht nur das Gehör, sondern auch das Gleichgewichts- und Körperempfinden, schließen die Forscher aus den Ergebnissen.

R. Soc. Open Sci, 1:140185, 2014

ASTRONOMIE

Proto-Galaxienhaufen im frühen Universum



BILL SAXTON (IRAO/JAUNSP); KLEINES FOTO: SUBARU/MASA/JPL; PETER CAPAK (SSC/GAITECH); BILL SAXTON (IRAO/JAUNSP)

Die Galaxie AzTEC-3 (großes Bild: Illustration) befindet sich in Nachbarschaft zu weiteren Galaxien (kleines Bild, umkreist). Zusammen bilden sie wohl einen Proto-Galaxienhaufen. Die Pfeile markieren die mit ALMA untersuchten Objekte.

Astronomen um Dominik Riechers von der Cornell University (USA) haben mit dem Radioobservatorium ALMA in Chile die Galaxie AzTEC-3 untersucht. Deren Licht benötigt 12,6 Milliarden Jahre, um uns zu erreichen – wir sehen sie deshalb so, wie sie rund eine Milliarde Jahre nach dem Urknall aussah.

AzTEC-3 zählt zu den so genannten Submillimeter-Galaxien, die am hellsten bei Wellenlängen unterhalb eines Millimeters leuchten. In ihr entstehen pro Zeitintervall rund tausendmal so viele neue Sterne wie in der Milchstraße. Das Licht ihrer Sonnen wird von interstellarem Staub absorbiert und im Infrarotbereich wieder abgestrahlt. Die kosmische Expansion dehnt die Wellenlänge der Strahlung auf dem Weg zu uns, so dass Astronomen die Galaxie im Submillimeterbereich beobachten.

Die Messdaten lassen erkennen, dass wir AzTEC-3 relativ kurz nach der Verschmelzung mit einer anderen Galaxie sehen. Darüber hinaus entdeckten die Forscher drei weitere Galaxien in der kosmischen Nachbarschaft von AzTEC-3, die ähnliche Rotverschiebungen aufweisen und damit vergleichbare Entfernungen zu uns. Vermutlich gehören alle vier Galaxien, obwohl noch nicht gravitativ aneinandergebunden, zu einem Komplex. Sie könnten einen entstehenden Galaxienhaufen im Frühstadium präsentieren.

Astrophys. J. 796:2, 2014

MATERIALFORSCHUNG

Klettern mit künstlichen Geckofüßen

Manche Gecko-Arten haben stark haftende Füße und können damit mühelos Wände hochklettern und sogar kopfüber an Glasscheiben entlanglaufen. Ihre Zehen sind mit Milliarden feinsten Härchen bedeckt, die zusammen eine riesige Oberfläche

aufweisen. Setzt das Tier den Fuß auf, wirken anziehende Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Härchen und dem Untergrund, die den Gecko »kleben« lassen. Durch Anwinkeln des Fußes kann sich das Tier wieder lösen.

Wissenschaftler um Elliot Hawkes von der Stanford University (USA) haben ein Material entwickelt, das auch Menschen diese Fähigkeit verleiht. Sie rüsten erwachsene Probanden mit zwei handtellergroßen Greifern aus, die mit je 24 Kacheln bedeckt sind. Jede Kachel ist mit zahlreichen

nano- bis mikrometergroßen Keilen überzogen – analog den Härchen des Geckofußes – und über eine Art Sehne mit dem Greifer verbunden. Die Sehne wird unter Belastung weich und versteift bei Entlastung wieder, was dafür sorgt, dass sich das am Greifer hängende Gewicht gleichmäßig auf alle Kacheln verteilt – ein als »degressive Lastenverteilung« bezeichnetes Prinzip.

Es erlaubt dem Kletterer, einen Greifer aufzusetzen, sich über eine Fußstütze an ihn zu hängen, sodann den anderen Greifer abzulösen und nach oben zu versetzen, um sich anschließend an diesen zu hängen und so weiter. Allerdings haftet das Material bislang nur auf Glasoberflächen.

J. Roy. Soc. Interface 12:20140675, 2014

Einer Echse gleich: Der Kletterer tritt in Fußstützen, die an geckofußähnlichen Greifern hängen. Durch Versetzen der Greifer klimmt er am Glas empor.

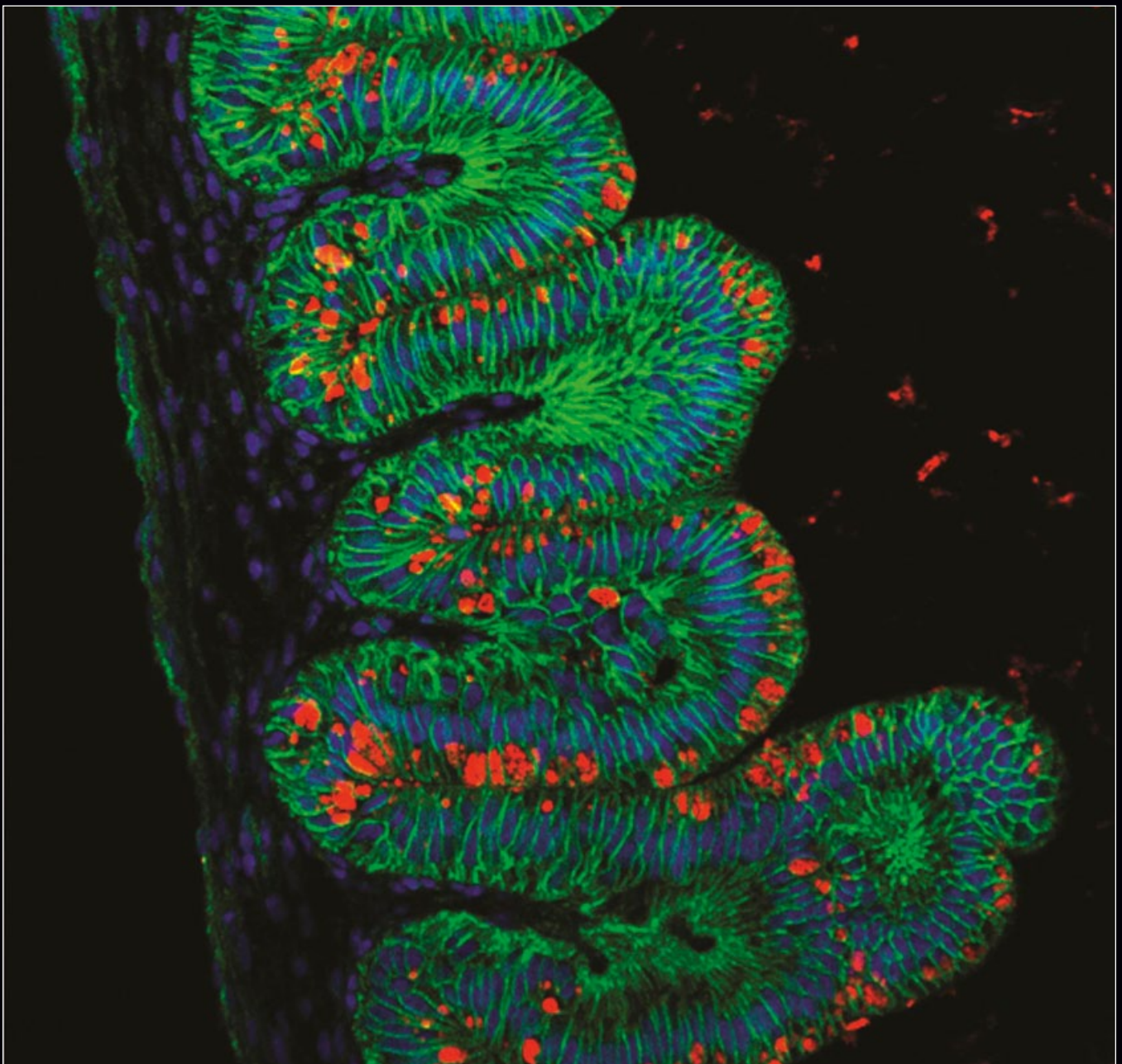
ELLIOT W. HAWKES, ERIC V. EASON, DAVID L. CHRISTENSEN, MARK R. CUTKOSKY



MAGEN IN DER PETRISCHALE

Aus menschlichen pluripotenten Stammzellen züchteten US-amerikanische Forscher im Labor die Miniaturversion eines Magens. Die nur wenige Millimeter große dreidimensionale Struktur ist ähnlich komplex wie sein natürliches Vorbild, wie diese Mikroskopaufnahme mit unterschiedlich eingefärbten, verschiedenen Zelltypen zeigt. Das Gewebe scheint auch ähnlich zu reagieren: Die Wissenschaftler infizierten es etwa mit Bakterien, die beim Menschen Magengeschwüre und Tumoren verursachen, und entdeckten in der Zellkultur analoge Veränderungen.

Nature, 2014
[10.1038/nature13863](https://doi.org/10.1038/nature13863)



NASA / ESA / STSCL, XDF, ILLINGWORTH ET AL. 2013 APIS 209 6

ILLUSTRIS SIMULATION



KOSMOLOGIE

Ein fast perfektes Modell vom Universum

Supercomputer errechnen eine Welt, die der echten zum Verwechseln ähnlich sieht und das Standardmodell der Kosmologie zu bestätigen scheint.

VON JAN HATTENBACH

Das Erstaunlichste am Universum ist, dass man es verstehen kann, soll Albert Einstein einmal gesagt haben. In der Tat sieht das Standardmodell der Kosmologie recht übersichtlich aus. Es basiert auf nur sechs Parametern – darunter die Energie- und Materiedichte und der Hubble-Parameter –, die alle Energie und Materie beschreiben, die sich im Universum befinden, und darüber hinaus seine seit dem Urknall andauernde Expansion. Aber woher wissen wir, ob das Modell stimmt? Ein Team um Mark Vogelsberger vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) und Volker Springel vom Heidelberg Institut für Theoretische Studien (HITS) hat das nun mit Hilfe einer Simulation überprüft. An den beiden Superrechnern Curie und SuperMUC – der eine steht in einem Rechenzentrum bei Paris, der andere bei München – erzeugten sie gemäß den Vorgaben des Standardmodells ein künstliches Universum. Illustris heißt das Vorhaben.

Und tatsächlich ist ihr simuliertes Universum auf den ersten Blick vom echten nicht zu unterscheiden (*Nature* 509, S. 177–182, 2014).

Das ist eine schlechte Nachricht für Gegner des Standardmodells. Diese stören sich zum Beispiel an der Behauptung, dass unser Universum zu nicht weniger als 95 Prozent aus Dunkler Materie und Dunkler Energie bestehen soll – die beide bislang noch reichlich mysteriös erscheinen –, während normale Atome und Elementarteilchen die restlichen fünf Prozent ausmachen, mengenmäßig also nur eine Nebenrolle spielen. Glaubt man dem Modell jedoch – und dafür gibt es immer überzeugendere Gründe –, dann kommen wir an den dunklen Zutaten nicht vorbei. Demzufolge ist Dunkle Materie mittels der von ihr ausgehenden Schwerkraft für die Entstehung der Galaxien verantwortlich, während die Dunkle Energie durch ihre antigravitative Wirkung den Kosmos immer

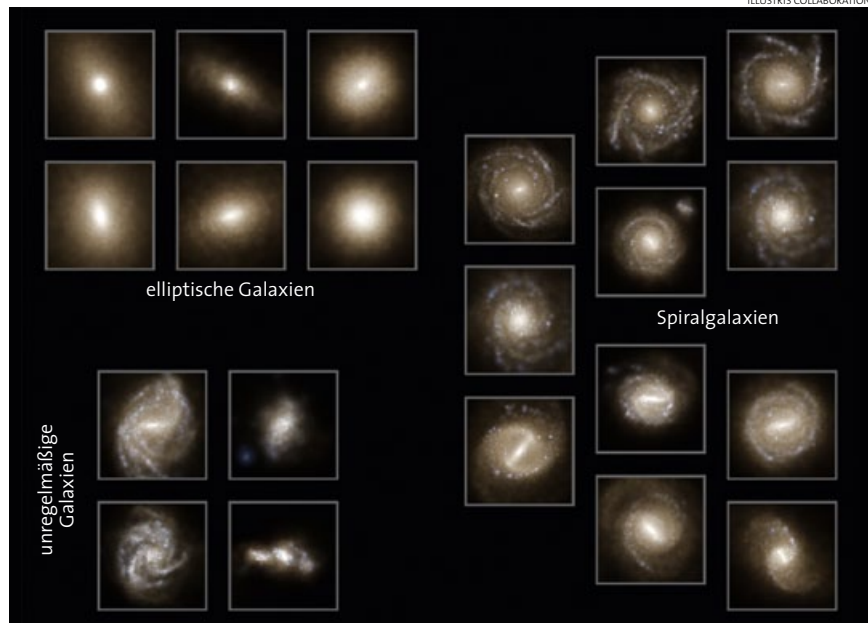
schneller auseinandertreibt. Die Welt, wie wir sie kennen, würde ohne diese Phänomene nicht existieren.

Was hinter ihnen genau steckt, ist für den Illustris-Kosmos aber ein unwichtiges Detail. Die Forscher fütterten ihre Algorithmen einfach mit den vom Standardmodell vorhergesagten Zutaten, ohne die Inhaltsstoffe genauer zu kennen. Mit Erfolg: »Illustris zeigt, dass das Standardmodell, wenn man es mit gängigen Annahmen zur Galaxienentstehung kombiniert, ein Universum hervorbringt, das dem beobachteten verblüffend nahekommt«, sagt Volker Springel.

Es ist nicht die erste Simulation, die solch ein Ergebnis hervorbringt. Auch frühere im Computer erzeugte Universen bestätigten im Großen und Ganzen die Vorhersagen des Standardmodells. Zu den aufwändigsten zählen die Millennium-Simulationen: Unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik hatten Wissenschaftler im

Das berühmte Ultra-Deep-Field (links außen) zeigt Unmengen ferner Galaxien, die das Satellitenteleskop Hubble bei einem seiner bisher tiefsten Blicke ins Universum sah. Das Bild rechts daneben zeigt eine ganz ähnliche Situation, ist aber aus der Illustris-Simulation entstanden.

Wie auch im realen Universum haben sich in der Illustris-Simulation (rechts) elliptische, spiralförmige und unregelmäßig geformte Galaxien gebildet. Um diese Vielfalt zu erklären, müssen die Forscher auch die im Universum allgegenwärtigen Wasserstoffwolken und die elektromagnetischen Kräfte berücksichtigen, die auf die Gasatome wirken.



vergangenen Jahrzehnt die Entwicklung von jeweils rund 20 Millionen Galaxien nachgestellt. Wie im echten Universum verteilen sich diese Galaxien im Lauf der Evolution des Modellkosmos nicht regellos, sondern ordnen sich unter dem Einfluss der Dunklen Materie zu einem gewaltigen kosmischen Netzwerk aus »Knoten« und »Fäden«, in denen die Galaxien besonders dicht stehen und zwischen denen sich riesige Leerräume auftun.

Die Erschaffung künstlicher Universen im Computer ist ein wichtiger Pfeiler der Astrophysik. Wissenschaftler, die das All mit Teleskopen untersuchen, sehen nur das fertige Endprodukt und müssen mühevoll sein »Kochrezept« rekonstruieren. Computersimulationen erlauben es ihnen dagegen, das Rezept nachzukochen: Man nehme die Grundzutaten des Standardmodells, rühre sie zu einem virtuellem Universum zusammen, setze den Urknall in Gang und warte. Glücklicherweise nicht 13 Milliarden Jahre lang: Die beiden Großrechner im Dienst von Illustris waren netto gerade einmal rund 80 Tage beschäftigt.

Anschließend vergleicht man das Ergebnis mit dem, was Astronomen durch ihre Teleskope erblicken. Natürlich ist keine 1:1-Kopie zu erwarten, vielmehr sind es vor allem statistische Eigenschaften, die das Original mit der Simu-

lation teilt: etwa die Materiedichte, die räumliche Verteilung von Galaxien und auch deren Größenverteilung. Wenn Eigenschaften wie diese übereinstimmen, kann das Rezept – also das Standardmodell – nicht allzu falsch sein, davon sind die Forscher überzeugt.

Noch nicht realistisch genug?

Frühere Studien offenbarten in einigen Details allerdings auch Abweichungen von der Realität. So verteilten sich die Zwerggalaxien, welche die Mehrheit der Galaxien im Kosmos stellen, in den simulierten Universen anders als im echten Kosmos. Manche Forscher sahen darin Anzeichen für ein zumindest teilweise Versagen des Standardmodells. Andere vermuteten hingegen schlicht, dass die Rechenmodelle noch nicht realistisch genug waren. Bislang verzichtete man nämlich meist auf die Simulation der fünf Prozent »normaler« Materie, aus der Sterne, Planeten und auch Spektrum-Leser gemacht sind und die im Universum vor allem in Form von Wasserstoff- und Heliumgas vorkommen.

Während sich Dunkle Materie ziemlich langweilig verhält, weil sie fast ausschließlich auf Gravitation reagiert, machen Gase den Forschern das Leben schwer, weil sie auch elektromagnetischen Kräften ausgesetzt sind. Außer-

dem kommt hinzu, dass die Wechselwirkungen von Gasen auf extrem unterschiedlichen Größenskalen stattfinden: Während ein Stern in einem Gebiet von wenigen Lichtjahren Durchmesser geboren wird, entfaltet sich die Dynamik großer Galaxienhaufen über Distanzen von hunderten Millionen Lichtjahren hinweg. Das Verhalten der Gase über den gesamten künstlichen Kosmos hinweg zu simulieren, bringt selbst Superrechner schnell an ihre Grenzen.

Trotzdem versuchen die Forscher das Problem zu knacken. Der amerikanische Astronom Edwin Hubble hatte Anfang des 20. Jahrhunderts die Formen von Galaxien – runde, elliptische, spiralförmige und unregelmäßig geformte Welteninseln – in sein berühmtes Stimmgabeldiagramm einsortiert. Mit der Dunklen Materie allein lässt sich diese Vielfalt nicht erklären, sie verdankt sich auch den komplexen Wechselwirkungen der Gasatome. Als erste Simulation ihrer Größenordnung hatte Illustris diesen Effekt auf der Rechnung – und konnte so erstmals die Formen in Hubbles Diagramm reproduzieren.

»Es ist bemerkenswert, dass die Anfangsbedingungen des Universums, die wir kurz nach dem Urknall beobachten, tatsächlich Galaxien von der richtigen Größe und Gestalt hervorbringen«, be-

richtet MIT-Forscher Vogelsberger. Gibt man dem Modell also Messdaten vor, die man aus der Untersuchung des jungen Kosmos gewonnen hat, gelangt es zu den erhofften Ergebnissen. Auch die Verteilung der Zwerggalaxien stimmt nun, und selbst den Metallanteil von Sternen – Astronomen zählen alle Atome, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium, zu den »Metallen« – errechnet Illustris richtig.

Die Rechnung hat es allerdings in sich. Das Illustris-Universum ist in über 18 Milliarden diskrete Raumbereiche zerstückelt, zehnmal mehr als in bisherigen Simulationen. Alle relevanten physikalischen Prozesse, die sich im Zeitraum von 13 Milliarden Jahren darin abspielten, haben die Forscher nachgebildet. In der »Ursuppe« aus Wasserstoff, Heliumgas und Dunkler Materie formten sich durch die Schwerkraft zunächst Verklumpungen, die Urzellen der Galaxien. Hinzu kamen Strahlungsprozesse, hydrodynamische Stoßwellen und turbulente Strömungen, wie sie bei der Entstehung neuer Sterne ebenso auftreten wie bei der Explosion massereicher Sonnen als Supernovae. Bisherige Simulationen bildeten diese Prozesse höchstens für einzelne Sternsysteme oder kleine Galaxiengruppen ab; Illustris liefert hingegen eine realistische Darstellung der Entwicklung von über 40 000 Galaxien. Auch super-

schwere Schwarze Löcher, die zentralen »Kraftwerke« besonders großer Galaxien, waren Teil der Simulation, die mit einem Speicherbedarf von mehr als 25 Terabyte und einem Datenvolumen von 200 Terabyte neue Rekordmarken setzte.

Grenzen der Realitätstreue

Dank Illustris steht das Standardmodell also wieder glänzend da. Es macht seine Sache einfach zu gut: Lässt man beispielsweise die Dunkle Materie bei der Berechnung weg, ähnelt das Modelluniversum dem echten kaum. Das letzte Wort ist dennoch nicht gesprochen, betonen die Forscher, denn auch die Realitätstreue von Illustris hat Grenzen. Zum einen liegt die Kantenlänge des simulierten Volumens bei »nur« 350 Millionen Lichtjahren und ist damit um rund ein Viertel kleiner als die Vorgängersimulation Millennium-II. Das ist zwar immer noch groß genug, um das kosmische Netzwerk erkennbar werden zu lassen, aber zu klein, um seltene Objekte wie etwa superschwere Schwarze Löcher im frühen Universum zu simulieren.

Auch nach unten ist die Größenskala begrenzt: Hydrodynamische Prozesse simulierte Illustris nur bis zu einer räumlichen Auflösung von 150 Lichtjahren, während typische Abläufe bei der Sternentstehung auf wesentlich kleineren Skalen stattfinden. Erschwe-

rend kommt hinzu, dass unser Wissen über sie ohnehin noch lückenhaft ist.

Das Illustris-Universum ist also längst nicht perfekt. »Probleme gibt es etwa beim mittleren Alter der Sterne in Zwerggalaxien«, sagt Springel. Illustris zufolge müssten die Objekte älter sein, als wir dies beobachten. »Das hat wahrscheinlich astrophysikalische Ursachen«, so der HITS-Forscher. »Unser Modell der Galaxienentstehung vereinfacht eben viele Prozesse zu stark.« Weil es ohne solche Vereinfachungen auch in absehbarer Zeit nicht gehen wird, gehen die Wissenschaftler einen anderen Weg und kombinieren großräumige Simulationen mit detaillierten, auf einzelne Galaxien beschränkten Untersuchungen. Dafür haben sie unter anderem ein Modell entwickelt, das die Magnetfelder einer einzelnen Galaxie – ein wichtiges Detail, das Illustris nicht berücksichtigt – richtig vorhersagt (*The Astrophysical Journal Letters* 783, L20, 2014).

Die Entwicklung geht also weiter. Irrendwann, so die Hoffnung, könnten die simulierten Universen sogar so genau sein, dass sie Hinweise darauf geben, woraus ihre wesentlichen Zutaten – Dunkle Materie und Dunkle Energie – denn nun eigentlich bestehen.

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

URGESCHICHTE

Frühe Höhlenkunst in Südostasien

Jüngste Untersuchungen an prähistorischen Handabdrücken und Felsbildern aus Indonesien datieren diese Höhlenmalerei auf ein Alter von mindestens 39 900 Jahren, also in die Zeit der ältesten Malereien Europas.

VON WIL ROEBROEKS

Die Maros-Region im indonesischen Sulawesi ist ein Kalksteingebiet mit zahlreichen Karsthöhlen. Schon in den 1950er Jahren wurden darin Malereien aus zwei verschiedenen Phasen entdeckt. Die als jünger eingestuftten Darstellungen weisen stilistische Merkmale der austronesischen Kultur auf, dürften

also in deren Expansionsphase vor wenigen tausend Jahre fallen. Bilder einer älteren Stufe – zumeist aufgesprühte Handumrisse und einige wenige Tierdarstellungen – sollten nach Einschätzung von Forschern auf Grund der schnellen Erosion in der tropischen Umgebung vor maximal 10 000 Jahren entstanden sein.

Nun hat Maxime Aubert vom Centre of Archaeological Science der University of Wollongong in Australien in Kooperation mit australischen und indonesischen Forschern einen Teil der Höhlenkunst mit der Uran-Thorium-Methode neu datiert (*Nature* 514, S. 223–227, 2014). Demnach wäre sie schon vor

rund 40 000 Jahren aufgekomen – zur selben Zeit wie die ersten altsteinzeitlichen Höhlenmalereien in Europa.

Für ihre Studie entnahmen Aubert und seine Kollegen winzige Proben jenes Kalzits, das sich auf den Bildern im Lauf der Zeit aus Wasser abgelagert hat. In geringen Spuren gelangten so auch wasserlösliche Uranisotope in diese Schichten, deren radioaktiver Zerfall in Thorium die Ermittlung eines minimalen Alters ermöglicht: Zwangsläufig müssen unter den Schichten liegende Bilder vor den Ablagerungen entstanden sein.

Die fraglichen Ablagerungen sind nie dicker als zehn Millimeter. Im Labor hat man sie in Schichten von weniger als einen Millimeter unterteilt. Mitunter reichte eine Probe sogar unter den pigmenttragenden Bereich, dem in solchen Fällen sogar ein Höchstalter zugeordnet werden kann.

Erwachte die Kunst vor etwa 40 000 Jahren?

Die Ergebnisse waren erstaunlich. Ein Handumriss war vor mindestens 39 900 Jahren aufgetragen worden; ein Hirscheber (siehe Bild rechts) vor mindestens 35 400 Jahren. In Nordspanien wurden an felsbilderüberdeckenden Kalzitablagerungen aus elf Höhlen ähnliche Daten bestimmt. So gilt eine der Dutzende roten Scheiben in der El-Castillo-Höhle mit 40 800 Jahren als frühestes Zeugnis künstlerischen Denkens, einer der 40 Handumrisse wurde auf mindestens 37 300 Jahre datiert. Eine weitere Studie von 2014 berichtet von einem abstrakten Muster, das vor 39 000 Jahren in den Fels der Gorham-Höhle auf Gibraltar eingeritzt wurde. Felsbrocken mit roten Farbspuren aus dem italienischen Ort Fumane deuten Forscher dahingehend, dass dort vor 36 000 bis 41 000 Jahren Künstler am Werk waren.

In Australien finden sich ebenfalls zahlreiche Felsbildnisse. Zwar ist keines davon älter als 30 000 Jahre, doch fand man in Höhlen im australischen Arnhemland Hinweise auf eine Nutzung des darin vorkommenden roten Ockers vor 50 000 Jahren. Auch wenn die mit diesem Farbstoff gemalten Bilder nicht



Vor 40 000 Jahren und früher siedelte *Homo sapiens* in Ozeanien (weiße Punkte). Ein um gut 60 Meter niedrigerer Meeresspiegel (schattierte Küstenbereiche) erleichterte die Kolonisierung. Ebenfalls vor 40 000 Jahren, so die jüngste Uran-Thorium-Datierung, entstanden Felsbilder, wie das hier gezeigte, in den Maros-Höhlen in Sulawesi (Indonesien). Sie wären damit so alt wie die ältesten europäischen Höhlenmalereien.



mehr erhalten sein mögen, könnte auch in Australien die künstlerische Tätigkeit in die Zeit der frühesten Besiedlung durch den *Homo sapiens* zurückreichen.

Somit scheint die Höhlenmalerei vor 40 000 Jahren etwa zeitgleich in Europa und Asien aufgekomen zu sein –

trotz einer Distanz von Tausenden von Kilometern. Eine Erklärung für dieses Phänomen gibt es noch nicht. Möglich ist eine zweifache, voneinander unabhängige Erfindung, die Höhlenmalerei könnte aber auch bereits Bestandteil des kulturellen Repertoires des modernen Menschen gewesen sein, bevor er

sich in Asien vor über 50 000 Jahren und in Europa 10 000 Jahre später ausbreitete. Aus der Zeit vor dieser Expansion hingegen ist keine figurative Höhlenkunst bekannt – weder von früheren Vertretern des *Homo sapiens* noch von seinen Zeitgenossen. Das gilt sowohl für den Neandertaler in Europa und im westliche Asien als auch für den damals in Südostasien weit verbreiteten *Homo erectus*, der beispielsweise auf Java be-

eindruckende Zeugnisse seiner Kultur hinterlassen hat.

Weil die Datierungsmethode Auberts und seiner Kollegen mit geringen Probenmengen auskommt, könnte sie helfen, die Entwicklung künstlerischer Kreativität zu erhellen. So wurden auf Borneo Höhlenbildnisse entdeckt, die den Maros-Malereien auffällig ähneln. Eine Datierung steht noch aus. In jedem Fall unterstreichen die Studien zur rechten

Zeit die kulturhistorische Bedeutung des Maros-Gebiets – es ist akut vom industriellen Kalksteinabbau bedroht.

Der Prähistoriker **Wil Roebroeks** lehrt an der Faculteit Archeologie, Human Origins der Universiteit Leiden (Holland).

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 514, S. 179 – 180, 9. Oktober 2014

ROHSTOFFE

Wann wird Kupfer knapp?

Das für unsere technische Infrastruktur unverzichtbare Kupfer wird noch für weit mehr als 100 Jahre ausreichen, heißt es. Doch australische Forscher warnen: Schon etwa 2040 wird der Höhepunkt der Förderung überschritten.

VON RICHARD A. KERR

Kabel, Drähte und Kontakte aus Kupfer sind die wichtigsten Mittel, um elektrischen Strom weiterzuleiten. Ein deutsches Mittelklasseauto zum Beispiel enthält heutzutage durchschnittlich 25 Kilogramm davon. Zudem leitet das Metall Wärme, wird in Infrarotlasern für Spiegel verwendet und kommt im Baugewerbe zum Einsatz. Rohstoffexperten der University of Technology (UTS) in Sydney warnen nun davor, dass das Maximum der Förderung (englisch »peak«) schon in den nächsten 30 bis 40 Jahren erreicht sein wird.

Seit Mitte des 18. Jahrhunderts wächst der Kupferbedarf exponentiell; so waren es im Jahr 2012 insgesamt 17 Millionen Tonnen. Einbrüche gab es nur während der Weltkriege und bei Wirtschaftskrisen. Das ist um so eindrucksvoller, als der Kupfergehalt des abgebauten Erzes stark gesunken ist. Wie der Geologe Gavin Mudd von der Monash University in Clayton (Australien) 2013 zeigte, lag er bis Ende des 19. Jahrhunderts noch bei 10 bis 20 Prozent und ging dann auf zwei bis drei Prozent zurück, als die ertragsreichsten Minen erschöpft waren. Seit Mitte der 1990er Jahre ist der Metallanteil auf knapp un-

ter einem Prozent gesunken, mit anhaltend fallender Tendenz.

Obwohl also immer größere Gesteinsmengen aus kilometertiefen Tagebaugruben gefördert werden mussten, um den Bedarf zu decken, sank der Kupferpreis im Lauf des 20. Jahrhunderts und stieg erst 2005 wieder an, als China verstärkt Rohstoffe einkaufte. Mehrere Faktoren haben diesen Preisverfall vorangetrieben. So fanden Geologen einen neuen Lagerstättentyp: magmatische Tiefengesteine mit Kupferanteilen, so genanntes porphyrisches Kupfererz. Laut Richard Schodde von der australischen Firma MinEx Consulting werden diese neuen Lagerstätten schneller entdeckt, als sie sich ausbeuten lassen. Inzwischen deckt porphyrisches Kupfererz den größten Teil der weltweiten Förderung.

Des Weiteren gab es neue technische Entwicklungen, die Abbau und Verarbeitung billiger machen. So bewegen immer größere Bergbaumaschinen immer mehr Erz, während Chemieingenieure Prozesse wie die Haldenlaugung entwickelt haben, um auch geringe Kupferanteile günstig zu extrahieren.

Technologieoptimisten gehen davon aus, dass diese Entwicklung weitergeht.

Der Rohstoffökonom John Tilton, emeritierter Forschungsprofessor an der Colorado School of Mines in Golden, merkt dazu an, dass neue und bessere Technologien auch früher schon Lösungen boten, wenn das Metall knapp wurde. Daher erwartet er das Fördermaximum erst in ferner Zukunft, so dass noch genug Zeit bleibt, Strategien für das Recycling und Ersatzmaterialien zu entwickeln.

Widersprüchliche Prognosen

Eine 2013 veröffentlichte Studie des Teams von Jane Hammarstrom vom U.S. Geological Survey (USGS) gibt ihm Recht. Mit der derzeit vorhandenen Technologie beträgt demnach die Menge an wirtschaftlich förderbarem Kupfer, sei es bereits bekanntes oder mutmaßlich noch zu entdecken, 3,1 Milliarden Tonnen, darunter 2,2 Milliarden Tonnen porphyrisches Kupfer. Vorausgesetzt, die Förderraten blieben so wie derzeit, reichte das für 125 Jahre.

Steve Mohr, Experte für Computermodellierung an der University of Technology (UTS) in Sydney (Australien), widersprach den Optimisten schon 2010. Für seine Doktorarbeit hatte er ein Prognosemodell für die Förderung mineralischer Rohstoffe entwickelt, das

auch die zu erwartende Nachfrage berücksichtigt. Er orientierte sich dabei an der umstrittenen Hubbert-Kurve, die 1956 einen Peak der Ölförderung vorhersagte.

Solche Prognosen sind freilich immer mit Unsicherheiten behaftet. Zum einen bedingt das Zusammenspiel zwischen geologischer Forschung, Wirtschaft und technischer Entwicklung den Zeitpunkt des Peaks, ab dem ein Rohstoff knapp und dementsprechend teuer wird. Zum anderen leben in Zukunft mehr Menschen auf der Erde – um 2050 vielleicht ein Drittel mehr –, und viele werden dann einen höheren Lebensstandard erreichen, was vermutlich mit einem verstärkten Kupferverbrauch einhergeht.

Gemeinsam mit Gavin Mudd und drei weiteren australischen Rohstoffspezialisten – Stephen Northey von der staatlichen australischen Forschungs-

anstalt CSIRO in Clayton, Zhehan Weng von der Monash University in Clayton und Damien Giurco von der UTS – berechnete Mohr den Kupferpeak. Sie verwendeten die von Mudd und Weng 2012 publizierten Daten aller bekannten Bergbaustandorte, wobei sie die bisherige Kupferproduktion für jedes Land und jeden Lagerstättentyp berücksichtigten. Weitere Parameter waren eine Steigerung der Nachfrage um 1,6 Prozent pro Kopf und Jahr wie bisher sowie ein Anwachsen der Weltbevölkerung von heute 7,1 Milliarden auf 10 Milliarden Menschen im Jahr 2100. Im Modell löste steigende Nachfrage eine Erhöhung der Fördermenge in existierenden Minen und die Eröffnung neuer Minen aus.

Laut der im Februar 2014 veröffentlichten Studie dürfte die extrahierte Kupfermenge in den kommenden zwei bis drei Jahrzehnten mit der wachsenden Nachfrage Schritt halten – bis etwa

2040. Danach wird das Metall knapper und knapper, egal wie hoch der Preis dann sein wird. Selbst wenn so viele neue Vorkommen entdeckt werden, dass die abbauwürdige Erzmenge um die Hälfte anwächst, verschiebt das den Beginn der Krise nur um fünf Jahre – ein Effekt des exponentiell steigenden Bedarfs. Nicht einmal eine hypothetische Verdoppelung oder gar Vervielfachung der Mengen ändert daran sonderlich viel: Im ersten Fall würde Kupfer etwa 2050 knapp, im zweiten um das Jahr 2075.

Hoffnung auf Innovationen

Technologieoptimist Tilton hält dem Schätzungen des USGS aus den 1970er Jahren entgegen, die beim damaligen Stand der Technik etwa 1,6 Milliarden Tonnen Kupfer als mögliche Fördermenge nannten. Heute sind es, wie erwähnt, 3,1 Milliarden Tonnen. »Und



Bergarbeiter müssen in der südchinesischen Zijinshan-Mine Megatonnen von Erz mit niedrigem Kupfergehalt bewegen.

PICTURE ALLIANCE / AP IMAGES / COLOR CHINA PHOTO / YANG ZHIPING

sehr wahrscheinlich wird sich die Zahl nochmals verdoppeln«, sagt Tilton, selbst ohne die Lagerstätten entlang der Mittelozeanischen Rücken zu berücksichtigen. »Wir müssen lediglich technische Probleme lösen.«

Der Industrieökologe Thomas Graedel von der Yale University hingegen nimmt die australische Studie ernster. Seiner Meinung nach ist die Erde schon so gründlich nach Kupfer abgesucht worden, dass die ergiebigen Vorkommen großteils bekannt sind und allenfalls noch vergleichsweise unbedeutende entdeckt werden können. Ob neue Technologien für Abbau und Extraktion trotzdem eine wirtschaftliche Bedarfsdeckung ermöglichen können, weiß er allerdings nicht einzuschätzen.

Doch selbst falls das der Fall sein sollte, warnen die australischen Forscher vor Optimismus. Denn auch ökologische, soziale und politische Faktoren können den Abbau einschränken. Das Metall aus mehreren hundert Me-

ter Tiefe zu gewinnen, kostet Energie und Wasser, verschmutzt die Umwelt und zerstört Landschaft. Beispielsweise birgt das Vorkommen von Reko Diq im Nordwesten Pakistans Kupfer im Wert von 232 Milliarden Dollar. Doch Sicherheitsprobleme sowie Konflikte zwischen der örtlichen Verwaltung und den Bergbauunternehmen verhindern bis auf Weiteres die Erschließung. Die Große Pangunamine in Bougainville (Papua Neuguinea) steht seit 25 Jahren still, da ihre sozialen und ökologischen Auswirkungen einen zehnjährigen Bürgerkrieg mit 20000 Toten entfachten.

Auch ein Blick in die USA zeigt Konfliktpotenzial: Die U.S. Environmental Protection Agency (Umweltbundesamt der USA) untersuchte die möglichen Auswirkungen des Pebble-Mine-Projekts in der Bristol Bay im Südwesten von Alaska. Ihre Anfang 2014 veröffentlichte Studie liefert Umweltgruppen genug Gegenargumente: Lachsreiche Flüsse würden auf insgesamt 150 Kilo-

Weltweit wurden immer größere Mengen Kupfer gefördert. Doch irgendwann überschreitet die Produktion ihr Maximum. Ein Computermodell sagt diesen Peak für etwa das Jahr 2040 voraus.

metern Länge zerstört, mehr als 2000 Hektar Feuchtgebiete, Teiche und Seen vernichtet. Würden solche sozialen und ökologischen Hemmnisse die verfügbare Kupfermenge zum Beispiel um 50 Prozent reduzieren, so käme der Peak laut Mohrs Modell schon zu Beginn der 2020er Jahre.

Der von den Optimisten beschworene Erfindergeist sollte sich also auf jeden Fall auch darauf richten, Alternativen zum Kupfer zu entwickeln. Laut Graedel und seinen Kollegen von der Yale University gibt es in den wichtigsten Anwendungen zwar noch keine vergleichbaren Ersatzstoffe, doch das Recycling ist noch ausbaubar. Bereits etwa die Hälfte des ausgemusterten Kupfers

WENN DER SCHUH EINMAL DRÜCKT: Spektrum RATGEBER

In unserer Digitalreihe **Spektrum RATGEBER** finden Sie wichtige Tipps zu Themen, die den Alltag betreffen – ob beruflich oder privat.



Ratgeber »Beruf und Karriere« (€ 4,99)



Ratgeber »Schizophrenie« (€ 4,99)

ALS PDF
ZUM
DOWNLOAD

Ebenfalls erschienen:



Ratgeber »Lernhilfen für Kinder« (€ 2,49)



Ratgeber »Kommunikation und Rhetorik« (€ 2,49)

Bestellmöglichkeit und weitere Ausgaben:

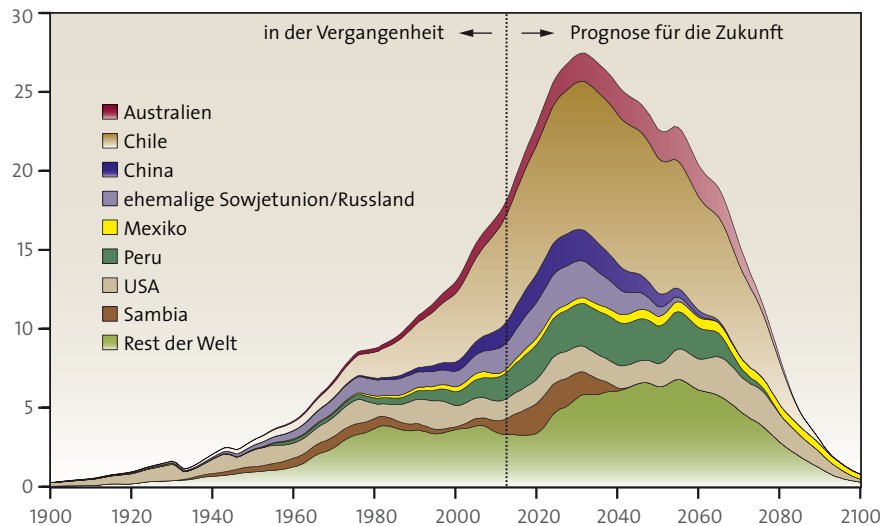
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/ratgeber

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



Hier QR-Code per Smartphone scannen!

Vergangene und zukünftige Kupferförderung in Millionen Tonnen



wird erneut genutzt. Die Gesetzgeber könnten diesen Anteil erhöhen, indem sie Produktdesigns vorschreiben, die eine Rückgewinnung erleichtern und billiger machen. Der Knappheit geschuldete Preiserhöhungen nach dem

Peak werden laut Graedel ohnehin die Wiederverwertung stärken.

Kupfer ist freilich nicht der einzige Rohstoff, dessen Zukunft ungewiss ist. So stagnierte die Goldproduktion im vergangenen Jahrzehnt, obwohl der Be-

darf wächst, was den Preis in die Höhe schießen ließ. Und Mahner warnen, dass das Maximum der Erdölförderung bereits erreicht ist oder kurz bevorsteht. Mohr hat seine Modellrechnung hier eingesetzt und bestätigt die düstere Prognose: 2019 sei der Peak erreicht. Auch die Kohle sieht er in Gefahr mit einem Fördermaximum 2034. Alle fossilen Brennstoffe zusammengenommen streben seines Erachtens einem Hochpunkt um 2030 zu.

Wer auf Windkraft und Fotovoltaik hofft, kann immerhin aufatmen: Lithium, das in Batterien etwa für Elektro- und Hybridautos benötigt wird, dürfte bis zum Ende dieses Jahrhunderts in ausreichender Menge zur Verfügung stehen.

Richard A. Kerr ist Redakteur bei »Science«.

© Science

Science 343, S. 722 – 724, 14. Februar 2014

ZAHLENTHEORIE

Vom Rubik-Würfel zu hyperelliptischen Kurven

Der indischstämmige Mathematiker Manjul Bhargava erhielt die Fields-Medaille 2014 für seine bahnbrechenden Resultate in der Zahlentheorie und der Theorie der elliptischen Kurven.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Kurz vorm Schlafengehen fällt der Blick des Studenten auf einen der vielen Rubik-Würfel, mit denen er zu spielen pflegt. Man kann sich das populäre Spielzeug entstanden denken, indem man einen großen Würfel mit sechs Schnitten zersägt, davon je zwei parallel zu einem der drei Paare Seitenflächen und auf einem Drittel der Kantenlänge, so dass der Würfel am Ende in 27 kleine Würfelchen zerfällt. Was wäre, wenn man nur jeweils einen Schnitt durch die drei Mittelebenen führen würde? Dann ergeben sich nur acht Würfelchen, und jedes hat einen Anteil an einer Ecke des großen Würfels. Schreibt man an jede der acht Ecken

eine Zahl, dann liefern die drei Sägeschnitte drei verschiedene Möglichkeiten, diese acht Zahlen in zwei Teilmengen zu je vier Zahlen zu zerlegen.

Das ist alles nicht wirklich tiefsinnig – aber wenn der Student, der sich diese Gedanken macht, Manjul Bhargava heißt, kann selbst ein trivialer Anlass die genialsten Ideen auslösen. Gerade erst hat sich Bhargava erfolgreich durch die »Disquisitiones arithmeticae« gekämpft, jenes Werk, mit dem Carl Friedrich Gauß (1777–1855) die Zahlentheorie auf eine neue Basis stellte und zugleich den Grundstein zu seinem Weltruhm legte. Deswegen kommt der Student mitten in der Nacht auf die

Idee, die vier Zahlen jeder Würfelhälfte in eine Matrix zu schreiben und mit diesen Matrizen verschiedene Rechenoperationen auszuführen. Und siehe da: Der Zusammenhang, der sich unter diesen Matrizen auftut, ist genau derselbe, den Gauß in den »Disquisitiones« unter dem Namen »Komposition quadratischer Formen« beschreibt.

Bhargava bleibt die Nacht auf und arbeitet seine Entdeckung aus. Wie sich herausstellt, liefert der Weg über den zersägten Würfel einen wesentlich einfacheren Zugang zum Gesetz der Komposition quadratischer Formen als Gaußens Darstellung, die sich wegen ihrer Schwierigkeit und der unge-

wohnen Ausdrucksweise kaum ein heutiger Mathematiker im Original antun möchte. Nicht nur das: Bhargava kann die Entdeckung von Gauß, die als merkwürdiges und schwer verständliches Einzelresultat galt, verallgemeinern und in einen größeren Zusammenhang stellen. Er entwickelt 13 neue Kompositionsgesetze und eine übergreifende Theorie dazu.

Mit den neuen Erkenntnissen gelingt es ihm, eine andere ehrwürdige Theorie fortzuentwickeln. Joseph Louis Lagrange (1736–1813) hat 1770 erstmals bewiesen, dass jede natürliche Zahl Summe von vier Quadraten ist, oder andersherum ausgedrückt: Die Ausdrücke der Form $a^2+b^2+c^2+d^2$, wobei man für a, b, c und d natürliche Zahlen einschließlich der Null einsetzen darf, bedecken lückenlos die Menge der natürlichen Zahlen. Verwendet man nur drei statt vier Zahlen, tun sich Lücken auf, ebenso wenn man vor einzelne der vier Terme konstante (ganzzahlige) Faktoren setzt. So kann man mit dem Aus-

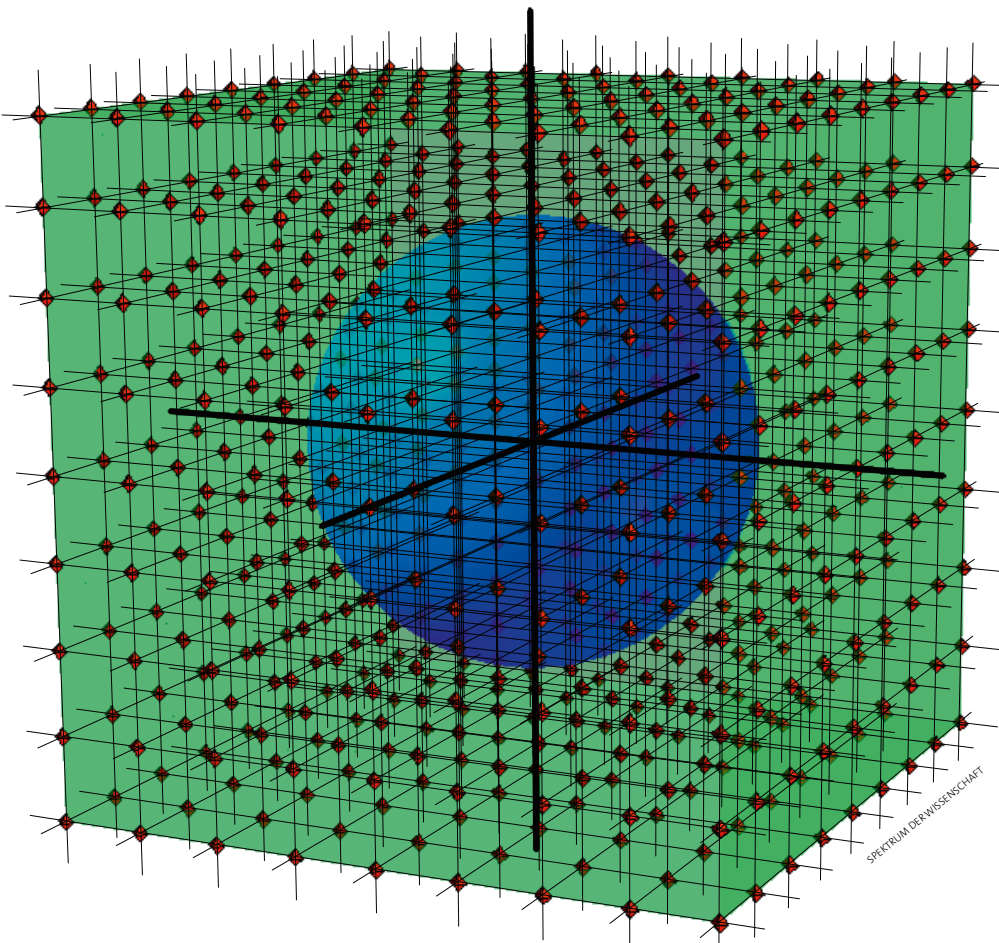
druck $a^2+b^2+c^2+8d^2$ die Zahl 7 nicht erreichen.

Um 1910 erzielte Bhargavas berühmter Landsmann Srinivasa Ramanujan (1887–1920) große Fortschritte auf diesem Gebiet – und übersah, dass der Ausdruck $a^2+2b^2+5c^2+5d^2$ eine einzige Lücke lässt, und zwar bei 15. Einmal entdeckt, erwies sich Ramanujans Flüchtigkeitsfehler als der Schlüssel zu einer großen Erweiterung der Theorie. John H. Conway bewies 1993: Wenn ein Ausdruck der genannten Form (Summe von vier Quadraten mit konstanten Vorfaktoren) bis zur 15 keine Lücke lässt, dann kommt auch keine mehr. Alle unendlich vielen natürlichen Zahlen sind dann mit diesem Ausdruck darstellbar.

Allgemein geht es um »positiv definite quadratische Formen«, das sind Ausdrücke der genannten Art mit im Prinzip beliebig vielen Termen und ganzzahligen Vorfaktoren, die nur positive Werte annehmen. Auch gemischte Terme wie zum Beispiel $4ab$ sind zuge-

lassen, allerdings nur mit geradzahli- gen Vorfaktoren. Lässt man dort auch ungerade Koeffizienten zu, wird die Lückensuche etwas komplizierter. Das Ergebnis: Wenn eine quadratische Form die Werte 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 13, 14, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 26, 29, 30, 31, 34, 35, 37, 42, 58, 93, 110, 145, 203 und 290 annimmt, ist sie universell, das heißt, sie nimmt alle natürlichen Zahlen als Werte an. Und keiner der Tests ist entbehrlich. Denn zu jeder der Zahlen in der Liste gibt es eine quadratische Form, die genau diese Zahl auslöst und alle anderen natürlichen Zahlen annimmt.

Diesen Satz hat Bhargava 2005 gemeinsam mit seinem Studienfreund Jonathan Hanke bewiesen – und das habe richtig Spaß gemacht, erzählt er, weil die beiden dafür sehr geometrische Methoden einerseits und völlig neuartige Computeralgorithmen andererseits kombinieren mussten. Man fasst die Variablen a, b, c und so weiter als Koordinaten in einem Raum mit entsprechend vielen Dimensionen auf. Da sie aber nur ganzzahlige Werte annehmen dürfen, besteht der Raum aus einem »Gitter« voneinander getrennter Punkte, ähnlich einem kubischen Kristallgitter, in dem (zum Beispiel) die Natrium- und die Chloratome sauberlich getrennt voneinander aufgereiht sind (Bild links). Der Beweis gelang Bhargava und Hanke, indem sie die Volumina merkwürdig geformter Teilmengen dieser Gitter bestimmten. Ein



Für eine natürliche Zahl n hat die Gleichung $a^2+b^2+c^2=n$ genau dann eine Lösung mit ganzen Zahlen a, b und c , wenn die Oberfläche der Kugel mit Mittelpunkt im Nullpunkt und Radius $r=\sqrt{n}$ einen der Gitterpunkte des ganzzahligen Gitters in drei Dimensionen trifft. Denn wenn a, b und c die Koordinaten des Gitterpunkts sind, dann gilt nach dem Satz des Pythagoras $a^2+b^2+c^2=r^2=n$. Abgebildet ist der Fall $n=7$. Keiner der Gitterpunkte liegt auf der Kugeloberfläche, das heißt, die genannte Gleichung hat für $n=7$ keine Lösung. Die entsprechende quadratische Form mit vier statt drei Variablen ist universell, hat also für jede natürliche Zahl n eine Lösung.



Manjul Bhargava, geboren am 8. August 1974 in Hamilton (Ontario, Kanada) und aufgewachsen in den USA, studierte zunächst in Harvard bis zum Bachelor und promovierte ab 1996 in Princeton bei Andrew Wiles – dem Mann, der 1994 die fermatsche Vermutung bewies. Auf seine Dissertation hin, in der er Gaußens Kompositionsgesetze bereicherte, nahm das Clay Institute of Mathematics, bekannt als Auslober der Preise für die sieben Millenniumsprobleme, ihn in seine Reihen auf. Die Princeton University berief 2003 den 28-Jährigen auf eine Lebenszeitprofessur – als Zweitjüngsten in ihrer Geschichte. Neben seinen mathematischen Arbeiten spielt er das traditionelle indische Schlaginstrument Tabla auf professionellem Niveau.

entscheidender Beweisschritt bestand übrigens in dem Nachweis, dass man höchstens über vierdimensionale Gitter nachdenken muss, also über Ausdrücke mit vier Variablen a, b, c, d . Weitere Dimensionen hinzuzufügen, bringt nichts Neues.

Wie unendlich ist das Gitter?

Die Wurzeln seiner jüngsten Errenschaften sieht Bhargava in noch fernerer Vergangenheit. Es geht um die Frage, wann ein mathematischer Ausdruck, an dem nur ganze Zahlen beteiligt sind, eine Quadratzahl ergibt. Darunter fallen Gleichungen wie $a^2 + b^2 = c^2$ (die »pythagoreischen Tripel«), für die schon die alten Babylonier eine Fülle von Lösungen fanden, und $x^2 = ny^2 \pm 1$, die heute pellsche Gleichung heißt, obgleich John Pell (1611–1685) keinen nennenswerten Beitrag dazu leistete. Dagegen hatte schon Bhargavas Landsmann Brahmagupta (598–um 670) unter gewissen Voraussetzungen unendlich viele Lösungen dieser Gleichung gefunden (und Bhargava seine Werke im Original studiert).

Heute interessiert man sich besonders für den Fall, dass der Ausdruck, der eine Quadratzahl y^2 ergeben soll, ein Polynom mit einer Variablen x ist. Das läuft auf Gleichungen der Form $y^2 = f(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0$ hinaus. Für $n=3$ heißt die Lösungsmenge dieser Gleichung eine elliptische Kurve und im allgemeinen Fall eine hyperelliptische Kurve. Es ist tatsächlich eine Kurve, wenn man unter x und y reelle Zahlen versteht, und Lösungen mit ganzen Zahlen x und y sind Punkte auf dieser Kurve – mit ganzzahligen Koordinaten eben. Manchmal lockert man auch die Forderung nach Ganzzahlig-

keit und interessiert sich für Punkte mit rationalen Koordinaten oder kurz rationale Punkte.

Elliptische Kurven sind der Gegenstand der Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer, deren Beweis zu den berühmten Millenniumsproblemen zählt (SdW 1/2009, S. 62). Und da man für die Punkte auf ihnen eine Verknüpfung definieren kann, die formal einer Addition gleichkommt, lassen sie sich zur Verschlüsselung geheimer Nachrichten verwenden (SdW 5/2014, S. 20).

Für die Anzahl der rationalen Punkte auf einer hyperelliptischen Kurve kommt es entscheidend auf den Grad des Polynoms an, also den Exponenten n der höchsten vorkommenden Potenz von x . Für $n=1$ oder 2 hat eine solche Kurve entweder unendlich viele rationale Punkte oder gar keinen, für $n \geq 5$ sind es höchstens endlich viele. Letzteres ist die Aussage der mordellschen Vermutung, für deren Beweis Gerd Faltings 1986 die Fields-Medaille erhielt (SdW 9/2008, S. 80).

Für die schwierigsten Fälle $n=3$ und $n=4$ lieferte die Theorie nur die wenig hilfreiche Auskunft, dass es auf einer (hyper-)elliptischen Kurve endlich oder unendlich viele rationale Punkte gibt. Aber da man auf elliptischen Kurven ($n=3$) addieren kann, bilden ihre Punkte eine so genannte Gruppe, und damit sind die mächtigen Werkzeuge der Gruppentheorie auf sie anwendbar. Für $n=4$ gibt es für die Kurve selbst keine Gruppenstruktur, wohl aber eine für eine so genannte Jacobi-Varietät, die man zu der Kurve konstruieren kann.

Mit Hilfe der Gruppentheorie klärt sich das Bild. Die rationalen Punkte – der Kurve selbst oder der Jacobi-Varie-

tät – bilden ein Gitter mit endlich vielen Dimensionen. An jedem Gitterpunkt sitzt entweder ein rationaler Punkt selbst oder eine Kleingruppe aus endlich vielen Punkten, aber auf Letztere kommt es für die Frage »unendlich oder nicht?« nicht an. Vielmehr interessiert man sich mehr dafür, wie unendlich das Gitter ist, also wie viele Dimensionen es hat – was den Fall einer endlichen Gruppe als Dimension null mit einschließt. Die Anzahl dieser Dimensionen nennt man den Rang der Kurve beziehungsweise Varietät.

Durchschnitt über unendlich viele Kurven

Bhargava hat nun für diesen Rang Durchschnittswerte gefunden. Das ist eine zunächst seltsam wirkende Aussage, denn eigentlich kann man über unendlich viele Objekte keinen Durchschnitt bilden. Man kann ihn höchstens über endlich viele Objekte berechnen, deren Anzahl über alle Grenzen wachsen lassen und hoffen, dass die zugehörigen Durchschnittswerte gegen einen Grenzwert streben. Allerdings kommt es dann darauf an, wie man die Folge dieser endlichen Teilmengen auswählt.

Nun ist jede elliptische Kurve durch einige wenige Zahlen charakterisiert. Man kann daher die Kurven nach der Größe dieser Koeffizienten sortieren und den Durchschnitt zuerst über die kleinsten, dann über zunehmend größere Kurven bilden. In einer groß angelegten Serie von Arbeiten mit verschiedenen Koautoren hat Bhargava mit Hilfe des so definierten Durchschnittsbegriffs eine Fülle von Ergebnissen gefunden. Der Durchschnittsrang einer elliptischen Kurve liegt unter 0,885.

Der Forscher als Kinofigur

Sein Bild wird heller, aber bleibt verschwommen.

Statt einmal mehr das übliche Ringelreihen von Delinquenten und Gesetzeshütern zu inszenieren, wagen neuerdings aufwändig produzierte Filme auch Wissenschaftler in spannende Handlungen zu verwickeln. In dem aktuellen Science-fiction-Drama »Interstellar« von Christopher Nolan steht nicht weniger auf dem Spiel als die Rettung der Menschheit, und helfen kann nur modernste Wissenschaft: Erst die – heute noch utopische – Vermählung von Quantenmechanik und einsteinscher Relativitätstheorie zu einer Theorie der Quantengravitation ermöglicht es der kompletten Erdbevölkerung, von ihrer unwirtlich gewordenen Heimat durch ein Wurmloch in der Raumzeit zu fernen Planeten zu entkommen.

In »Interstellar« sind die Wissenschaftler keine Schurken wie bei James-Bond-Filmen, aber auch keine strahlenden Helden; denn das Vertrauen in ihr Metier ist erschüttert: Ihnen wird angekreidet, dass das globale Klima aus dem Ruder läuft, Parasiten die Nahrungspflanzen vernichten und die bemannte Raumfahrt als Waffe im Kalten Krieg erhalten musste. Deshalb hat sich die US-Weltraumbehörde NASA in unterirdische Bunker verkrochen, um dort die Besiedlung ferner Planeten vorzubereiten. Doch erst als im Lauf der unübersichtlichen Handlung ein Computer mit künstlicher Intelligenz die Gesetze der Quantengravitation entschlüsselt, klappt mittels Wurmloch, Zeitschleife und fünfter Dimension die Auswanderung der gesamten Menschheit.

Für die hochspekulativen Anleihen aus dem Reich der Physik spannten die Filmproduzenten laut eigener Aussage den prominenten amerikanischen Gravitations-theoretiker Kip Thorne als Ratgeber ein. Ich frage mich, ob auf seine Kappe auch so haarsträubende Einfälle gehen wie fünfdimensionale Klopfzeichen aus der Zukunft oder die umwerfende Erkenntnis »Nur Liebe überwindet Raum und Zeit«.

In dem ungleich bodenständigeren Film »The Imitation Game« über den britischen Mathematiker Alan Turing (1912–1954) präsentiert die Wissenschaft ebenfalls ihr notorisches Janusgesicht zwischen Fluch und Segen. Der historische Turing war ein lebensfrohes, selbstgewisses Genie, das erst durch die bigotten Vorurteile seiner Zeit als Homosexueller kriminalisiert und in den Tod getrieben wurde. Im Film erscheint er von vornherein als Opfer einer Begabung, die ihn zum abnormen Außenseiter stempelt – als wäre Genie eine Behinderung.

Zu Turings historischen Leistungen gehört die Dekodierung des deutschen Chiffriergeräts »Enigma« mit einer von ihm gebauten elektromechanischen Maschine – was den mörderischen Weltkrieg um Jahre verkürzt haben dürfte. Der Film deutet diese Großtat leider zur frei erfundenen Frankenstein-Geschichte um: Weil Turing als Knabe den Tod eines geliebten Mitschülers nicht verwinden konnte, habe er der Dekodiermaschine später dessen Namen gegeben und das Gerät als Ersatzpartner behandelt. Die angebliche Rolle des Computers als Menschenimitat erklärt auch den etwas kryptischen Filmtitel.

Bei allen Schwächen nehmen beide Kinowerke die Naturforschung jedenfalls ungewohnt ernst – statt sie so platt und lustvoll zu dämonisieren wie ein klassisch schwarz-weißer Frankenstein-Film. »Interstellar« beruft sich immerhin auf einen wissenschaftlichen Gewährsmann, und die filmische Turing-Geschichte beruht lose auf der viel gerühmten Biografie, die der Mathematiker Andrew Hodges 1983 verfasst hat. Und beide Leinwandepen würdigen in gebührender Weise das Potenzial der Wissenschaft, selbst schwierigste Probleme zu lösen und so letztlich in großem Stil Leben zu retten.



Michael Springer

Mindestens 20 Prozent von ihnen haben Rang 0, und zwar ist die Anzahl ihrer rationalen Punkte nicht nur endlich, sondern gleich 1: Die Gruppe besteht nur aus ihrem neutralen Element. Andererseits beträgt der Anteil der Kurven mit Rang 1 – und damit unendlich vielen rationalen Punkten – auch mindestens 20 Prozent.

Für hyperelliptische Kurven kann Bhargava die vorhandenen Resultate noch verschärfen: Die meisten von ihnen haben nur einen oder gar keinen rationalen Punkt, je nachdem, ob n ungerade oder gerade ist.

Auf dem Weg zur Jahrtausendlösung

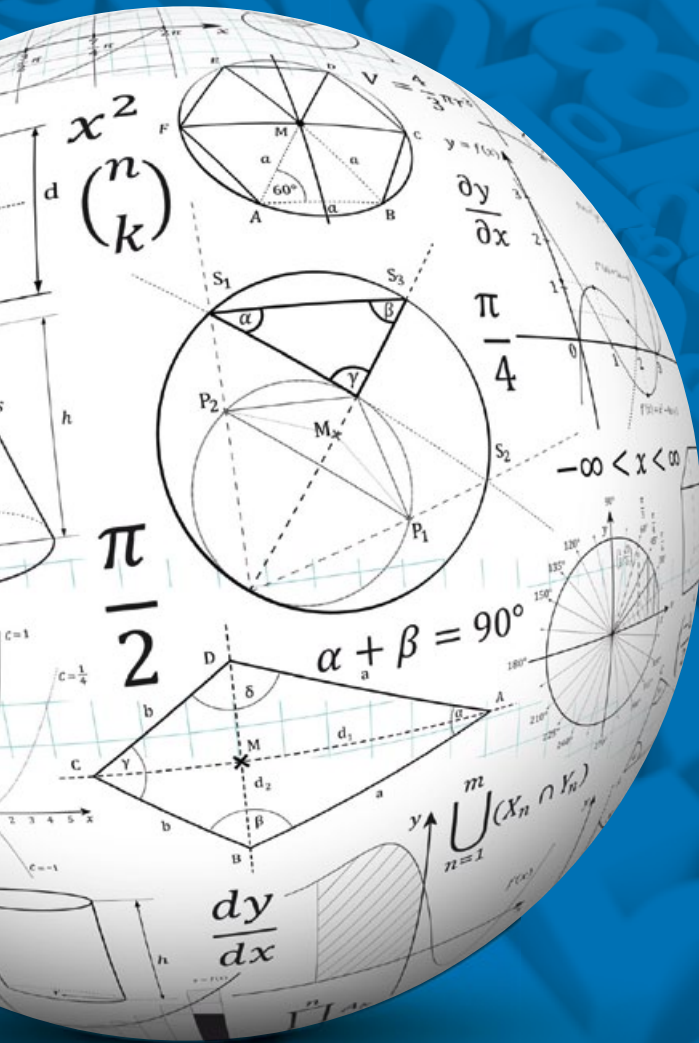
Damit kommt er auch der noch unbewiesenen Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer näher: Noch kann er nicht beweisen, dass sie für alle elliptischen Kurven gültig ist, aber für immerhin 66,48 Prozent von ihnen. Auch dieser Wert ist durch Sortieren nach Größe der Koeffizienten und Grenzwertbildung ermittelt worden.

In auffallendem Kontrast zu dem geringen Durchschnittsrang stehen die Ergebnisse, die eine Gruppe von Mathematikern um Barry Mazur von der Harvard University durch Computersuche gefunden hat. Unter allen untersuchten elliptischen Kurven kamen die mit Rang 2 häufig vor und wurden mit zunehmender Größe der Kurven immer häufiger! Und das gilt für Größen bis zu 100 Millionen. Dagegen vermuten die Mathematiker mit gutem Grund, dass auf die Dauer die Hälfte aller elliptischen Kurven Rang 1 und die andere Hälfte Rang 0 haben. Demnach müssten jenseits der 100 Millionen irgendwann die Kurven vom Rang 2 und höher – es gibt Kurven beliebig hohen Rangs – aussterben, und zwar so radikal, dass sich im Durchschnitt nichts von ihnen bemerkbar macht. Offensichtlich gewinnt man in diesem Fall selbst dann kein klares Bild von einer Eigenschaft der natürlichen Zahlen, wenn man alle Beispiele bis zu 100 Millionen untersucht.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Faszination Mathematik

Von Pythagoras bis zu den ungelösten Fragen



- ▶ Die Algorithmen in der Wirtschaft: Wie funktionieren Google, Facebook und die Börse?
- ▶ »Das Problem des Handlungsreisenden«: So rechnet Ihr Navigationsgerät
- ▶ Pythagoras, Gauß, Hilbert – wegweisende Mathematiker
- ▶ »Die Quadratur des Kreises« – warum sie nicht möglich ist
- ▶ »Die Millennium-Probleme« – die Millionen-Dollar-Fragen der Mathematik

Diese und weitere zentrale Themen der Mathematik erläutern **Prof. Dr. Günter M. Ziegler** und der **ZEIT-Wissenschaftsredakteur Christoph Drösser** in 11 Lektionen à 30 Minuten auf 4 DVDs und in einem umfangreichen Begleitbuch. Jetzt für nur 124 €* statt 149 € als DVD- oder 99 € als Online-Seminar.

Jetzt
25 €
sparen



Bestellen Sie jetzt Ihr ZEIT Akademie-Studium:

- ▶ Renommierete Professoren vermitteln Ihnen exklusives Wissen auf Universitätsniveau.
- ▶ Komplexe Zusammenhänge werden verständlich und anschaulich erklärt.
- ▶ Im Interview fragen ZEIT-Redakteure nach und ordnen die Themen aktuell ein.
- ▶ Online-, DVD- oder Audioseminar: Sie lernen wann, wo und wie Sie wollen.

Ihr 25 €-Gutscheincode für das DVD-Seminar Mathematik: **ZASDW14**

 **040/32 80-1190**  **service@zeitakademie.de**

Diese und alle weiteren Seminare finden Sie unter  www.zeitakademie.de

Menschwerdung in neuem Licht

Entdeckungen der letzten Jahre stellen manches für gesichert gehaltene Wissen über die menschliche Evolutionsgeschichte radikal in Frage. So entwickelte sich unsere Spezies auf deutlich verschlungeneren Wegen zur dominierenden Art als bisher gedacht.

Von Kate Wong

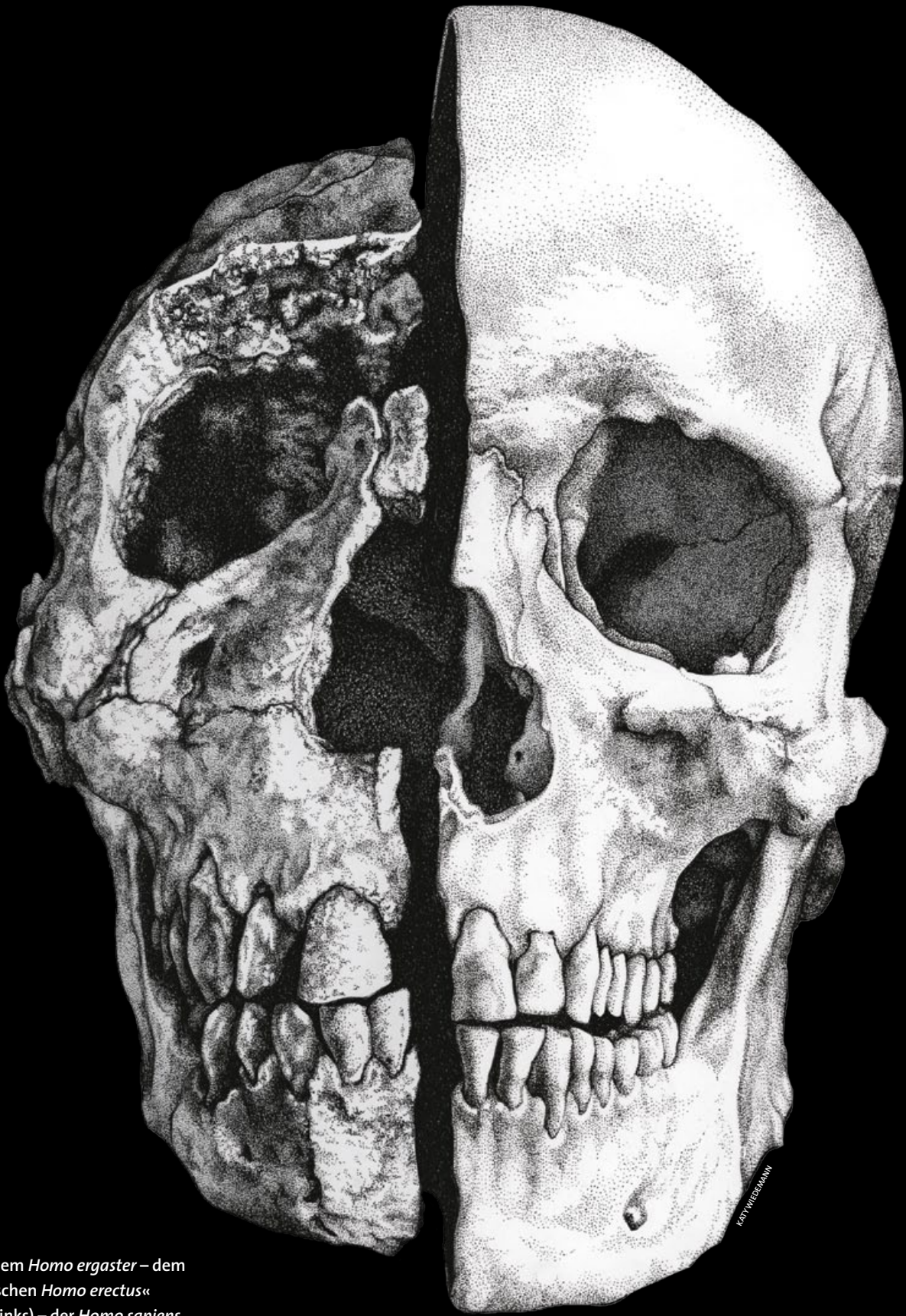
DIE SERIE IM ÜBERBLICK

EVOLUTIONSGESCHICHTE DES MENSCHEN

- | | | |
|--------|--|--------------|
| Teil 1 | ▶ Menschwerdung in neuem Licht
<i>Kate Wong</i> | Januar 2015 |
| | Unsere unübersichtliche Verwandtschaft
<i>Bernard Wood</i> | |
| Teil 2 | ▶ Der Einfluss des Klimas
<i>Peter B. deMenocal</i> | Februar 2015 |
| Teil 3 | ▶ Erfindungsgeist und Selbstdarstellung
<i>Ian Tattersall</i> | März 2015 |
| Teil 4 | ▶ Der Vorteil der Paarbildung
<i>Blake Edgar</i> | April 2015 |
| | Hilfsbereitschaft und Kooperation
<i>Frans de Waal</i> | |
| Teil 5 | ▶ Aufgaben lösen dank Empathie
<i>Gary Stix</i> | Mai 2015 |
| Teil 6 | ▶ Die digitale Revolution
<i>Interview mit Sherry Turkle</i> | Juni 2015 |
| | Warum unsere Evolution weitergeht
<i>John Hawks</i> | |

Der Weg führt durch den Briefkasten, hoch auf den Drachenrücken, die Rutsche hinab und rüber in die Rätselkiste. Die so bezeichneten unterirdischen Engstellen und anderen schwierigen Passagen müssen die Forscher meistern, um zu einer spektakulären Fundstelle von Homininenknochen zu gelangen. Erst im September 2013 wurde sie in Südafrika bei Johannesburg entdeckt. Gewöhnlich halten Paläoanthropologen einen neuen Fossilfund zunächst geheim. Doch im Herbst 2013 erlebte die Welt im Internet über Nachrichten, Videos und Kommentare quasi live mit, wie sich Forscherinnen im verzweigten Höhlensystem »Rising Star« zu den Fossilien vorarbeiteten, die vielleicht von einem frühen Menschen stammen.

Die Gegend ist unter dem Namen »Wiege der Menschheit« (Cradle of Humankind) bekannt. Von dort kommen unter anderem die ersten afrikanischen Funde von Homininen – also von jenen menschenähnlichen Primaten, die nach der Abspaltung von den Menschenaffen zum menschlichen Stammbaum (des *Homo sapiens*) inklusive seiner Seitenäste zählen. Das neue Fossilager spürten Höhlenforscher auf, als sie in dem Gebiet einige weniger bekannte Grotten und Schächte erkundeten. Anthropologen maßen dem Fund sogleich hohe Bedeutung zu, noch ohne das genaue Alter der



Wie aus dem *Homo ergaster* – dem »afrikanischen *Homo erectus*« (Schädel links) – der *Homo sapiens* (rechts) entstand, verstehen die Forscher noch immer nicht genau.

Fossilien zu kennen oder die Spezies eingeordnet zu haben. Denn während man sonst von einem Individuum meist entweder Fragmente vom Schädel und Unterkiefer findet oder nur Knochenteile des übrigen Skeletts, gab es hier Knochen sowohl vom Kopf als auch vom Körper. Zudem zeigte sich, als die Ausgrabungen begannen: Hier lagern Überreste vieler Individuen, die somit einen Eindruck von einer Population früher Menschen liefern könnten.

Gleich nach der Entdeckung beschloss man, die Fossilien rasch zu bergen. Der Paläoanthropologe Lee Berger von der University of the Witwatersrand in Johannesburg leitete dann zwei aufeinander folgende Expeditionen von zusammen vier Wochen Dauer. Wegen der engen Passagen konnten nur zierliche Wissenschaftlerinnen zu der betreffenden Stelle in 30 Meter Tiefe vordringen. Sie alle brachten Höhlen- und Ausgrabungserfahrung mit und holten in der kurzen Zeit über 1500 Knochen und deren Teile heraus. Im Expeditionzelt außerhalb der Höhle katalogisierten und verpackten andere Experten die Stücke für die späteren Untersuchungen. Trotzdem haben die Frauen bisher buchstäblich nur an der Oberfläche gekratzt: Denn in der Kaverne lagern noch unzählige weitere Knochen. Dieses Höhlensystem könnte sich als einer der reichhaltigsten Fundorte menschlicher Fossilien überhaupt erweisen.

Solange gründliche Analysen nicht vorliegen, lässt sich der wissenschaftliche Stellenwert dieser Entdeckung nicht ermesen. Das Forscherteam hat zwar von der Grabung öffentlichkeitswirksam berichtet. Wissenschaftliche Ergebnisse hält es jedoch vorerst zurück. Außenstehende können also nur darüber spekulieren, ob es sich wieder einmal um eine neue Homininenart handelt – die vielleicht sogar den Ursprung der Menschengattung erhellen hilft. Erst 2008 stieß Berger in der Nähe, an der Fundstelle Malapa, auf das erste einer Anzahl von Fossilien einer bislang unbekanntes Spezies, die möglicherweise an der Wurzel der Gattung *Homo* stand (siehe SdW 9/2012, S. 22). Ob die Zusammensetzung der zahlreichen Individuen aus der Rising-Star-Höhle außerdem etwas über soziale Strukturen der Frühzeit verrät, bleibt abzuwarten. Zumindest aber könnte ein Abgleich der menschlichen mit etwaigen Tierfossilien von diesem Ort darüber Aufschluss geben, wie die vielen Homininen überhaupt dorthin gelangten – ob zum Beispiel eine Flutkatastrophe sie an



ELEN FEUERREGEL

die Stelle verfrachtete. Zuerst wollen die Forscher allerdings eine wissenschaftliche Beschreibung und Einordnung der Knochen vorlegen.

Gespanntes Warten auf erste wissenschaftliche Daten

Der Fund in Südafrika reiht sich ein in eine Serie von Entdeckungen zur Menschenevolution seit Anfang dieses Jahrtausends, die manche unerwarteten Entwicklungen und Zusammenhänge zeigen. Dadurch sind praktisch alle Kapitel zur menschlichen Entwicklungsgeschichte zumindest teilweise umzuschreiben. Neues gibt es zu fast allen Phasen – von den Anfängen der Homininen bis zum Triumph des *Homo sapiens* über die Neandertaler und andere archaische Menschen.

Vielleicht tat sich in der Paläoanthropologie noch nie so viel wie gerade jetzt. Unter anderem erhält unser Stammbaum durch frisch entdeckte Fossilien zusätzliche Äste. Klimadaten erlauben Rückschlüsse auf die Umweltbedingungen, unter denen einst die typischen menschlichen Merkmale entstanden. Kognitive Studien an Menschenaffen machen deutlich, worin wir uns geistig von anderen Primaten wirklich unterscheiden. DNA-Analysen deuten auf Kontakte zwischen prähistorischen Populationen hin. Und sie zeigen, dass unsere Evolution auch heute nicht stillsteht.

Der Erkenntnisgewinn gerade in der letzten Zeit wird besonders deutlich, wenn man in die späten 1990er Jahre zurückblickt. Damals meinten Anthropologen die Vergangenheit bereits recht gut zu überschauen. Ihnen standen ziemlich viele Fossilien von Homininen zur Verfügung, vor allem

AUF EINEN BLICK

DER MENSCH – IMMER FÜR ÜBERRASCHUNGEN GUT

1 Je mehr **Rätsel unserer Herkunft** Forscher lösen, desto mehr unerwartete Zusammenhänge tauchen auf. Die Erkenntnisse, mit ihnen aber auch neue Fragen reichen von der **Evolution** bis zum **Intellekt** und **sozialen Miteinander**.

2 Der **menschliche Stammbaum** ist längst nicht geklärt. Auch worin wir uns wirklich von **anderen Primaten** unterscheiden, bringen neue Studien erst nach und nach ans Licht.



Wissenschaftlerinnen mit Erfahrung in Höhlenforschung wie K. Lindsay Eaves von der University of Iowa in Iowa City (Bild links) brachten aus einer der Kammern des Rising-Star-Höhlensystems in Südafrika mehr als 1500 Fossilien von Homininen zu Tage, die frühe Menschen gewesen sein könnten. Das rechte Foto zeigt, wie die Funde vor Ort sortiert und katalogisiert werden.

JOHN HAWKS

im Vergleich dazu, dass sie zu den afrikanischen Menschenaffen, unseren nächsten lebenden Verwandten, fast nichts in den Händen hatten. Auch lieferten genetische Studien bereits einige aufschlussreiche Hinweise, die zu den damals neuen Vorstellungen unter anderem über die Herkunft des *Homo sapiens* gut passten.

Das alte Weltbild bricht zusammen

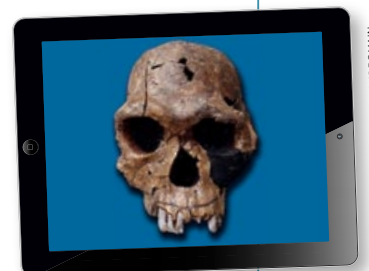
Knapp gesagt dachten viele Anthropologen: Die allerersten Homininen traten irgendwann vor über 4,4 Millionen Jahren in Ostafrika auf, und vor etwas mehr als zwei Millionen Jahren entstand dann in Afrika die Gattung *Homo* mit den ersten Frühmenschen. Bis Anfang der 1990er Jahre sah es so aus, als hätten Homininen ihren Ursprungskontinent erstmals vor etwas mehr als einer Million Jahren verlassen, in Form einer bereits recht hoch entwickelten *Homo*-Spezies. Aus ihr gingen in Eurasien dann eigene Arten hervor, darunter die Neandertaler. Archaische Menschen behaupteten sich in Europa und Asien Hunderttausende von Jahren – bis am Ende wieder eine neue Spezies aus Afrika auftauchte: der »moderne« Mensch, der die Welt wie im Sturm eroberte. Der *Homo sapiens*, so erschien es, war den archaischen Arten an Intelligenz klar überlegen. Er verfügte über die fortschrittlichsten Werkzeugtechnologien und war sprachbegabt. Nachdem er einwanderte, starben die urtümlicheren Menschenformen wie die Neandertaler aus. Mischlingskinder hatte es nach der vorherrschenden Überzeugung nicht gegeben, sondern der moderne Mensch verdrängte insbesondere die Neandertaler auf Grund seiner Überlegenheit komplett, wenn er sie nicht sogar direkt ausrottete. Und in den letzten

etwa 30000 Jahren blieb nur noch unsere eigene Spezies übrig – so wenigstens das gängige Bild.

Mittlerweile sind allerdings diverse Fossilien und genetischen Daten zusammengekommen, die praktisch jeden Aspekt dieser Darstellung widerlegen oder zumindest in Zweifel ziehen. Beispielsweise lassen sieben Millionen Jahre alte Funde aus der Djurab-Wüste im nördlichen Tschad vermuten, dass die menschliche Evolution mindestens zwei Millionen Jahre früher einsetzte als bisher angenommen. Auch überlegen manche Forscher nun, ob die ersten Homininen vielleicht gar nicht in Ostafrika, sondern weiter im Westen entstanden. Ein anderes Beispiel sind die schon erwähnten Fossilien von Malapa bei Johannesburg, die ein Alter von knapp zwei Millionen Jahren haben. Mit ihrer eigenartigen Mischung altertümlicher und fortschrittlicher Merkmale könnten sie nach Ansicht mancher Anthropologen darauf hindeuten, dass die Gattung *Homo* nicht in Ostafrika, sondern in Südafrika zuerst auftrat (siehe Artikel ab S. 27).

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Evolution des Menschen« finden Sie unter www.spektrum.de/menschwerdung



JOSE-MANUEL BENTO ADAREZ / PUBLIC DOMAIN



Während der Bergung in der Rising-Star-Höhle legten die Forscher dreidimensionale Computermodelle der Fossilienkammer an.

Selbst Eurasien besiedelten Hominine sehr viel früher als gedacht. Das beweisen 1,78 Millionen Jahre alte Fossilien, vor allem mehrere Schädel, aus Dmanisi in Georgien vom südlichen Kaukasus. Lange hatten Experten geglaubt, dass erst langbeinige Menschen mit relativ großem Gehirn – also mit Merkmalen deutlich jüngeren Ursprungs – und mit fortschrittlichem Werkzeug über die Möglichkeiten verfügten, sich über Afrika hinaus zu verbreiten. Für eine Menge Irritation sorgte zudem die Entdeckung eines auffallend kleinwüchsigen und kleinhirnigen Homininen in Indonesien, der noch vor etwa 17 000 Jahren auf der Insel Flores lebte und vorerst *Homo floresiensis* genannt wird. Ob es sich überhaupt um einen Angehörigen unserer Gattung handelt – eventuell um ein krankes Individuum – oder vielleicht um einen Australopithecinen, also einen noch vormenschlichen Homininen, den es vor mindestens zwei Millionen Jahren nach Asien verschlug, steht noch nicht fest.

***Homo sapiens*: Weltherrscher nur durch Zufall?**

Wohl kein Abschnitt der menschlichen Odyssee musste so grundlegend umgeschrieben werden wie das Kapitel über den Aufstieg des *Homo sapiens*. Mitnichten war der moderne Mensch sofort ein Erfolgsschlag der Evolution, von Anfang an für die Weltherrschaft gemacht. Denn kaum war unsere Spezies aufgetreten, wäre sie infolge von Klimaveränderungen beinahe gleich wieder ausgestorben. Auch hoben sich ihre geistigen Fähigkeiten und ihr technologisches Niveau vermutlich weniger von den jüngeren archaischen Menschenformen ab als früher gern angenommen. Gerade die Neandertaler waren keineswegs unbeholfene, plumpe Höhlenmenschen. So wussten sie offensichtlich bereits aus Tierknochen Geräte zum Lederpolieren herzustellen. Und auch sie scheinen sich schon bemalt und aus Tierschalen oder Federn Schmuck angefertigt zu haben – ein Zeichen dafür, dass die Tradierung von Symbolik nicht allein in Gesellschaften des modernen Menschen stattfand.

Außerdem waren die Kontakte zwischen modernen Menschen und Neandertalern nicht nur feindlicher Art. Wie genetische Untersuchungen zeigen, hatten sie durchaus gemeinsame Kinder, und zwar immerhin so häufig, dass im Genom der heutigen Menschen nichtafrikanischer Herkunft noch bis zu drei Prozent Neandertaler-DNA steckt. Insgesamt blieb sogar viel mehr von diesem Erbgut erhalten, nämlich nach aktuellen Schätzungen mindestens 20 Prozent, einfach weil verschiedene Menschen unterschiedliche Abschnitte der Neandertaler-DNA aufweisen.

Die Neandertaler waren nicht einmal die einzigen archaischen Menschen, die sich mit dem *Homo sapiens* gekreuzt haben. In einigen heutigen Menschengruppen hinterließ auch der Denisovamensch genetische Spuren, der vor rund 40 000 Jahren gelebt haben muss. Ihn entdeckten Paläogenetiker erst 2009/2010, als sie aus einem vorher Neandertalern zugeschriebenen Knochenfossil aus dem Altai-Gebirge in Südsibirien Erbsequenzen fischten (siehe SdW 12/2014, S. 68).

Vermutlich profitierte der moderne Mensch in Eurasien sogar von einigen Genen seiner archaischen Vetter. Erbfaktoren des Neandertalers scheinen zum Beispiel seine Immunkräfte für die Lebensbedingungen in unseren nördlichen Breiten gestärkt zu haben. Und eine offenbar von Denisovanern stammende Genvariante hilft den Tibetern, in großer Höhe zu leben.

Natürlich weist der *Homo sapiens* aber auch Merkmale und Eigenschaften auf, in denen er sich von anderen Menschenformen abhebt. Die mit diesem Heft beginnende Serie behandelt zunächst den verschlungenen Stammbaum der Homininen und die Randbedingungen, durch welche die Evolutionslinie hin zum *Homo sapiens* gegenüber anderen im Vorteil war und schließlich als einzige übrig blieb. Weiterhin geht es um Unterschiede zu anderen Primaten, hauptsächlich um die sozialen und intellektuellen Besonderheiten, die den Menschen auszeichnen – und deren Rolle für unseren beispiellosen Erfolg. Den Abschluss machen Ausblicke auf die biologische und psychische Zukunft des Menschen in einer Welt, die allem und jedem, selbst Einsamkeit und Krankheit, mit Technologie begegnet. ~

DIE AUTORIN



Kate Wong ist Redakteurin bei »Scientific American«.

WEBLINKS

<http://voices.nationalgeographic.com/blog/rising-star-expedition/>
Themenseite bei »National Geographic« mit Berichten, Bildern und Videos von der Expedition in die Rising-Star-Höhle (auf Englisch)

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1319581

TITELTHEMA: PALÄOANTHROPOLOGIE

Unsere unübersichtliche Verwandtschaft

Der menschliche Stammbaum ist entgegen früheren Vorstellungen durchgehend stark verzweigt. Wahrscheinlich lebten in den meisten Phasen der Menschwerdung deutlich mehr Arten von Homininen gleichzeitig als gedacht – und haben manchmal sogar gemeinsam Nachwuchs produziert.

Von Bernard Wood



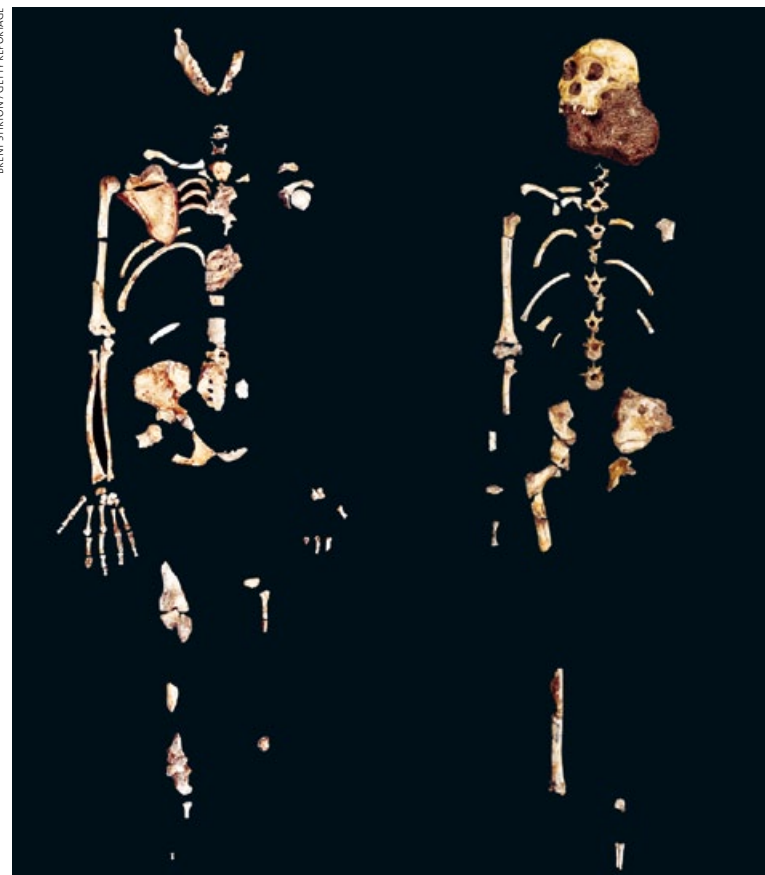
Welche Menschenarten und Vormenschen in der Linie unserer direkten Vorfahren standen, ist vielfach noch unklar.

AG FOCUS / SCIENCE PHOTO LIBRARY / ELISABETH DAWNES & SYLVAIN ENTRESSANGE

» **N**a, was halten Sie davon?«, fragt mich Lee Berger. Eben hat er die Deckel von zwei großen Holzkisten abgenommen. Darin liegen sorgsam arrangiert fossilisierte Knochen zweier Skelette – von menschenähnlichen Individuen, die vor rund zwei Millionen Jahren in Südafrika lebten. Berger ist Paläoanthropologe an der University of the Witwatersrand in Johannesburg. Die Fossilien, die er mir zeigt, stammen von dem erst 2008 entdeckten Fundort Malapa nicht weit von dort. Jene Homininen, inzwischen als *Australopithecus sediba* bezeichnet, sorgten unter den Fachleuten in den letzten Jahren für einige Aufregung – und das nicht nur, weil es so selten vorkommt, dass vom selben Individuum mehr als einzelne Knochen auftauchen, geschweige denn größere Teile eines Skeletts. Völlig anders als sonst bereitete es zudem bei diesen beiden Exemplaren wenig Mühe, festzustellen, welche nah beieinander gefundenen Fossilien zum selben Individuum gehören.

Schlagzeilen machte vielmehr Bergers These, es handele sich hierbei womöglich um Repräsentanten einer Population, die zu den direkten – und nahen – Vorläufern der Gattung *Homo* zählte, welche ungefähr in jener Zeit entstanden sein muss. Hierzu will er nun meine Einschätzung hören. Statt die beiden Skelette und Details der Zähne und Kiefer anzustaunen, soll ich lieber sagen, ob ich mir vorstellen kann, dass dies tatsächlich Urahnen des Menschen gewesen sein könnten, also Vorfahren der menschlichen Gattung. Oder halte ich sie eher für Angehörige einer mit unseren Vorfahren eng verwandten Seitenlinie dicht an der Wurzel der Gattung *Homo*, von der wir nicht direkt abstammen?

In den 1960er Jahren begann ich in Ostafrika menschliche Fossilien zu erforschen. Nach der damaligen Lehrmeinung hatten die Homininen im Wesentlichen nur eine einzige große Entwicklungslinie gehabt – an deren Ende der *Homo sapiens* auftrat. Die meisten ausgestorbenen, schon mehr oder weniger menschenähnlichen Wesen hielten wir für seine direkten Vorfahren, die umso affenähnlicher ausgesehen hatten, je weiter man zurückblickte. Jenes übersichtliche Bild haben die Forscher inzwischen gründlich revidiert. Mittler-



Aus der Malapa-Höhle in Südafrika bei Johannesburg stammen diese beiden fast zwei Millionen Jahre alten Skelette von *Australopithecus sediba*. Manche ihrer anatomischen Details

weile ist, nicht zuletzt auch dank genetischer Studien, klar, dass unsere Ahnen diesen Planeten in den letzten Jahrtausenden mit Angehörigen verschiedener anderer evolutionärer Linien teilten, die mit der unseren mehr oder weniger eng verwandt waren – etwa den Neandertalern oder den Denisovamenschen.

Gleiches trifft auf die viel weiter zurückliegenden Zeiten zu. Auch in dem Abschnitt von vor vier bis vor einer Million Jahren lebten verschiedentlich mehrere Homininenarten gleichzeitig. Diese Tatsache macht es für Paläoanthropologen allerdings erheblich schwerer als noch in den 1990er Jahren, Fossilfunde vermeintlich richtig zuzuordnen – als Menschenvorfahren oder aber »nur« als damit Verwandte. Doch die Zusammenhänge werden zugleich immer spannender.

Zu Beginn meiner Laufbahn als Paläoanthropologe hielten wir uns an einen übersichtlichen Stammbaum der Organismen im Sinne Charles Darwins. Dieser hatte erkannt, dass die Lebewesen durch Abstammung miteinander verbunden sind, weil sie alle einer gemeinsamen Wurzel entspringen. Wie bei einem Baum teilt sich der gemeinsame Stamm in Äste auf – neue evolutionäre Linien –, die sich immer weiter verzweigten. Die heutigen Arten befanden sich in Darwins Bild an den äußeren Enden der Äste, während frühere, ver-

AUF EINEN BLICK

UNERWARTETER FAMILIENZUWACHS

1 Vor einem halben Jahrhundert sah die **Ahnentafel des *Homo sapiens*** ziemlich einfach aus. Darauf dominierte eine gerade Linie: *Australopithecus* – *Homo erectus* – Neandertaler – moderner Mensch. Diese Abfolge trifft so aber nicht zu.

2 Fossilien aus den letzten Jahrzehnten erzählen eine völlig **andere Evolutionsgeschichte**. Demnach existierten im menschlichen Stammbaum wohl seit frühesten Zeiten **nebeneinander verschiedene Evolutionslinien**, teils auch mit sehr ähnlichen Arten.

3 Je mehr Fossilien auftauchen, umso schwerer lässt sich die **genaue Herkunft des Menschen** ermitteln, denn die Verhältnisse erscheinen immer verworrener. Paläontologen können bisher oft nicht klären, ob ein Fossil von einem **direkten Vorfahren** des *Homo sapiens* stammt oder nur aus der engeren Verwandtschaft. Je weiter man zurückblickt, desto schwieriger wird die Zuordnung.



BRENT STIRTON / GETTY REPORTAGE

erinnern an Australopithecinen, andere Merkmale eher an die Gattung *Homo*. Von diesem bisher unbekanntem Homininen finden Forscher in der Höhle massenhaft Fossilien. *A. sediba* könnte nach Meinung einiger Experten durchaus ein naher Vorfahr der Gattung *Homo* gewesen sein.

schwundene Arten näher beim Stamm ihren Platz gehabt hatten. Evolutionslinien, die irgendwann aufhörten, also keine heutigen Organismen hervorbrachten, stellen »tote« Äste oder Zweige dar, sozusagen evolutionäre Sackgassen.

Für den Teilbereich des Stammbaums des modernen Menschen und der am engsten mit ihm verwandten lebenden Menschenaffen heißt dies, dass dessen Äste zum letzten gemeinsamen Vorfahren zurückführen. Dieser lebte nach molekularen Berechnungen vor zwischen mindestens fünf und höchstens acht Millionen Jahren.

Als Afrika immer mehr ins zentrale Blickfeld rückte

Den Ast von dort zum *Homo sapiens* stellten wir uns noch Anfang der 1960er Jahre ziemlich glatt und unverzweigt vor. Nahe an seinem Ursprung befand sich nach dieser Vorstellung *Australopithecus*, der »Südafrika«. Erste Fossilien dieses Affen- oder Vormenschen waren seit Mitte der 1920er Jahre in Südafrika aufgetaucht. Später habe ihn *Homo erectus* abgelöst, der »aufrechte Mensch«, der größer war und bereits ein deutlich umfangreicheres Gehirn besaß. Diese Evolution wäre demnach in Asien abgelaufen, von wo man schon länger Fundorte mit seinen Fossilien kannte. Auch alles Weitere sollte sich nach damaliger Auffassung in Eurasien abgespielt

haben. *H. erectus* habe sich bis nach Europa ausgebreitet, dort sei aus ihm der Neandertaler hervorgegangen – von dem wiederum der moderne Mensch abstammte. Einzig die »robusten« Australopithecinen, die kräftige Kiefer und große Kauzähne gehabt hatten, verwies man auf einen ausgestorbenen Nebenast.

Doch schon in den 1960er Jahren begannen Forscher, immer mehr Aspekte an diesem Ablauf in Frage zu stellen. In Afrika verlagerte sich damals die Hauptaufmerksamkeit der Paläoanthropologen auf die Phase vor über einer Million Jahren vom Süden zum Osten des Kontinents. Louis und Mary Leakey hatten in der Olduvai-Schlucht in Tansania Fossilien weiterer früher Homininen entdeckt, darunter den so genannten *Homo habilis*, den »geschickten Menschen«. Seitdem häuften sich die Fossilfunde im östlichen Afrika.

Die Neufokussierung der Ausgrabungen hatte noch einen anderen Grund. In Südafrika findet man solche Fossilien bis heute gewöhnlich in Höhlen in Dolomitstein, einem magnesiumreichen Karbonatgestein. Dort stoßen die Forscher zwar mitunter auch auf ein einigermaßen gut erhaltenes Skelett – oder sogar mehrere wie jetzt bei Malapa –, doch die meisten der Homininenknochen und -zähne waren offensichtlich Reste von Raubtiermahlzeiten, die später zusammen mit

Unser knorriger Stammbaum

Erdreich in die Höhlen gespült wurden. Dort bildeten sich dabei unordentliche so genannte Talus-Kegel, quasi Geröllhalden, wie man sie aus dem Gebirge kennt. Älteres Material liegt nicht selten in den oberen Schichtungen und umgekehrt. Das macht es schwer, die Fossilien wenigstens nach ihrem Alter zu ordnen. Eine genauere Datierung dieser Sedimente war bis vor Kurzem ohnehin unmöglich. Für einen ersten groben Anhalt untersuchten die Forscher in den frühen 1960er Jahren die oft zahlreichen Tierfossilien in denselben Ablagerungen. An ihnen ließ sich besser erkennen, welches ältere oder neuere Arten waren.

In Ostafrika herrschen völlig andere geologische Verhältnisse. Die dortigen Fundorte liegen in der Nähe des Ostafrikanischen Grabens, der den Kontinent in Nord-Süd-Richtung vom Roten Meer bis über den Malawi-See hinaus durchzieht. Viele der Fossilien lagerten in Sedimenten, die sich einst im Uferbereich von Seen und Flüssen abgesetzt hatten. Diese heute felsigen Schichten zeigen oft die Ausrichtung des Erdmagnetfelds jeweils zur Zeit ihrer Entstehung, was für genaue Messungen ein guter Anhaltspunkt ist. Außerdem war und ist dies eine tektonisch sehr aktive Zone mit zahlreichen tätigen Vulkanen. Die Aschedecken von einzelnen Ausbrüchen erstrecken sich über große Gebiete und eignen sich darum gut zur Zeiteingrenzung wie auch zum überregionalen Abgleich der angrenzenden Schichten – selbst für weit voneinander entfernte Orte.

Die menschliche Ahnengalerie – mit ihren ungeklärten Haupt- und Nebenlinien

Manche der reichsten Fundstätten von Homininen umfassen mehrere Millionen Jahre, darunter etwa das Omo-Turkana-Becken und weiter im Norden das Areal entlang dem Awash River. Von daher lässt sich mitunter der Zeitraum feststellen, über den bestimmte Homininen mindestens hier oder im gesamten Gebiet lebten. Diese Befunde erweisen klar: Allein in Ostafrika gab es von vor vier bis vor einer Million Jahren immer wieder Abschnitte, während deren gleichzeitig zwei oder manchmal sogar noch mehr verschiedene Homininen vorkamen. Nimmt man die Arten aus Südafrika hinzu, ergibt das noch mehr sowie längere Phasen mit mehreren zeitgleichen Spezies.

Fast eine Million Jahre lang (von vor 2,3 bis vor 1,4 Millionen Jahren) lebten zum Beispiel in derselben Region Ostafrikas zwei völlig unterschiedliche Homininen: der »Nussknackermensch« *Paranthropus boisei* und *Homo habilis*. Die beiden Arten müssen sich nicht zwangsläufig am selben Wasserloch begegnet sein. Ihre gleichzeitige Existenz besagt

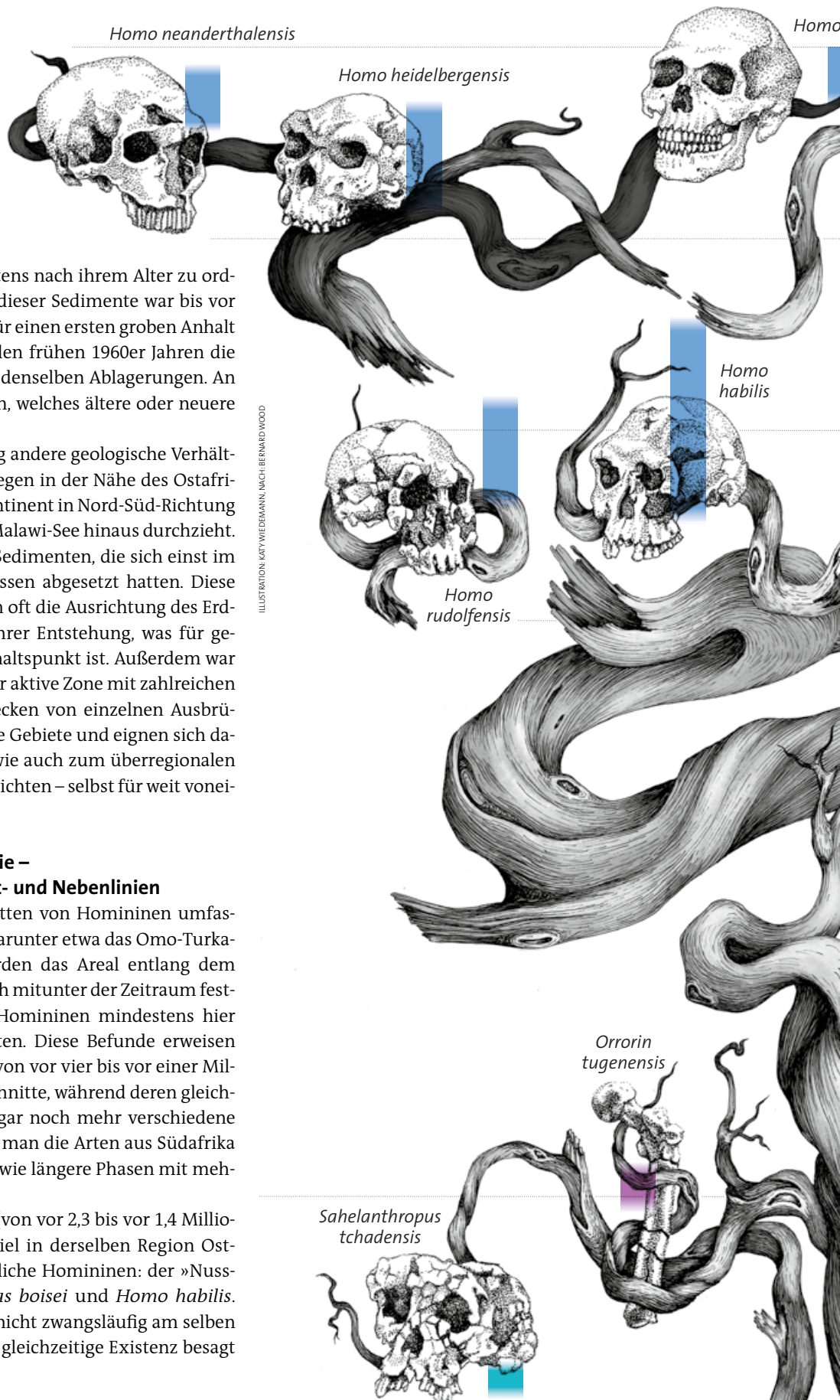
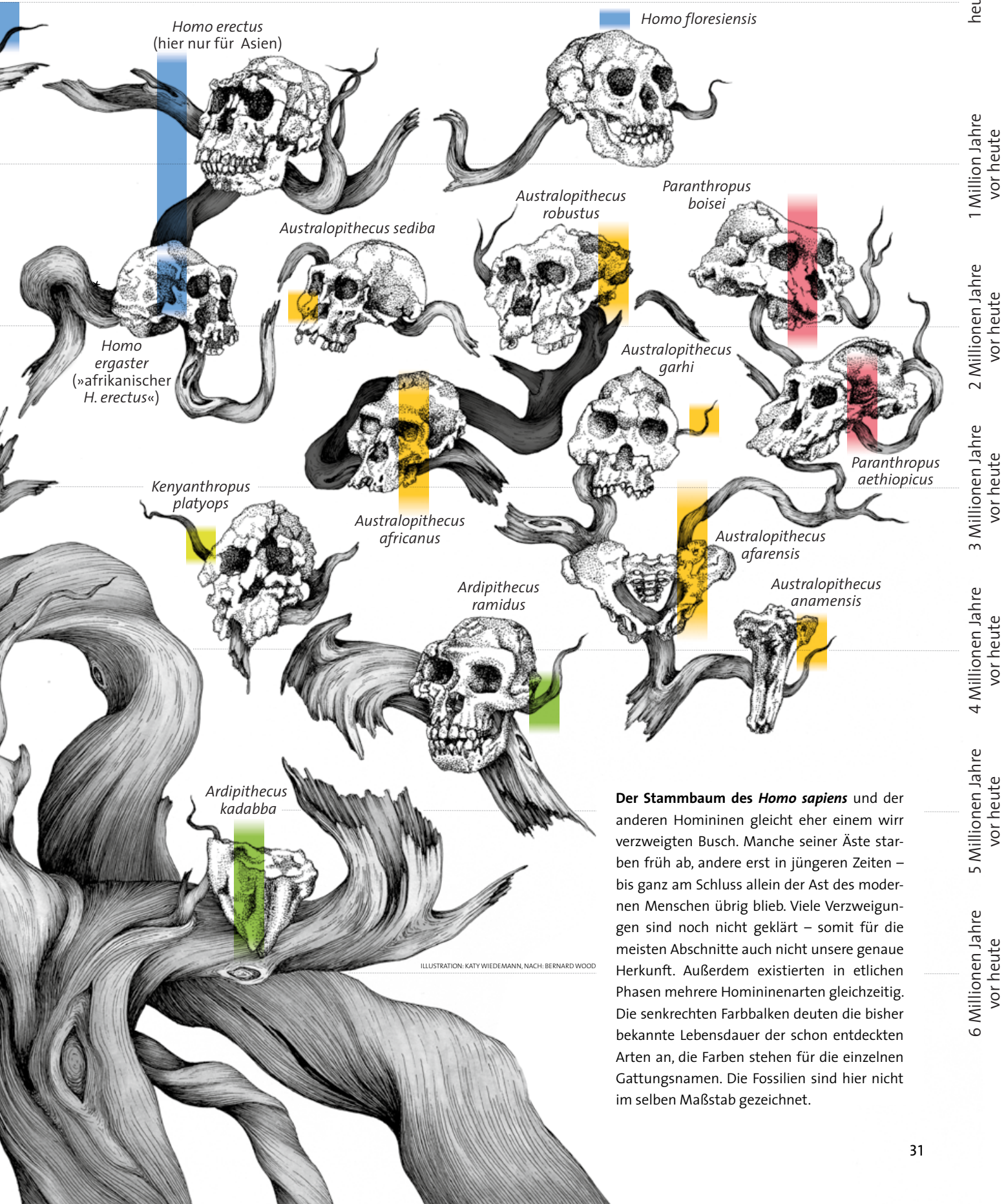


ILLUSTRATION: KATY WIEDEMANN, NACH BERNARD WOOD



heute
 1 Million Jahre vor heute
 2 Millionen Jahre vor heute
 3 Millionen Jahre vor heute
 4 Millionen Jahre vor heute
 5 Millionen Jahre vor heute
 6 Millionen Jahre vor heute

Der Stammbaum des *Homo sapiens* und der anderen Homininen gleicht eher einem wirr verzweigten Busch. Manche seiner Äste starben früh ab, andere erst in jüngeren Zeiten – bis ganz am Schluss allein der Ast des modernen Menschen übrig blieb. Viele Verzweigungen sind noch nicht geklärt – somit für die meisten Abschnitte auch nicht unsere genaue Herkunft. Außerdem existierten in etlichen Phasen mehrere Homininenarten gleichzeitig. Die senkrechten Farbbalken deuten die bisher bekannte Lebensdauer der schon entdeckten Arten an, die Farben stehen für die einzelnen Gattungsnamen. Die Fossilien sind hier nicht im selben Maßstab gezeichnet.

ILLUSTRATION: KATY WIEDEMANN, NACH: BERNARD WOOD

aber, dass mindestens eine von ihnen nicht zu unseren Vorfahren zählte. Angesichts ihres völlig verschiedenen Körperbaus halte ich es kaum für wahrscheinlich, dass die beiden Arten jemals gemeinsame Kinder gezeugt haben. Sie ähnelten sich körperlich viel weniger als später der Neandertaler und der moderne Mensch, die genetischen Vergleichen zufolge begrenzt sexuelle Kontakte hatten. Und falls intime Begegnungen zwischen *P. boisei* und *H. habilis* doch vorgekommen sein sollten, verwischte das die Artunterschiede in der Folge anscheinend praktisch nicht.

Man wird dem Geschehen während der frühen Evolution des Menschen also nicht gerecht, wenn man im Stammbaum für die Homininen einen einzigen geraden und ziemlich glatten Ast vorsieht. Angemessener ist eine krumme Konstruktion mit vielen Verzweigungen – mehr wie bei einem Busch (siehe Bild S. 30/31).

Der *Homo sapiens* und seine früheren Mitmenschen

Ähnliches gilt für die nähere Vergangenheit der Homininen. Auch neben dem *Homo sapiens* existierten offensichtlich noch andere, eigenständige Evolutionslinien. Bei den Neandertalern zum Beispiel erkennen Forscher immer mehr Bereiche, in denen sie sich tatsächlich vom modernen Menschen unterschieden. Heute weiß man, dass sie vor etwa 250 000 Jahren in Eurasien entstanden, während die Evolution des *Homo sapiens* nicht viel später in Afrika erfolgte. Die letzten Neandertaler verschwanden wohl vor rund 30 000 Jahren. Zudem lebte in Asien wahrscheinlich viel länger als ursprünglich angenommen der »asiatische« *Homo erectus*. Einen vierten Homininen der letzten 100 000 Jahre stellt möglicherweise der *Homo floresiensis* dar. Für die Existenz eines fünften, Denisovamensch genannt, sprechen DNA-Befunde von einem 40 000 Jahre alten Fingerknochen aus dem Altaigebirge, der demnach eindeutig nicht von einer der bekannten Arten stammt (siehe SdW 12/2014, S. 68). Und mindestens noch einen weiteren Homininen,

der vor 100 000 Jahren lebte, vermuten Forscher auf Grund von Spuren im Erbgut des modernen Menschen. Vertreter jener »Phantomlinie« müssten sich somit wie die Neandertaler und die Denisovamenschen mit modernen Menschen gepaart haben. Aus all dem folgt: Der menschliche Stammbaum war auch im letzten Abschnitt unserer Evolution wesentlich stärker verzweigt als noch zu Beginn des Jahrtausends vermutet.

Eigentlich sollte ein buschiger Stammbaum gar nicht verwundern. Mehrere nah verwandte Arten zur selben Zeit waren für viele andere Säugetiergruppen oft die Regel. Was insbesondere die frühen Homininen betrifft, gibt es unter den Paläoanthropologen allerdings auch kritische Stimmen. Sie glauben, Forscher würden bei einem neuen Fossilfund manchmal vorschnell von der Entdeckung einer neuen Art sprechen. Trotzdem bin ich davon überzeugt, dass es wirklich nebeneinander etliche Spezies von Homininen gab, wir es hier also mit einem realen Phänomen zu tun haben.

Für diese These lassen sich weitere Argumente anführen. Zum einen haben Paläontologen allen Grund anzunehmen, dass die uns bekannten Fossilien die wahre Artenzahl zu einer gegebenen Zeit stets unvollständig spiegeln. Des Weiteren sind selbst in der heutigen Tierwelt zwei ähnliche, aber unbestritten verschiedene Spezies allein anhand von Knochen und Zähnen oft nicht auseinanderzuhalten. Und schließlich existieren von den meisten Säugetieren der Phase von vor drei bis vor einer Million Jahren heute keine Nachfahren mehr. Warum sollte das alles nicht auch für die Homininen gelten?

Falls also bei ihnen Vielfalt herrschte – durch welche Faktoren, oder Evolutionszwänge, kam sie wohl zu Stande? Das Klima dürfte zu den wichtigsten Einflüssen gehört haben, da sich Lebensräume bei klimatischen Veränderungen oft stark wandeln. Über den hier betrachteten Zeitraum wurde es pauschal gesagt kühler und trockener, wobei allerdings im Rahmen des Gesamttrends ziemlich regelmäßig auch immer wieder heißere, feuchtere Abschnitte auftraten. Solche Schwankungen dürften sich auf die Homininen vielfältig ausgewirkt haben. Ein bestimmter Körperbau, eine Ernährungsweise oder Art der Fortbewegung, die zu einer Zeit gut passten, waren zu einer anderen womöglich weniger ideal.

Auch Konkurrenz schafft Selektionsdruck. Teilen zwei nah verwandte Arten denselben Lebensraum, stärkt das die evolutionäre Tendenz, sich möglichst deutlich voneinander abzuheben. Die Arten können dann in unterschiedliche ökologische Richtungen drängen, so dass sie sich quasi aus dem Weg gehen. Mit einem solchen Anpassungsdruck könnte sich beispielsweise das völlig verschiedene Gebiss und damit die unterschiedliche Ernährungsweise von *P. boisei* und *H. habilis* erklären. Der eine bevorzugte harte, faserreiche Nahrung wie Gräser, der andere verlegte sich auf weichere Kost, die allerdings schwerer zu beschaffen war: Früchte sowie ge-





Schädel des »Turkana-Jungen«: Am Turkana-See in Kenia wurden Schädel und Skelett eines Jungen geborgen, der vor 1,6 Millionen Jahren lebte. Die Art, früher dem *Homo erectus* zugeordnet, wird heute meist als *Homo ergaster* bezeichnet. Noch zu dieser Zeit existierten in Afrika Australopithecinen.

legentlich Fleisch oder Knochenmark. In diesem Sinn wäre für die Homininen ebenso vorstellbar, dass kulturelle Unterschiede zwischen zwei Gruppen, die einander begegnen konnten, stärker wurden. Sexuellen Kontakten hätten die jeweils anderen Gewohnheiten und Einstellungen dann eher entgegengestanden.

Einige Verwandtschaftsverhältnisse von Homininen der jüngeren Vergangenheit untereinander und zum *Homo sapiens* ließen sich bereits molekulargenetisch erhellen. Für die älteren Fossilien gilt das nicht. Bei ihnen können wir deswegen bislang nie sicher sein, ob ein Fund zur Linie unserer direkten Ahnen gehört oder nicht. Selbst gleiche Kiefer oder Zähne bei zwei Fossilfunden müssen nicht zwangsläufig bedeuten, dass diese Individuen noch vor Kurzem einen gemeinsamen Vorfahren hatten oder einer aus dem anderen hervorging. Manch eine Übereinstimmung entstand nur in einer ähnlichen Umwelt, ganz unabhängig voneinander. Aus der Biologie weiß man: Die Möglichkeiten, Körperbau und Physiologie zu verändern, sind begrenzt. Für die gleiche ökologische Herausforderung gibt es deswegen nicht beliebig viele Lösungen. Auch in der Paläoanthropologie können ähnliche Merkmale bei zwei Arten die Forscher unter Umständen in die Irre führen.

Ich bin skeptisch, ob es früher oder später gelingen wird, unsere direkten Vorfahren zu identifizieren. Nach meiner Prognose werden sich die Verhältnisse nicht einmal dann einfacher darstellen, wenn wir mehr als vier Millionen Jahre zurückgehen. Auch damals dürfte bei den Vormenschen eine beträchtliche Diversität an Arten und Evolutionslinien geherrscht haben. Die entsprechenden Fossilien sind nur noch nicht aufgetaucht, unter anderem weil Forscher insgesamt weniger danach gesucht und längst nicht so viele passende geologische Formationen gründlich erkundet haben wie von späteren Evolutionsabschnitten. Solch eine Suche ist auf jeden Fall äußerst mühsam, schon weil Homininenüberreste zu den seltensten Säugetierfossilien zählen. Um auf welche zu stoßen, muss man Unmengen an Antilopen- und Schweineknöcheln durchmustern. Aber eine große, gemeinsame Anstrengung vieler Forscher sollte Erfolg bringen.

Mit weiteren Arten früher Homininen rechne ich schon deswegen, weil von anderen Säugetiergruppen vor über drei Millionen Jahren fast genauso viele Linien existierten wie später. Warum sollten die Vormenschen hierbei eine Ausnahme darstellen? Außerdem überdecken die bisherigen Fundorte höchstens drei Prozent von Afrika. Sollten dort alle frühen Arten vorkommen, wäre das höchst verwunderlich.

Wahrscheinlich wird jedes neue, über vier Millionen Jahre alte Fossil uns den Überblick über unsere Herkunft weiter erschweren. Je näher man der Aufgabelung der menschlichen und der Schimpansen-Bonobo-Linie kommt, desto weniger klar ist vermutlich, ob man ein Stück von einem der ersten Homininen vor sich hat, ein Fossil von einem Schimpansen- und Bonobovorfahren oder vielleicht sogar das Fragment eines Repräsentanten einer längst verschwundenen Entwicklungslinie.

Übrigens: Trotz aller hier geäußerten Bedenken halte ich daran fest, dass die Skelette von Malapa von direkten Vorfahren des *Homo sapiens* stammen. Die paläoanthropologische Forschung wird immer schwieriger – in meinen Augen aber dadurch auch immer spannender. ~

DER AUTOR



Bernard Wood ist Professor an der George Washington University in Washington, D.C. Bevor er zur Paläoanthropologie wechselte, arbeitete er als Anatom und Arzt. Schon als Medizinstudent nahm er 1968 an einer Expedition des Paläoanthropologen Richard Leakey in Nordkenia teil.

QUELLEN

Callaway, E.: Fossils Raise Questions about Human Ancestry. In: Nature online, 8. Sept. 2011

Wood, B.: Human Evolution: Fifty Years after *Homo habilis*. In: Nature 508, S. 31–33, 2014

What Does It Mean to Be Human? Smithsonian Institution's National Museum of Natural History: <http://humanorigins.si.edu>

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1319583

Jenseits von Neptun

Erstmals treffen Sonden auf Objekte des Kuipergürtels – einer eisigen Region jenseits des Planeten Neptun, in der auch Pluto seine Bahn zieht. Diese Begegnungen ermöglichen einmalige Einblicke in die Entstehungsgeschichte unseres Sonnensystems.

Von Michael D. Lemonick

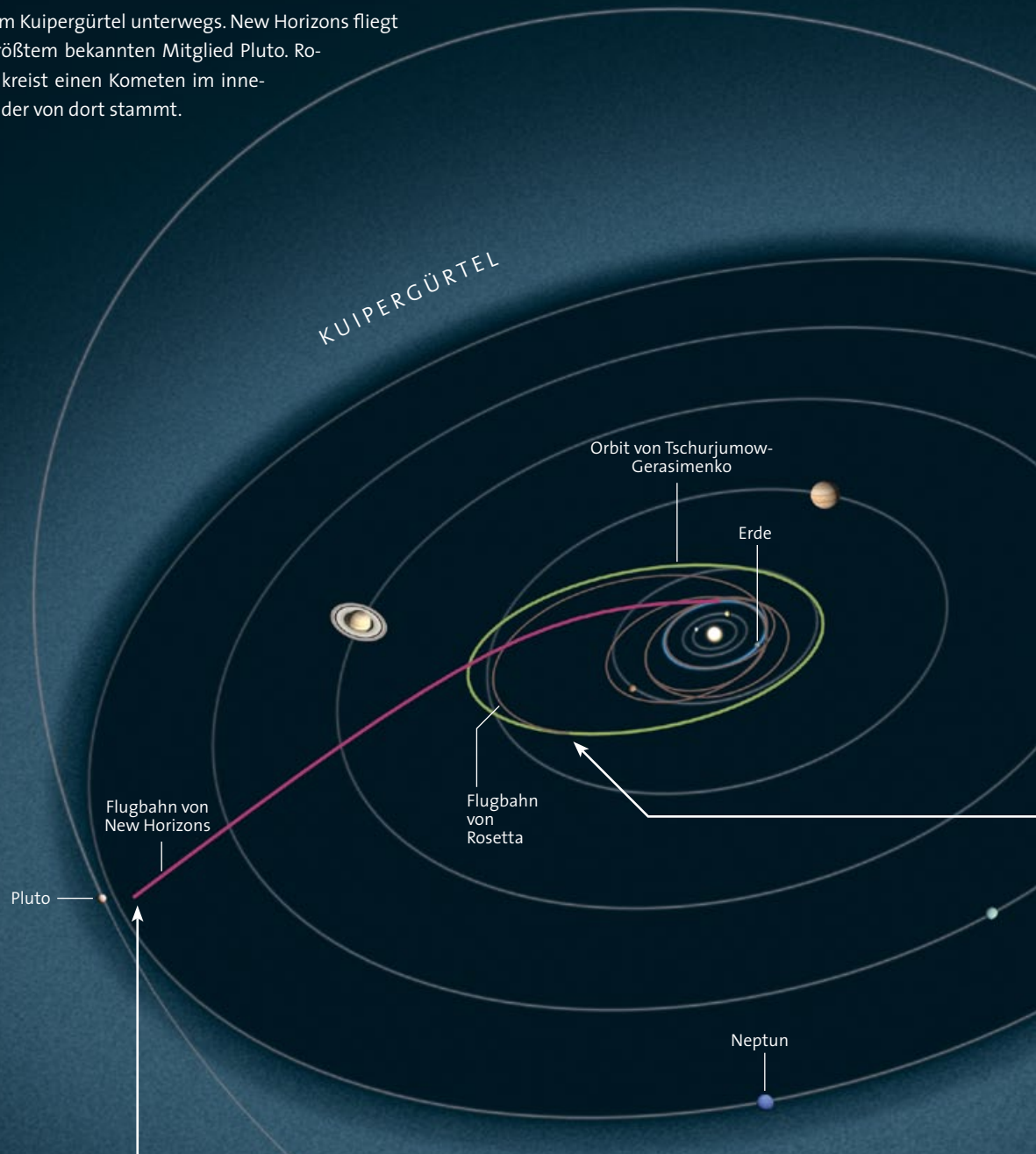
Der 20. Januar 2014 war ein aufregender Tag für die Forscher der Rosetta-Mission. Bereits zehn Jahre lang war die drei Tonnen schwere Raumsonde der europäischen Weltraumorganisation ESA unterwegs – auf dem Weg zu einem Rendezvous. Partner des geplanten Treffens: ein Komet, benannt nach seinen ukrainischen Entdeckern 67P/Tschurjumow-Gerasimenko. 31 Monate zuvor, im Juni 2011, mussten die ESA-Ingenieure die Sonde in einen Energie sparenden Ruhezustand versetzen. Nun würde sie aufwachen, um sich auf ihre Begegnung mit dem Kometen vorzubereiten.

Um 11 Uhr mitteleuropäischer Zeit an jenem Tag sollte ein elektronischer Wecker an Bord der Sonde die Systeme automatisch wieder in Betrieb nehmen. Die Wissenschaftler und Techniker in einem Kontrollraum des European Space Operations Centre ESOC in Darmstadt waren zuversichtlich, dass sich das Raumfahrzeug wie geplant melden würde. Dennoch weckte die Situation Erinnerungen an den Mars Observer der US-Raumfahrtbehörde NASA. Zu diesem war 1993 der Funkkontakt abgebrochen, vier Tage bevor er in die Umlaufbahn um den Roten Planeten einschwenken sollte. Er wurde nie wieder hergestellt.

Weit entfernt von den Bahnen der Planeten kreisen zahllose Kleinkörper und eisige Zwergplaneten wie Pluto um die Sonne – noch nahezu unerforscht.

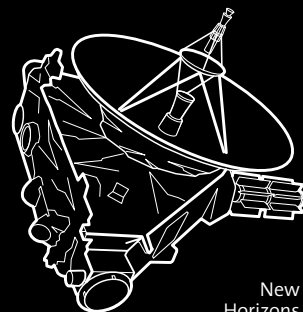
Zwei Missionen erforschen den Kuipergürtel

Die Raumsonden **New Horizons** und **Rosetta** sind auf verschiedenen Bahnen zu Objekten aus dem Kuipergürtel unterwegs. New Horizons fliegt direkt zu dessen größtem bekannten Mitglied Pluto. Rosetta hingegen umkreist einen Kometen im inneren Sonnensystem, der von dort stammt.



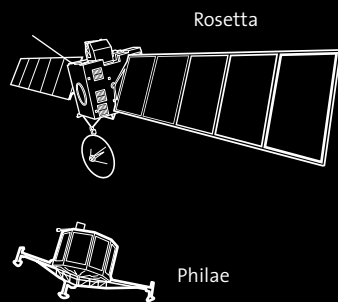
Wir besuchen den Kuipergürtel: Mission New Horizons

2006 startete die NASA-Sonde in Richtung Pluto und wird im Juli 2015 an dem Zwergplaneten und seinem Mond vorbeifliegen. Mit den Instrumenten an Bord fertigen die Astronomen Aufnahmen beider Himmelskörper an, ergründen die chemische Zusammensetzung und die Geologie ihrer Oberflächen und untersuchen Plutos dünne Atmosphäre. Danach fliegt die Sonde tiefer in den Kuipergürtel hinein. Ihre Energieversorgung dafür reicht noch mindestens weitere zehn Jahre.



Der Kuipergürtel besucht uns: Mission Rosetta

Nach zehnjährigem Flug erreichte im August 2014 die europäische Raumsonde den Kometen Tschurjumow-Gerasimenko. Seitdem begleitet sie ihn, und die ESA-Forscher verfolgen mit zahlreichen Instrumenten, was passiert, während der gefrorene Himmelskörper langsam der heißen Sonne nahekammt. Mit der Landeeinheit Philae gelangen außerdem zahlreiche detaillierte Untersuchungen unmittelbar auf der Oberfläche. Ursprünglich kommt der Komet aus dem Kuipergürtel. Vermutlich schleuderte ihn einst ein anderer Körper ins innere Sonnensystem.



Ein paar Minuten lang machte sich im Kontrollraum die Furcht breit, Rosetta könnte ein ähnliches Schicksal beschieden sein. »Ich sah eine Menge bleicher Gesichter«, erinnert sich Holger Sierks vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Göttingen, der für die Hauptkamera der Sonde verantwortlich ist. Eine gefühlte Ewigkeit dauerte es, bis das erlösende »Ping« von jenseits der Jupiterbahn endlich Darmstadt erreichte. »Die Sonde sendete das lang ersehnte Lebenszeichen, und wir alle waren wahnsinnig erleichtert«, so Sierks.

In den darauf folgenden Wochen zeigte sich, dass Rosetta nicht nur wach war, sondern darüber hinaus voll funktionsfähig. Damit war sie bereit, den Forschern entscheidende Informationen über den Aufbau, die Zusammensetzung und das Verhalten des Zielkometen zu liefern – eines Himmelskörpers, der sich seit der Entstehung des Sonnensystems vor 4,6 Milliarden Jahren kaum verändert hat. Wie geplant erreichte Rosetta dann im August 2014 den Kometen und umkreist ihn seitdem. Im November stand dann ein weiteres Novum bevor: Der kleine Lander Philae ging auf dem Kometenkern nieder. Mit ihm sammelten die ESA-Forscher zusätzliche Daten direkt von der Oberfläche.

Mit der Erkundung von Rosetta versuchen die Forscher, in die Frühgeschichte des Sonnensystems vorzustoßen – und sie ist nicht die einzige Mission mit diesem Zweck. Nach neunjähriger Reise fliegt im Juli 2015 die Raumsonde »New Horizons« der NASA an Pluto und seinen fünf bekannten Monden vorbei. Erstmals in der Raumfahrtgeschichte wird es möglich sein, die Oberfläche dieses weit entfernten Himmelskörpers aus der Nähe zu erforschen.

»New Horizons ist in einem äußerst guten Zustand«, freut sich Alan Stern vom Southwest Research Institute in Boulder, der leitende Wissenschaftler der US-amerikanischen Mission. Obwohl die beiden Ziele von ESA und NASA voneinander unabhängig sind, stehen sie doch in enger Beziehung. Sowohl Pluto als auch Tschurjumow-Gerasimenko stammen aus dem so genannten Kuipergürtel, einem riesigen, bislang nahezu unerforschten Schwarm von vermutlich Milliarden von Objekten jenseits der Neptunbahn. Sie messen wenige Meter bis hin zu tausenden Kilometern.

Die Missionen führen eine Serie von Entdeckungen fort, die in den zurückliegenden Jahrzehnten »alles über den Haufen warfen, was wir bis dahin über die Architektur des Son-

AUF EINEN BLICK

PLANETARER BAUSCHUTT

- 1 Außerhalb von Neptuns Bahn kreisen Milliarden **Felsbrocken**, die noch aus der **Frühzeit der Planetenentstehung** stammen.
- 2 Zu solchen kosmischen Fossilien waren die zwei **Raumsonden Rosetta** und **New Horizons** rund zehn Jahre unterwegs.
- 3 Diese Missionen helfen, viele offene Fragen zu beantworten – möglicherweise sogar, wie **Wasser** und **Bausteine des Lebens** auf unsere Erde kamen.

nensystems zu wissen glaubten«, so Stern. Tatsächlich war bis in die 1990er Jahre noch wenig über die tatsächliche Beschaffenheit des Kuipergürtels bekannt. Erst dann spürten die Astronomen dort immer mehr Objekte auf: eisige Welten, von denen einige sogar ähnlich groß sind wie Pluto.

Die Astronomen fanden auch Hinweise darauf, dass sich die Bahnen von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun einst radikal neu geordnet haben könnten. Vielleicht ist dabei sogar ein fünfter Gasriese verloren gegangen. Die Forscher analysierten die Größen und die Umlaufbahnen der etwa 1500 bekannten Kuipergürtelobjekte (kurz KBOs für Kuiper Belt Objects), um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie diese Region entstanden ist – und ob dabei Eis ins Innere des Sonnensystems fiel und die Ozeanbecken der jungen, noch trockenen Erde füllte.

Diese Beobachtungen liefern ein erstes Bild der Struktur, der Zusammensetzung und der Entwicklung des Kuipergürtels. Die Begegnung zweier Raumsonden mit zwei ganz unterschiedlichen Objekten aus diesem Bereich des äußeren Sonnensystems wird, so hoffen die Astronomen, dieses Bild dramatisch verbessern.

Zuwachs fürs Sonnensystem

Als der junge US-amerikanische Astronom Clyde Tombaugh 1930 einen zuvor unbekanntem Himmelskörper jenseits der Neptunbahn aufspürte, glaubten er und seine Kollegen in aller Welt, es handle sich um den lang gesuchten »Planeten X«. Forscher vermuteten schon seit Jahrzehnten einen weiteren Himmelskörper im Sonnensystem, denn anscheinend beeinflusste irgendetwas die Bahnen der bekannten äußeren Planeten. Erste Berechnungen lieferten für Pluto, dessen Name auf den Vorschlag einer elfjährigen Schülerin zurückgeht, eine Masse ähnlich jener der Erde. In den 1970er Jahren war jedoch klar, dass Pluto kleiner und wesentlich masseärmer als selbst der Mond der Erde ist. Tombaugh hatte tatsächlich das hellste Mitglied des Kuipergürtels gefunden.

Das jedoch erkannten die Planetenforscher erst viel später. Zwar vermutete der irische Astronom Kenneth Edgeworth bereits in den 1940er Jahren einen Schwarm kleiner Himmelskörper jenseits der Neptunbahn. Aber sein Vorschlag war sehr allgemein gehalten und fand damals keinen Widerhall. Für Michael Brown vom California Institute of Technology war es keine echte Vorhersage. 2005 spürte Brown die etwa plutogroße Eris auf. Diese Entdeckung führte ein Jahr später dazu, dass die Internationale Astronomische Union Pluto vom Status eines Planeten zum Zwergplaneten degradierte.

Unabhängig von Edgeworth untersuchte auch der in die USA emigrierte Niederländer Gerard Kuiper in den 1950er Jahren die Idee, jenseits der Neptunbahn könnten zahlreiche eiskalte Körper kreisen. Aus der Masse Plutos, die zu jener Zeit noch überschätzt wurde, zog Kuiper jedoch den Schluss, dass dieser Himmelskörper die kleineren Objekte längst in weiter entfernte Regionen des Alls abgelenkt hätte. Im Bereich von Plutos Bahn sollte es demnach weit gehend leer

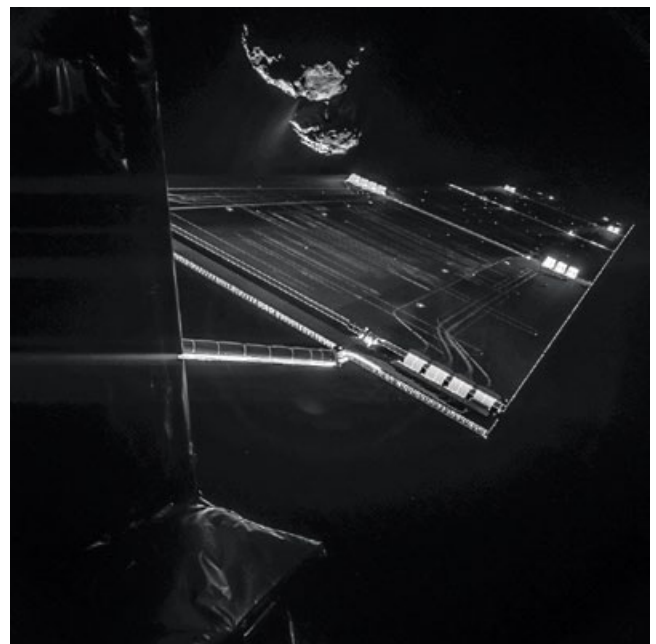
sein. Ausgerechnet die Vorhersage des späteren Namensgebers hätte unzutreffender nicht sein können.

Etwa zeitgleich entwickelte der niederländische Astronom Jan Oort die Vorstellung, unser Sonnensystem sei in einer Entfernung von bis zu einem Lichtjahr in eine große, sphärische Wolke aus Protokometen eingehüllt. Dann und wann löse sich eines der Objekte und falle in das innere Sonnensystem, wo es durch die Sonnenstrahlung als aktiver Komet in Erscheinung trete. Dieses Szenario bietet eine gute Erklärung für die langperiodischen Kometen mit Umlaufzeiten von mehr als 200 Jahren, die gleichmäßig aus allen Richtungen einfallen.

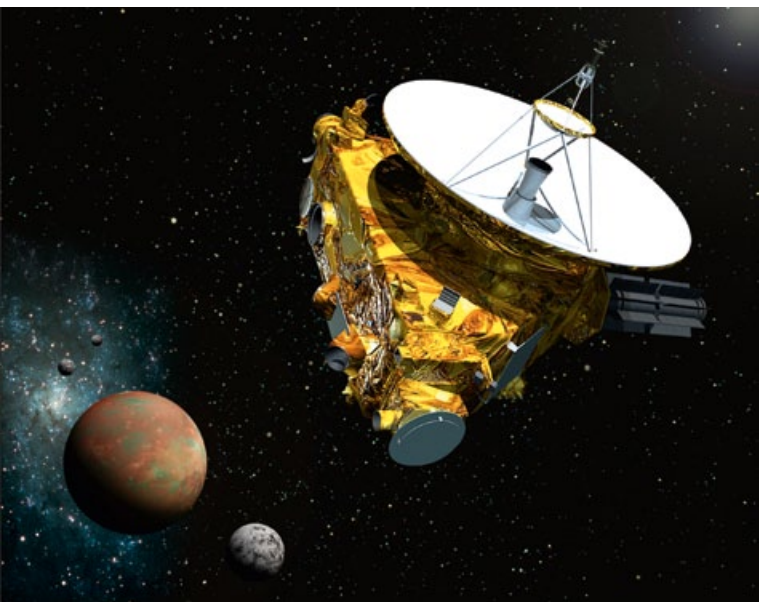
Allerdings passt dies nicht zu den kurzperiodischen Kometen, die sich zumeist in derselben Ebene bewegen wie die Planeten. Oort war der Auffassung, es handle sich hierbei lediglich um ursprünglich langperiodische Körper mit einer großen Umlaufbahn um die Sonne. Diese sollten durch Begegnungen mit den Riesenplaneten in ihre engeren Bahnen gelangt sein. Lange Zeit schien das die beste Erklärung.

Die meisten Planetenforscher stimmen heute darin überein, dass der Uruguayer Julio Fernández mit einer Veröffentlichung im Jahr 1980 erstmalig konkret die Existenz eines Kometengürtels jenseits von Neptun vorhergesagt hatte. Seine detaillierte Analyse geht weit über die Arbeit von Edgeworth hinaus, fand aber zunächst ebenfalls kaum Beachtung.

Erst als 1988 Scott Tremaine, damals an der kanadischen University of Toronto tätig, mit seinen Kollegen Martin Duncan und Tom Quinn zeigte, dass der von Fernández postu-



Eine Kamera an Bord der Landeeinheit Philae – zu diesem Zeitpunkt noch im Schlepptau von Rosetta – fertigte im Oktober 2014 diese Aufnahme ihres etwa vier Kilometer großen Zielkometen und von Rosettas Solarmodul an. Die europäische Raumsonde begleitet den Körper aus Felsen und Eis weiter, bis er im Sommer 2015 seine größte Annäherung an die Sonne hinter sich hat.



PHILIPPE SWIRI

Im Juli 2015 erreicht die NASA-Raumsonde New Horizons Pluto und seinen Mond Charon, über deren Aussehen Astronomen bislang, wie in dieser Illustration, nur spekulieren können.

lierte Schwarm tatsächlich die Häufigkeit und die Bahnen der kurzperiodischen Kometen erklären kann, setzte sich die Idee durch. Tremaine war es auch, der den Begriff »Kuipergürtel« prägte – ein Fehler, wie der Astrophysiker, der heute in Princeton forscht, inzwischen meint: »Wir hätten den Gürtel eigentlich nach Fernández benennen sollen.«

Während Tremaine, Duncan und Quinn noch die theoretische Basis für den Kuipergürtel festigten, spürten David Jewitt, ein Pionier der Erforschung des äußeren Sonnensystems, und seine Studentin Jane Luu am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge schon handfeste Beweise auf. Dabei waren es gar nicht die Vorhersagen, die ihre Suche motivierten: Jewitt und Luu kannten die Arbeit von Fernández nicht einmal, und sie starteten ihre Suche zwei Jahre bevor Tremaine und dessen Kollegen ihre Ergebnisse publizierten. »Was uns ermunterte und motivierte, war einfach die Idee, dass es seltsam wäre, wenn das äußere Sonnensystem so leer wäre«, erinnert sich Jewitt.

Sie sollten Recht behalten. Im August 1992 fanden Jewitt und Luu am Mauna-Kea-Observatorium auf Hawaii mit »(15760) 1992 QB1« das erste KBO. Sechs Monate später folgte das zweite. Damals waren Jewitt und Luu noch die einzigen, die so systematisch suchten, »doch die astronomische Gemeinschaft reagierte schnell«, sagt Jewitt.

Inzwischen haben Astronomen etwa 1500 KBOs identifiziert. Die Forscher schätzen grob, dass es im Kuipergürtel etwa 100 000 Objekte mit Durchmessern von mehr als 100 Kilometern gibt, und 10 Milliarden, die mehr als zwei Kilometer groß sind. »Auf jeden Asteroiden im Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter kommen 1000 Objekte im Kuipergürtel«, so Jewitt. »Ich finde das atemberaubend.«

Viele Astronomen sind allerdings eher erstaunt darüber, was im Kuipergürtel alles nicht existiert. Gemäß den derzeit besten Modellen für die Planetenentstehung sollten dort auch erdgroße oder sogar noch größere Objekte zu finden sein. Doch während die Forscher eine ganze Reihe von Himmelskörpern mit ähnlichen Maßen wie Pluto entdeckten – sie tragen Namen wie Makemake, Haumea, Quaoar und Eris – kommt kein KBO an die Ausmaße der inneren Planeten heran. »Es gibt dort zwar eine große Zahl von Objekten«, wundert sich Jewitt, »doch ihre Massen ergeben zusammen gerade einmal ein Zehntel der Erdmasse. Das ist ziemlich mickrig.« In der Frühzeit des Sonnensystems muss irgendetwas passiert sein, was die größten Mitglieder des Kuipergürtels herauskatapultiert hat. Seit vielen Jahren debattieren die Astronomen über mögliche Ursachen – mit Rosetta und New Horizons können die Forscher nun endlich Antworten erwarten.

Rätselhafter Riesenmangel

Als der Kuipergürtel entdeckt wurde, hatten die Wissenschaftler bereits eine klare Vorstellung davon, wie unser Sonnensystem entstand. Alles begann mit einer gewaltigen interstellaren Wolke aus Gas und Staub, die zu einer rotierenden Scheibe kollabierte. Im Zentrum zog die Schwerkraft die Materie so stark zusammen, dass Dichte und Temperatur ausreichten, um Atomkerne zu fusionieren: Die Sonne war geboren. Ihre Hitze und Strahlung trieben das meiste Gas und einen Teil des Staubs nach außen. Weiter innen bildeten sich aus dem Staub zunächst Steinchen, daraus immer größere Felsbrocken und schließlich Planetesimale, asteroidengroße Planetenbausteine.

Diese formten wiederum hunderte marsgroße Objekte, die herumschwirrten, zusammenstießen, sich gegenseitig zertrümmerten und wieder miteinander verschmolzen. Aus ihnen entstanden zuletzt die heutigen Planeten – nicht nur die felsigen inneren, sondern auch die Gasplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Diese Riesen bildeten sich möglicherweise aus großen felsigen Kernen, die gewaltige Mengen an Gas aus der Umgebung ansammelten.

Jenseits der Neptunbahn bestand das Baumaterial hauptsächlich aus Eispartikeln, aus denen ähnliche Prozesse ebenfalls planetengroße Objekte gebildet haben sollten. Doch bei diesem Szenario gibt es zwei Probleme. Erstens beobachten Astronomen keine entsprechenden Körper in dieser Region. Dennoch betont Brown, dass es in der Oort'schen Wolke durchaus ein paar marsgroße Planeten geben könnte und wir mit der heutigen Technik nur nicht in der Lage wären, diese zu entdecken. Zweitens jedoch ist im Kuipergürtel zu wenig Material vorhanden, um überhaupt die Existenz von Objekten irgendeiner Größe zu erklären. Stellt man sich die Materie aller KBOs verteilt auf eine Eispartikelwolke vor, so wäre darin die Dichte viel zu gering. Sie hätte gar nicht erst verklumpen können.

Die Existenz des Kuipergürtels steht also im Widerspruch dazu, wie die Forscher glauben, dass er entstanden sein muss. »Die beste allgemein akzeptierte Lösung ist, dass es anfangs

sehr viel mehr Materie im Kuipergürtel gab«, erläutert Jewitt. »Das könnten sogar 30 bis 50 Erdmassen gewesen sein.« Daraus bildete sich ein gigantischer Schwarm von Objekten, der sich dann irgendwie mit der Zeit verkleinerte.

Den bislang plausibelsten Mechanismus dafür schlug Renu Malhotra von der University of Arizona vor. Die Bahnen der vier Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun lagen demnach ursprünglich sehr viel enger beieinander als heute. Die gravitative Wechselwirkung zwischen diesem engen Planetenbündel und der ursprünglichen Ansammlung von KBOs trieb Saturn, Uranus und Neptun nach außen, während Jupiter im Zusammenspiel mit dem Asteroidengürtel nach innen wanderte.

Der gegenseitige Einfluss hätte nicht nur die Planetenbahnen verändert, sondern auch viele KBOs in weit entfernte Regionen des Sonnensystems katapultiert und so die Oortsche Wolke erschaffen. Inzwischen fanden sich Jupiter und Saturn für einige Zeit in einer so genannten Bahnresonanz wieder: Die Umlaufzeit von Saturn betrug gerade das Doppelte derjenigen von Jupiter. Dies verstärkte den gravitativen Einfluss beider Planeten enorm und riss 99 Prozent der KBOs aus ihren Bahnen. Ein Teil davon gelangte in die Oortsche Wolke. Viele jedoch drangen auch in das innere Sonnensystem ein und stürzten auf die terrestrischen Planeten. »Das Sonnensystem bekam eine ordentliche Tracht Prügel«, formuliert es Jewitt.

David Nesvorný vom texanischen Southwest Research Institute geht noch einen Schritt weiter: Das Sonnensystem besaß seiner Ansicht nach ursprünglich noch einen fünften Gasriesen, der während der heftigen Neuordnung der Planetenbahnen in den interstellaren Raum geschleudert wurde.

Wenn das alles tatsächlich so stattgefunden hat, erklärt dieser Prozess das Fehlen großer Objekte im Kuipergürtel. Die Materie, aus der sie hätten entstehen können, wurde zu früh hinausgesogen. Die Objekte, die sich dann noch bilden konnten, ähnelten Planetesimalen, den Bausteinen der großen Planeten. In dieser Theorie ist der Kuipergürtel also eine Art Schnappschuss. Er zeigt, wie auch das innere Sonnensystem ausgesehen hat, wenige Millionen Jahre nachdem sich allmählich die ersten Planeten bildeten.

»Bei der Frage, wie die heutigen Planeten entstanden, liegt die größte Unsicherheit bei den Planetesimalen«, erläutert Hilke Schlichting vom Massachusetts Institute of Tech-

nology. »Wir wissen nicht genau, wie sie sich formten und wie groß sie waren.« Im inneren Sonnensystem ist jeder Hinweis darauf lange verschwunden. Doch die Planetenforscherin und ihre Kollegen kombinierten Modellrechnungen mit der beobachteten Größenverteilung der KBOs. So ermittelten sie, dass die eisigen Planetesimale des Kuipergürtels etwa einen Kilometer groß gewesen sein mussten. Dieses Ergebnis könnte auch auf das frühe innere Sonnensystem zutreffen. »Jahrzehntelang konnten wir nur spekulieren. Jetzt beginnen wir wirklich etwas über die Anfangsbedingungen der Planetenentstehung zu lernen«, so Schlichting.

Pluto in Nahaufnahme

Modelle und Beobachtungen aus der Ferne lieferten den Forschern also bereits viele Informationen über die Struktur und die vermutliche Entstehungsgeschichte des Kuipergürtels. Jedoch ersetzen sie nicht Beobachtungen und Messungen aus der Nähe. Das zeigt die Erfahrung mit zahlreichen Raumsonden, die Planeten, Monde und Asteroiden besuchten. »Die Hubble-Aufnahme von Pluto ist nett«, sagt Stern, »aber sie ist nur ein paar Pixel groß. Bald kommt Pluto endlich als reale Welt auf uns zu.«

Stern und seine Kollegen wollen so viel wie möglich lernen, wenn New Horizons im Juli 2015 mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 000 Kilometern pro Stunde in knapp 10 000 Kilometer Abstand über Plutos gefrorene Oberfläche hinwegrast. Ein Ziel der Forscher ist, die Zahl und die Größe der Einschlagkrater darauf zu bestimmen. Mit diesen Daten können sie wiederum die Größenverteilung der KBOs errechnen.

Darüber hinaus liefern die Krater sogar noch mehr Informationen, wie Stern hervorhebt. Denn während seiner elliptischen Bahn schwanken die Temperaturen an Plutos Oberfläche stark, was zusammen mit seiner dünnen Atmosphäre die Einschlagspuren verwittern lässt. Charon, der größte Mond Plutos, hat dagegen keine Atmosphäre, und seine Krater haben sich unverändert erhalten. »Wir können die beiden Oberflächen also vergleichen«, so Stern, »und daraus lernen, wie sich die Einschläge im Lauf der Zeit veränderten – das heißt, welche Größe die Projektile heute im Vergleich zum frühen Kuipergürtel haben.«

New Horizons soll auch Ausschau nach einem Ozean halten, der unter der Oberfläche Plutos verborgen sein könnte. Die Planetenforscher fanden solche Ozeane bereits unter den dicken Eispanzern einiger Jupiter- und Saturnmonde: Europa, Ganymed, Enceladus und Titan. Sollte Pluto Eisgeysire oder Kryovulkane besitzen, wäre dies ein Hinweis auf ein warmes, feuchtes Inneres des Zwergplaneten, aufgeheizt beispielsweise durch radioaktive Zerfälle in seinem felsigen Kern. Selbst wenn solche vergleichsweise offensichtlichen Wärmequellen fehlen, können die Wissenschaftler mit den Infrarotkameras der Sonde warme Regionen auf der Oberfläche aufspüren. Die Vorstellung, es könne Leben im Inneren Plutos geben, ist sicher vollkommen spekulativ. Dennoch würde die Entdeckung von flüssigem Wasser selbst solche Gedanken legitimieren.

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

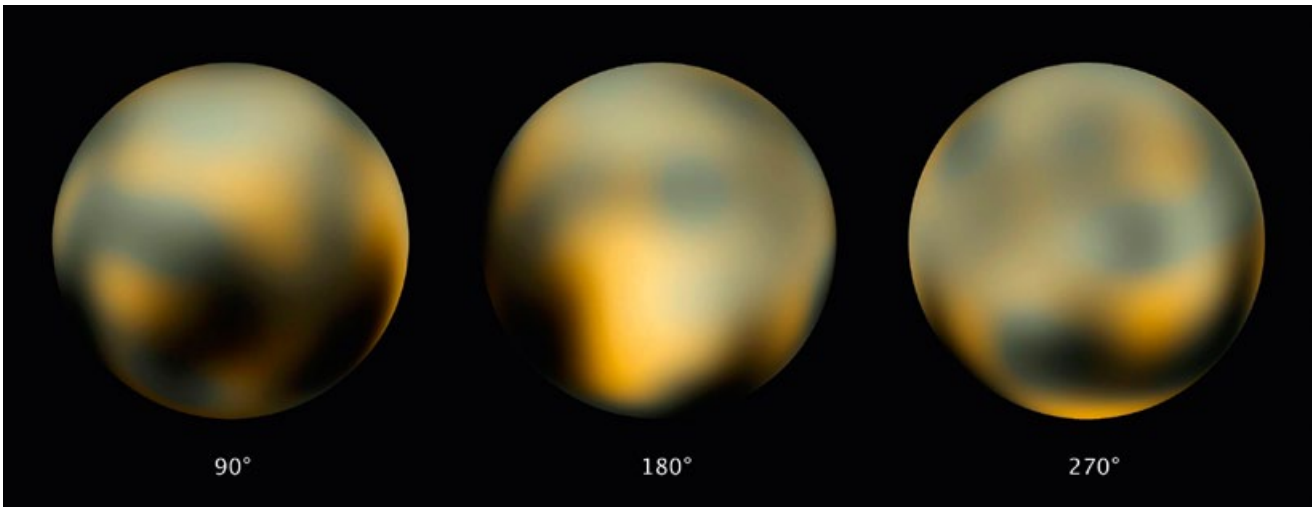
Unser Online-Dossier zum Thema »Rosetta« finden Sie unter



www.spektrum.de/rosetta



ESA / ROSETTA / PHILAE / CNES



NASA / ESA / MARC W. BUJE, SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE (SWRI)

Die besten Aufnahmen von Pluto stammen bisher vom Weltraumteleskop Hubble. Die noch sehr verschwommenen und mit aufwändigen Computerberechnungen optimierten Bilder zeigen die verschiedenen helle Oberfläche des Zwergplaneten zu unterschiedlichen Zeitpunkten während seiner Rotation.

Ihr umfangreiches wissenschaftliches Programm absolviert die Raumsonde in nur wenigen Wochen. Die intensivsten Untersuchungen finden sogar alle am Tag des rasanten Vorbeiflugs statt. Doch es dauert etwa eineinhalb Jahre, bis die gesammelten Daten Bit für Bit zur fast fünf Milliarden Kilometer entfernten Erde übertragen sind.

Im Gegensatz zu dieser kurzen Begegnung begleitet Rosetta Tschurjumow-Gerasimenko 15 Monate lang. Das ermöglicht den Forschern, mit den Kameras und Detektoren Antworten auf zahlreiche Fragen über die genaue chemische Zusammensetzung und den inneren Aufbau des Kometenkerns zu suchen. Diese Erkenntnisse wiederum liefern Hinweise darauf, aus welchem Material der Kuipergürtel entstand und wie die KBOs verklumpten. Noch sind die Vorstellungen der Forscher dazu so rudimentär, dass sie sich nicht für eine der konkurrierenden Erklärungsvarianten entscheiden können. Rosettas Ergebnisse könnten die Wissenschaftler erstmals in die Lage versetzen, eine überzeugende Theorie zusammenzufügen.

Rosetta ist zudem vor Ort, wenn der Komet bei seiner Annäherung an die Sonne erwacht. »Wir sind den ganzen Sommer 2015 hindurch in der Nähe des Kometen, wenn seine Aktivität ihr Maximum erreicht und der Kern pro Minute 1000 Kilogramm Materie ausstößt«, erklärt der Projektwissenschaftler der Mission Matt Taylor von der ESA. Bislang wissen die Forscher nicht, ob dieser Ausstoß gleichmäßig auf der ganzen Oberfläche stattfindet oder von kleinen Aktivitätszentren, so genannten Hotspots ausgeht. Bis Mitte des Jahres 2015 wird dieses Geheimnis gelüftet sein und die Wissenschaftler werden besser verstehen, wie Kometen ihre flüchtigen Bestandteile verlieren.

Mit Rosetta suchen sie auch Antworten auf Fragen, die uns Menschen direkt betreffen. Viele Planetenforscher glauben, ein Kometensturm in der Frühgeschichte des Sonnen-

systems habe das Wasser auf die Erde gebracht. Mit Rosetta überprüfen sie diese Hypothese. Dazu untersuchen sie, ob sich das Wasser, das im Eis des Kometen gebunden ist, wie das irdische zusammensetzt. Das Weltraumteleskop Herschel lieferte bereits Hinweise darauf, dass zumindest manche Kometen Wasser enthalten, bei denen das Isotopenverhältnis des Wasserstoffs mit dem in unseren Ozeanen übereinstimmt. Aber Rosettas Instrumente erlauben einen sehr viel genaueren Blick – auch auf andere Stoffe, die für die Entstehung des Lebens wichtig waren und möglicherweise mit Kometen auf die Erde gelangten.

Tschurjumow-Gerasimenko wird während seiner Reise durch das innere Sonnensystem niemals ausreichend hell, um mit bloßem Auge am Himmel erkennbar zu sein. Wie bei Pluto und den anderen Körpern aus dem Kuipergürtel sind Teleskope nötig, um überhaupt von seiner Existenz zu erfahren. Es ist daher kein Wunder, dass die Astronomen erst in jüngerer Zeit die ersten der zahllosen Objekte am Rand unseres Sonnensystems entdeckt haben – und dabei erkannt haben, welche wichtige Rolle sie für dessen Geschichte und Architektur spielen könnten. Dank der langen Reise zweier Raumsonden werden die Forscher bis Ende des Jahres 2015 noch erheblich mehr darüber erfahren. ~

DER AUTOR



Michael D. Lemonick ist für »Climate Central« tätig, eine Website für Nachrichten aus der Klimaforschung. Er schrieb 21 Jahre lang für das Magazin »Time« und ist Autor eines Buchs über die Suche nach einer zweiten Erde.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1319585

Kristallene Schönheiten

Damit aus Wasser eine Schneeflocke werden kann, müssen verschiedene Wachstumsprinzipien ineinandergreifen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Rein physikalisch gesehen sind Eis und Schnee nichts anderes als Wasser, das in den festen Aggregatzustand übergegangen ist, nachdem die Temperatur den Nullpunkt unterschritten hat. Aber was ist damit schon erklärt? Bereits auf die so naheliegende wie simple Frage, woher eigentlich die überbordende Vielfalt von Schneeflockenformen rührt, gibt diese Feststellung keine Antwort. Wie also werden aus amorphem Wasser und Wasserdampf kristallene Schönheiten?

Schneeflocken fallen aus den Wolken und haben einen langen Weg hinter sich, heißt es in einem alten Kinderlied. Wer sie mit der behandschuhten Hand auffängt, so dass sie nicht gleich schmelzen, stellt fest, dass zwar keine Flocke der anderen gleicht, sie aber alle eine sechseckige Grundstruktur gemeinsam haben. Sehr selten findet man drei- oder zwölfzählige Kristalle, aber niemals vier- oder achtzählige. Schon Jahrhunderte vor unserer Zeitrechnung erklärte der chinesische Gelehrte T'ang Chin: »Weil Sechs die eigentliche Zahl des Wassers ist, müssen die Blumen, zu der das Wasser gefriert, sechs Spitzen haben.«

In unserem Kulturkreis erlangt die hexagonale Struktur der Schneeflocken erst 1610 einige Aufmerksamkeit, nämlich durch Johannes Keplers Aufsatz »Über die sechszackige Schneeflocke«. Auch René Descartes bewundert in seinen »Météores« (1637), wie Eiskristalle stets das Strukturprinzip der Hexagonalität einhalten: »Das waren kleine Klingen aus Eis, ganz glatt, intensiv poliert, ganz durchsichtig, ungefähr von der Stärke eines Blatts ziemlich dicken Papiers, (...) aber so perfekt in Sechsecke tailliert und deren sechs Seiten so gerade waren, die sechs Winkel so gleich, dass es den Menschen unmöglich ist,

etwas so Exaktes zu machen.« Besser verstanden hat man die Wachstumsprinzipien der Schneeflocken aber erst in den letzten drei Jahrzehnten, als Themengebiete wie die fraktale Geometrie und die Selbstorganisation von Vielteilchensystemen aufkamen.

Die Natur liebt es hexagonal

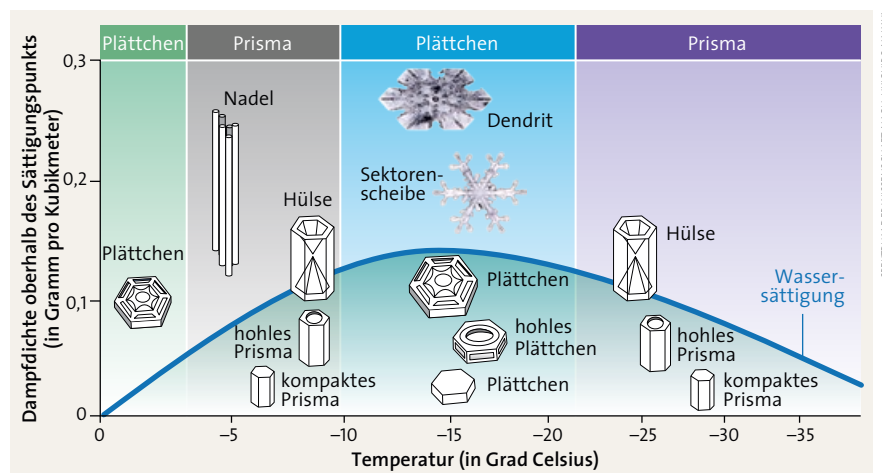
Hexagonale Strukturen sind in der Natur nichts Ungewöhnliches. Setzt man gleich große Styroporkügelchen nicht zu weit voneinander entfernt auf eine Wasseroberfläche, beobachtet man, wie sie aufeinander zustreben und meist in hexagonaler Ordnung zu kleinen Flößen zusammenfinden. Grund dafür ist die Vorliebe natürlicher Systeme, immer so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben. Den Styroporkugeln gelingt dies dadurch, dass sie hexagonale Strukturen bilden: Sind sie durch jeweils sechs Kugeln umgeben, nehmen sie die geringstmögliche Wasseroberfläche ein und minimieren so die Grenzflächenenergie (siehe SdW 8/2012, S. 49).

»... unter den Myriaden von Zaubersternchen ... war nicht eines dem anderen gleich ... «

Thomas Mann (1875–1955)

Ein vergleichbares Prinzip der Selbstorganisation gilt für Wassermoleküle. Diese binden sich ebenfalls so aneinander, dass sie eine möglichst energiearme Konfiguration einnehmen – und auch hier ist das Ergebnis ein Kristallgitter mit sechszähliger Symmetrie.

Angenommen, auf einen Minikristall trifft neues Baumaterial in Form von Wassermolekülen. Besitzt er glatte Facetten, docken die Teilchen an beliebigen Orten mit etwa derselben Wahrscheinlichkeit an. Wird er infolge der angelagerten Teilchen rau, nisten sich nachfolgende Moleküle bevorzugt in Stufen und Leerstellen des Kristalls ein. Denn dort ist die Zahl benachbarter Moleküle, welche die Neuankömmlinge anziehen, am größten. Kristalle wachsen also an den rauen Stellen schneller als an den glatten, so dass bevorzugt glatte Flächen entstehen. Zunächst bilden sich dabei hexagonale, also von sechseckigen Grundflächen begrenzte Prismen, die sich je nach Umgebungsbedingungen zu flachen sechseckigen Platten



Je nach Temperatur und Feuchtigkeit entstehen unterschiedliche Kristallformen – und nur aus hexagonalen Kristallplatten bilden sich tatsächlich Schneeflocken. Das Diagramm stammt ursprünglich vom Schneeflockenpionier Ukichiro Nakaya.



Schneekristalle – hier mit dem Elektronenmikroskop abgebildet – besitzen meist eine sechseckige Grundstruktur.

oder zu säulenartigen, ebenfalls hexagonalen Gebilden weiterentwickeln. Die schwachen molekularen Kräfte bestimmen trotz ihrer geringen Reichweite also die Geometrie des makroskopischen Kristalls.

Doch wie schlägt sich diese prismatische Grundstruktur in Form und Vielfalt der Schneeflocken nieder? Einer der Pioniere der Schneeflockenforschung, der Japaner Ukichiro Nakaya (1900–1962), fand in den 1930er Jahren heraus, dass die Morphologie der Schneekristalle stark von den Wachstumsbedingungen abhängt, insbesondere von Temperatur und Feuchte. Er entdeckte, dass bei -2 Grad Celsius dünne plattenartige Kristalle entstehen, bei -5 Grad vorwiegend dünne Nadeln und bei -15 Grad wieder vorwiegend Platten. Unterhalb von -25 Grad herrscht schließlich eine Mischung aus dicken Platten und säulenartigen Formen vor. Seine Erkenntnisse stellte Nakaya in einem berühmten Morphologiedigramm zusammen (links).

Die Feuchte wiederum, also die Wasserdampfkonzentration in der umgebenden Luft, bestimmt über den Detailreichtum der Kristallformen. Bei genügender Feuchte, wie sie in dichten Winterwolken herrscht, entwickeln sich hülsenartige Formen, Cluster von dünnen Eisnadeln und plattenartige Kristalle. Erstaunlicherweise können sich aber nur Letztere zu den spektakulären blu-

menartigen Ornamenten mit fraktalen Verzweigungen auswachsen, die wir als Schneeflocken kennen. Den Grund dafür kennt bislang niemand. Kenneth G. Libbrecht, Experte für Kristallwachstum und Schneeflocken an California Institute of Technology, hat unumwunden erklärt, dass Forscher selbst heute »immer noch nicht alle Phänomene erklären (können), die dieses einfache Diagramm zeigt« (siehe SdW 2/2008, S. 36).

Trotzdem wissen wir nun genug, um das kurze Leben einer Schneeflocke zu verfolgen. In ihrer Geburtswolke, bei Temperaturen weit unter null Grad, können Wasserdampf, flüssiges Wasser und Eiskristalle koexistieren, weil Keime fehlen, an denen sich der Wasserdampf niederschlagen könnte. Doch schon kleinste Störungen dieses metastabilen Zustands genügen, um eine spontane Kristallisation auszulösen. Der sich dabei bildende Eiskristall, ein winziges hexagonales Prisma, fungiert im Folgenden als Keim, an den sich weitere Moleküle anlagern. Anschließend hängt alles von den Umgebungsbedingungen ab: Passt die Feuchte und liegt die Temperatur bei etwa -15 Grad, entwickelt er sich zu einer jener hexagonalen Platten, aus denen eine Schneeflocke entstehen kann.

Befördern Winde die Platte in zunehmend feuchtere Gegenden der Wolke, treffen neue Wasserdampfmoleküle in immer kürzeren Abständen auf den Kristall. Dort bleiben sie vor allem an den exponierten sechs Ecken hängen, aus denen daher nun Äste zu sprießen beginnen. Dieser Prozess verstärkt sich in der Folge selbst. Denn zum einen fangen die wachsenden Äste viele der Moleküle ab, bevor diese zu den glatten Flanken der Kristallscheibe vordringen können. Zum anderen bremst die Wärme, die bei der Kristallisation frei wird, weitere Kristallisationsvorgänge.

Weil die Wachstumsbedingungen für alle sechs Äste praktisch gleich sind, erscheinen sie am Ende nahezu identisch. Dann beginnen sie sich zu verzweigen. Denn je länger sie werden, desto wahrscheinlicher bleiben Wassermoleküle an ihren Flanken hängen und bilden neue Zweige, die in Richtung der größten Was-

serdampfkonzentration schräg nach außen wachsen, wie die Zweige eines Baums. So gelingt ihnen das Kunststück, sich einerseits vom eigenen Ast zu entfernen, ohne andererseits konkurrierenden Nachbarästen zu nahe zu kommen. Außerdem können sie die Kristallisationswärme auf diese Weise besser nach außen abgeben. Schließlich entstehen fraktale Gebilde, deren individuelle Verzweigungen vom Zufall bestimmt sind, die aber ihre hexagonale Grundstruktur bewahrt haben (siehe SdW 2/2010, S. 39).

Weil Feuchtigkeit und Temperatur mit jedem Windstoß variieren, wird die Struktur des Gebildes bei seinem Fall durch die Wolke zudem immer reichhaltiger. Schließlich ist die Schneeflocke schwer genug, um die Wolke zu verlassen. Während sie sanft auf die Erde hinabsinkt, verhakt sie sich noch mit anderen ihrer Art, so dass am Ende ein luftiges und äußerst komplexes Kunstwerk der Natur auf unserer Hand landet, das dem Zufall nicht weniger als der Notwendigkeit verdankt. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

QUELLEN

Libbrecht, K.G.: The Secret Life of a Snowflake. Voyageur Press, Stillwater 2010

Libbrecht, K.G.: An Edge-Enhancing Crystal Growth Instability Caused by Structure-Dependent Attachment Kinetics. arXiv:1209.4932, eingereicht am 21. September 2012

Libbrecht, K.G.: Wie Schneekristalle entstehen. In: Spektrum der Wissenschaft 2/2008, S. 36

WEBLINKS

www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/

Ken Libbrecht, führender Schneeflockenforscher, präsentiert sein Spezialgebiet.

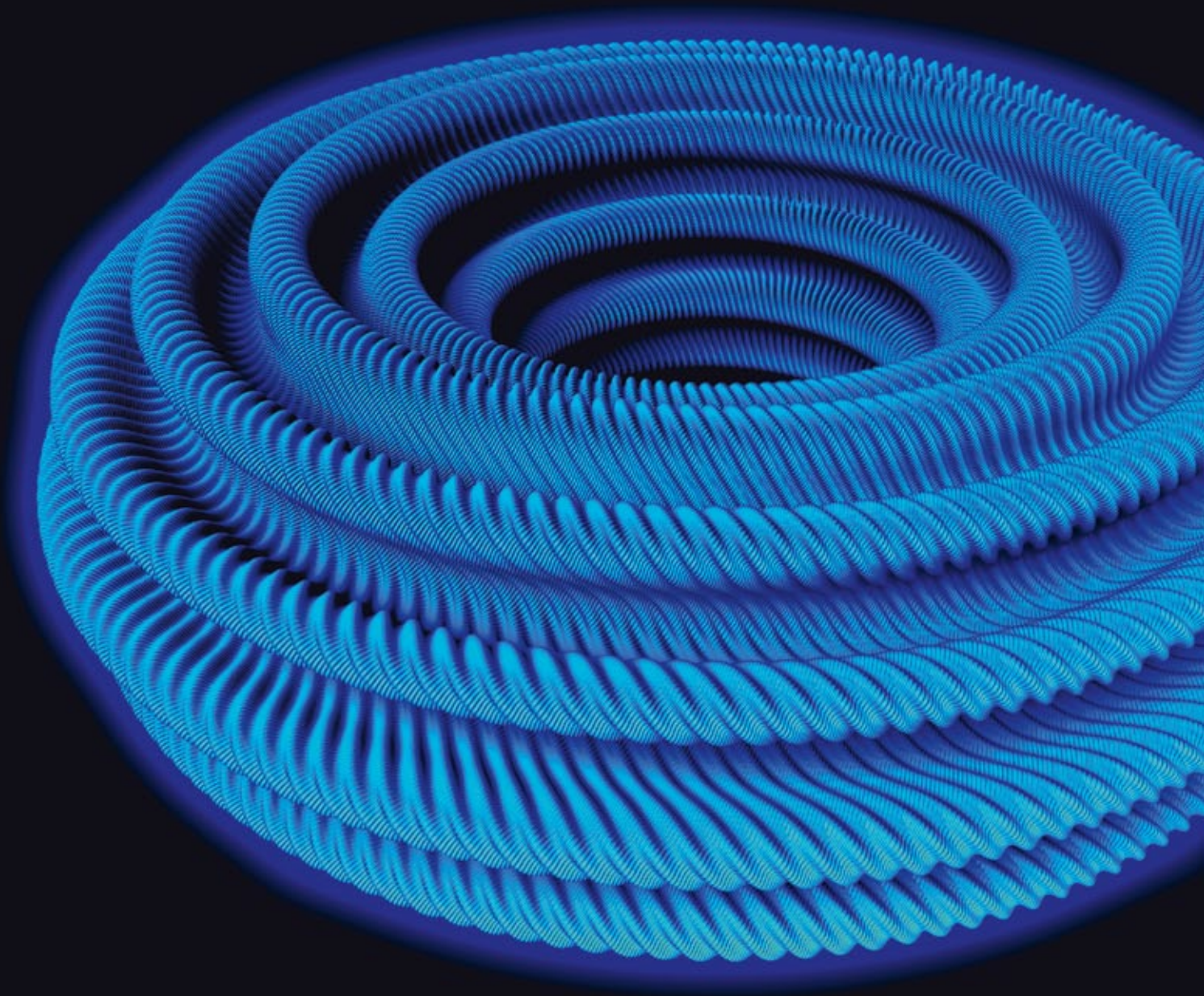
Dieser Artikel und die genannten Links:
www.spektrum.de/artikel/1318448

DIFFERENZIALGEOMETRIE

Glatte Fraktale

Man kann einen Teil der Ebene so auf eine autoschlauchförmige Fläche abbilden, dass dabei alle Längen erhalten bleiben. Das erstmals visualisierte Resultat ist das erste bekannte Exemplar einer Familie neuartiger geometrischer Objekte.

Von Vincent Borrelli, Francis Lazarus und Boris Thibert



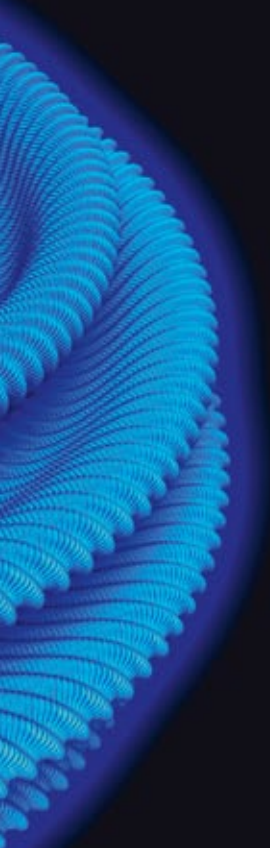
Eigentlich kennt man den amerikanischen Mathematikers John Nash als Pionier der Spieltheorie und Schöpfer des nach ihm benannten Gleichgewichtsbegriffs. Über dieser Leistung, die ihm 1994 den Wirtschaftsnobelpreis einbrachte (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 25), ist ein anderer Geniestreich von ihm fast in Vergessenheit geraten. In den 1950er Jahren entdeckte Nash, dass ein als unlösbar geltendes geometrisches Problem Lösungen im Überfluss hat. Es geht darum, eine »isometrische Einbettung« zu finden, eine Abbildung von der Ebene auf eine gekrümmte Fläche mit der Eigenschaft, dass alle Längen erhalten bleiben (der Begriff wird unten näher erläutert).

Ein paar Seiten mathematischer Argumentation genügte Nash, um aus der Unmöglichkeit eine Möglichkeit zu machen und dabei einige vermeintliche Gewissheiten über den Haufen zu werfen. Es gab nur eine ärgerliche Kleinigkeit: Obwohl niemand ernsthaft bezweifelte, dass eine isometrische Einbettung existiert, konnte niemand sie sich vorstellen, und deswegen verstand auch niemand sie richtig. Dank einer Kombination von Mathematik und Informatik ist es uns gelungen, diese Lücke zu schließen. Das Resultat (Bild links) ist eine Fläche von ganz neuem Typ; wir haben sie als glattes Fraktal bezeichnet, weil sie über gewisse Eigenschaften eines Fraktals verfügt.

Unsere Arbeit stützt sich auf eine Theorie namens »konvexe Integration«, die der russisch-französische Mathematiker Mikhail Gromov entwickelt hat (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 74). Unter anderem von Nashs Arbeiten inspiriert, liefert sie ein mächtiges Werkzeug zur Lösung zahlreicher Probleme aus dem Grenzbereich von Geometrie und Analysis. Sie ist so abstrakt formuliert, dass irgendwelche Anwendungen undenkbar schienen; dem ist jedoch nicht so, wie wir zeigen konnten. Gromovs Theorie erlaubt es, sehr konkret gewisse Klassen von partiellen Differenzialgleichungen zu lösen – das sind solche, deren Unbekannte Funktionen mehrerer Veränderlicher sind.

Die Anfänge des Problems reichen in die 1850er Jahre zurück. Damals revolutionierte Bernhard Riemann (1826–1866) die Geometrie, indem er einen radikalen Wechsel der Perspektive vollzog.

Der begrifflich einfachste Weg, eine Fläche im Raum zu beschreiben, ist die »Parametrisierung«. Das ist eine Funktion, die jedem Punkt der Ebene – oder eines Teilstücks der Ebene – einen Punkt im Raum zuordnet. Die Fläche besteht dann aus allen Werten dieser Funktion. Das Ebenenstück, auf dem die Funktion definiert ist, wird manchmal auch eine »Karte« der Fläche genannt. Unter einer geeigneten Parametrisierung verwandeln sich Gitterlinien (»Rechenkästchen«) auf einer rechteckigen Karte in Längen- und Breitenkreise auf einer Kugeloberfläche. Ein Zylinder wird parametrisiert durch ein Rechteck, bei dem zwei gegenüberliegende Seiten miteinander identifiziert werden; man klebt gewissermaßen die linke und die rechte Seite eines Blattes Papier zur Röhre zusammen. (Hier und im Folgenden verstehen wir unter einem Zylinder nur die gekrümmte Mantelfläche, also eine Konserven-



Diese torusförmige Fläche entsteht aus einem Quadrat unter Erhaltung aller Längen: eine isometrische Einbettung des flachen quadratischen Torus. Die Fläche sieht aus wie ein Fraktal, ist aber keines; sie hat in jedem ihrer Punkte eine Tangentialebene.



Aus einem **Quadrat** entsteht ein **Zylinder**, indem man zwei gegenüberliegende Seiten des **Quadrats** miteinander verklebt. Um einen **Torus** daraus zu machen, muss man auch noch die beiden verbleibenden Seiten zusammenbringen, was nicht ohne erhebliche Verzerrung abgeht.

dose ohne Boden und Deckel.) Entsprechend wird aus einer autoschlauchförmigen Fläche (einem **Torus**) ein »quadratischer **Torus**«, das heißt ein **Quadrat**, bei dem gegenüberliegende Seiten paarweise identifiziert werden (Bild oben).

Allerdings sagt einem eine **Parametrisierung** über eine Fläche mehr, als man eigentlich wissen will. Es interessiert einen nicht wirklich, wo und in welche Richtung orientiert die Fläche im Raum liegt; vielmehr möchte man den Standpunkt eines fiktiven Wesens einnehmen, das auf der Fläche lebt und dort auch Längen und Winkel messen kann, aber außerhalb seiner Fläche nichts wahrnimmt. Gleichwohl kann unser gedachter Flächenbewohner Dreiecke vermessen und zum Beispiel aus der Tatsache, dass die Winkelsumme im Dreieck in einer systematischen Weise größer ist als 180 Grad, erschließen, dass er auf einer Kugeloberfläche lebt.

Riemannsche Metrik

Riemann ersetzte nun die **Parametrisierung** einer Fläche durch eine Funktion, die in jedem Punkt die »intrinsic« (für einen Flächenbewohner erkennbaren) Eigenschaften der Fläche beschreibt. Allerdings sind die auf der Fläche gemessenen Längen im Allgemeinen nicht die Längen auf der Karte. Von wenigen Ausnahmen wie dem **Zylinder** abgesehen, ist es nicht möglich, ein Stück Ebene so mit einer gekrümmten Fläche in Beziehung zu setzen, dass Längen und Winkel in der Ebene gleich ihren Gegenstücken auf der Fläche sind. Es

gibt keine Karte der Erdoberfläche, die zugleich längen- und winkeltreu ist. Und auf dem **Torus** ist der äußere Äquator länger als der innere, während die ihnen entsprechenden Kurven auf dem quadratischen **Torus** – das sind zwei horizontale Strecken – gleiche Länge haben (Bild rechts).

Riemann korrigierte diesen Mangel auf eine merkwürdig anmutende Weise. Er führte auf der Karte einen orts- und richtungsabhängigen Maßstab ein. Diesen wählte er so, dass die mit dem verzerrenden Maßstab auf der Karte gemessenen Längen genau die richtigen Längen auf der Fläche sind. Wie sich herausstellt, ist dieser ortsabhängige Maßstab, der nach seinem Erfinder »riemannsche Metrik« heißt, alles, was man über die Geometrie der Fläche wissen muss.

Riemanns Vorgehen erlaubt es, die möglicherweise sehr unübersichtliche Form der Fläche völlig außer Acht zu lassen. Wichtig ist nur ihre Darstellung durch ein Stück Ebene plus einen ortsabhängigen Maßstab, eben die **riemannsche Metrik**, auf derselben. Diese Sichtweise erweist sich als überaus effizient; insbesondere liegt sie der mathematischen Formulierung der allgemeinen Relativitätstheorie zu Grunde.

Damit reduziert sich das Studium der Flächen auf die Arbeit mit **riemannschen Metriken**, also im Wesentlichen mit den Funktionen, die zu jedem Ort und zu jeder Richtung den zugehörigen Maßstab angeben. Derartige Maßstabsfunktionen gibt es sehr viele, darunter solche mit sehr sonderbaren Eigenschaften, was eine schwierige Frage aufwirft: Existiert zu einer beliebigen »riemannschen Mannigfaltigkeit«, das heißt zu einem Stück Ebene mitsamt **riemannscher Metrik**, eine Fläche, die diese Geometrie im dreidimensionalen Raum konkret realisiert? Das ist das erwähnte Problem der **isometrischen Einbettung**. Eine Abbildung wird als **isometrisch** bezeichnet, wenn sie die Entfernungen nicht verändert. Das gilt normalerweise nur für **Kongruenzabbildungen** wie Drehungen und Verschiebungen; aber eine **isometrische Abbildung** von einer **riemannschen Mannigfaltigkeit** in eine Fläche kann wesentlich komplizierter sein.

Das Problem der **isometrischen Einbettung** läuft also darauf hinaus, ob es zu jeder **riemannschen Mannigfaltigkeit** eine Fläche gibt, die mit dieser durch eine **isometrische Abbildung** verbunden ist, und umgekehrt (zu einer beliebigen Fläche eine **riemannsche Metrik** zu finden ist nicht schwer). John Nash hat diese Frage mit »Ja« beantwortet – unter gewissen Voraussetzungen, die wir weiter unten besprechen.

Um die Schwierigkeit des Problems nachvollziehen zu können, genügt es, den **quadratischen Torus** zu betrachten, also ein **Quadrat** mit identifizierten gegenüberliegenden Seiten, das mit einem ortsabhängigen Maßstab versehen ist. Wie wir gesehen haben, ist der gewöhnliche **Torus** dessen Re-

AUF EINEN BLICK

EINE NEUE ART VON FLÄCHEN

- 1 Aus einem **Quadrat** kann man in Gedanken einen **Torus** (eine autoschlauchförmige Fläche) machen, indem man jeweils zwei gegenüberliegende Seiten miteinander verklebt.
- 2 Damit das gelingt, muss man das **Quadrat** stark verzerren; eine solche Abbildung kann nicht **isometrisch** (längentreu) sein.
- 3 Durch eine **sehr spezielle Deformation des Torus** kann man die Abbildung längentreu machen; allerdings ist die entstehende Fläche weniger glatt als gewöhnliche Flächen.
- 4 Vielmehr hat sie eine **fraktale Struktur mit Runzeln** in allen Größenskalen.

alisierung. Nichts hindert uns daran, auf demselben quadratischen Torus einen anderen Maßstab zu definieren und dadurch ein anderes abstraktes geometrisches Gebilde zu erzeugen. Der einfachste derartige Maßstab ist der aus dem Alltag gewohnte, bei dem die Längen überhaupt nicht vom Ort abhängen. Im Folgenden soll der quadratische Torus mit dieser konstanten Maßstabsfunktion »flacher quadratischer Torus« heißen.

Vom Quadrat zum Torus unter Erhaltung der Längen

Welche Fläche im dreidimensionalen Raum realisiert den flachen quadratischen Torus – wenn es sie überhaupt gibt? Der gewöhnliche Torus kann es offensichtlich nicht sein. Wie schwer das Problem ist, merkt man, wenn man versucht, bei einem echten Quadrat aus Papier beide Paare gegenüberliegender Seiten zu verkleben. Wenn das überhaupt gelingt, dann nur unter gewaltiger Verknitterung und mit vorspringenden Ecken; das entstehende Objekt ähnelt in nichts einer Fläche. Unweigerlich stellt sich der Eindruck ein, es sei unmöglich, das Papier zu einer Fläche zu deformieren, die dieser Bezeichnung würdig ist.

Dieses Gefühl lässt sich durch eine geometrische Größe namens »gaußsche Krümmung« klarer fassen. Das ist eine Zahl, die man für jeden Punkt einer Fläche ausrechnen kann; in diese Berechnung gehen zweite Ableitungen der Parametrisierungsfunktion beziehungsweise der riemannschen Metrik ein. Die gaußsche Krümmung gibt ungefähr unsere anschauliche Vorstellung von Krümmung wieder. So ist die gaußsche Krümmung der Ebene in jedem Punkt gleich null. Das trifft auch auf einen Zylinder zu, den man ja vollständig in die Ebene abrollen kann. Für eine Kugeloberfläche hat sie in jedem Punkt den gleichen positiven Wert – sehr klein für die Erdkugel, aber merklich größer für die Planeten, die der »kleine Prinz« von Saint-Exupéry besucht. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts bewies Carl Friedrich Gauß (1777–1855), dass die heute nach ihm benannte Krümmung eine bemerkenswerte Eigenschaft besitzt: Sie bleibt unverändert, wenn man die Fläche unter Erhaltung aller Abstände deformiert.

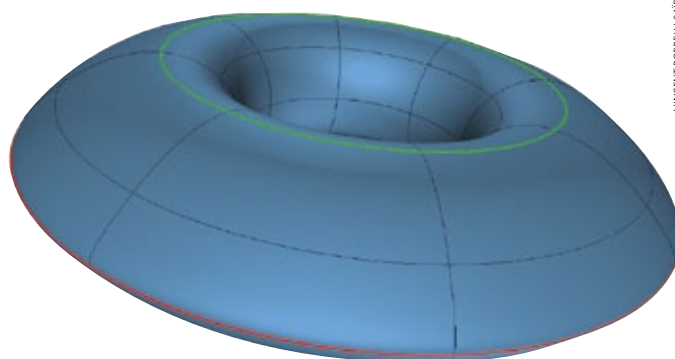
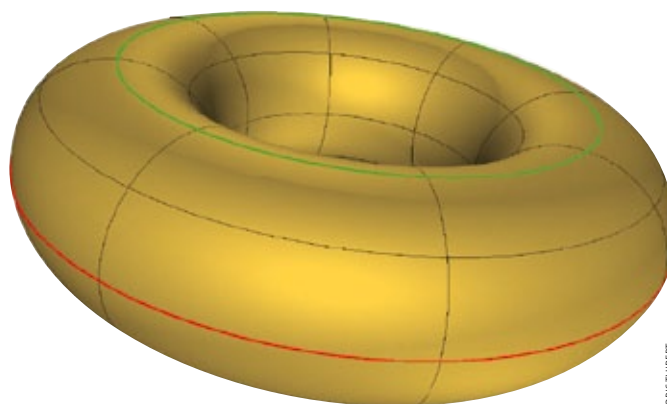
Was sagt uns das über den flachen quadratischen Torus? Seine gaußsche Krümmung ist null; also müsste das auch für die ihn realisierende Fläche gelten, was eine sehr starke Einschränkung darstellt. Man kann sogar zeigen, dass die Forderung unerfüllbar ist. Genauer beweist man Folgendes: Eine beliebige Fläche von der topologischen Gestalt eines Torus – das heißt, man kann sie durch stetige, also nicht zerreißende oder zusammenklebende Deformationen zu einem Torus zurechtbiegen – hat unweigerlich Punkte, an denen ihre gaußsche Krümmung ungleich null ist.

Das scheint ein stichhaltiger Unmöglichkeitbeweis zu sein: Allem Anschein nach gibt es keine isometrische Einbettung des quadratischen flachen Torus. Umso überraschter war die Fachwelt, als Nash 1954 nachwies, dass diese Unmöglichkeit relativ, trügerisch und vermeidbar ist. Mehr noch – es gibt eine Vielzahl isometrischer Einbettungen. Im darauf folgenden Jahr führte der niederländische Mathematiker Ni-

colaas Kuiper (1920–1994) Nashs Arbeit weiter und konnte sogar zeigen, dass man den flachen quadratischen Torus auf unendlich viele Weisen im dreidimensionalen euklidischen Raum realisieren kann.

Wo steckt die Lücke in dem Unmöglichkeitbeweis, die Nash und Kuiper nutzten? Hierzu muss man sich mit der Glattheit (»Regularität«) von Flächen beschäftigen. Eine Fläche ist per definitionem glatt in dem Sinn, dass sie keine Knicklinien oder gar Löcher aufweist. Mathematisch ausgedrückt: Sie hat in jedem Punkt eine Tangentialebene. Es gibt jedoch unterschiedliche Grade dieser Glattheit.

Dies lässt sich am besten an einer Skateboardbahn veranschaulichen. Eine beliebte Form ist die »Halfpipe«, die un-



Auf dem gelben Torus (oben) ist die rote Kurve länger als die grüne. Damit Längen auf dem echten Torus und auf dem zugehörigen Stück Ebene, dem »quadratischen Torus«, übereinstimmen, muss auf Letzterem eine Längeneinheit im roten Bereich kürzer sein als eine im grünen. Verkürzt man den roten Maßstab noch weiter, ändert der Torus seine Form (blaue Bilder). Das Problem der isometrischen Einbettung läuft auf die Frage hinaus, ob es zu jeder beliebigen Wahl der riemannschen Metrik – des ortsabhängigen Maßstabs auf dem Quadrat – eine passende Fläche gibt.

VINCENT BOKRELLS/AID, ABRANE, FRANCIS LAZARUS, DAMIEN ROHMER UND BORIS THIBERT

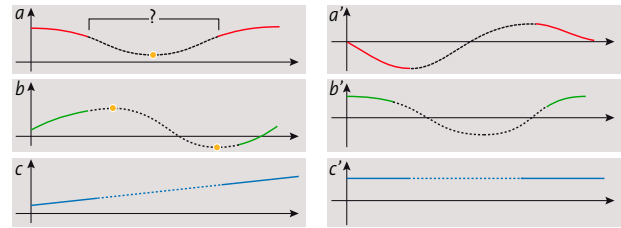
Topologische und analytische Hindernisse

In der **Differenzialgeometrie**, dem Teilgebiet der Mathematik, in dem man die Analysis (Differenzial- und Integralrechnung) zum Studium von Kurven, Flächen und dergleichen verwendet, erfordert die Lösung eines Problems zwei Schritte, einen topologischen und einen analytischen.

Hier ein einfaches Beispiel: Gegeben sind drei Fragmente von Funktionen a , b und c . Ist es möglich, sie in ihrem bisher nicht festgelegten Mittelteil so zu ergänzen, dass die Tangente an die Kurve in keinem Punkt horizontal liegt (gelbe Punkte)?

In einem derartigen Punkt wäre die Ableitung der Funktion gleich null, der Graph der Ableitungsfunktion a' , b' beziehungsweise c' (rechte Bilder) würde also dort die horizontale Achse schneiden. Die gestellte Frage läuft somit darauf hinaus, ob man den Graphen der jeweiligen Ableitungsfunktion so ergänzen kann, dass er die horizontale Achse nicht trifft. Das entspricht dem ersten, topologischen Schritt.

Wie man sieht, kann man die Kurve a' nicht ergänzen, ohne die Achse zu schneiden. Daraus folgt, dass eine horizontale Tangente an die Kurve a nicht zu vermeiden ist. Dagegen kann man



VINCENT BORRELLI, SAÏD JABRANE, FRANCIS LAZARUS, DAMIEN ROHMER UND BORIS THIBERT

die Kurven b' und c' ergänzen, ohne die horizontale Achse zu treffen.

Nachdem der topologische Teil des Problems für diese beiden Kurven gelöst ist, geht man zum analytischen über und stellt fest, dass bei der Kurve b ein Verbotsschild auftaucht: Nach dem Satz von Rolle, einem Spezialfall des Mittelwertsatzes der Differenzialrechnung, ist es unmöglich, die Kurve b zu vervollständigen, ohne eine horizontale Tangente zu erzeugen. Dagegen ist im Fall der Kurve c der Weg frei, eine Ergänzung ohne horizontale Tangente ist also möglich.

re Hälfte eines auf den Boden gelegten Zylindermantels, in dessen Innerem der Skater beim Abwärtsrollen Schwung gewinnt. Es gibt auch Bahnen, bei denen die Halfpipe gewissermaßen entlang der Bodenlinie durchgeschnitten und zwischen die beiden Hälften ein ebenes Stück eingefügt ist. Ein Skater, der diese Fläche entlang der Linie größten Gefälles hinunterrast, verspürt einen Stoß in dem Moment, in dem er die Verbindungslinie überschreitet – nicht etwa, weil dort eine Fuge im Beton wäre, sondern weil die Krümmung der Bahn dort plötzlich von einem positiven Wert auf null abfällt. (Achtung: Es handelt sich nicht um die gaußsche Krümmung der Fläche, denn die ist im zylindrischen wie im ebenen Teil null, sondern um die Krümmung der – eindimensionalen – Linie, die der Skater entlangfährt.)

Gute Skatebahnen ersparen ihren Benutzern diese Erschütterung, indem ihre gekrümmten Teile nicht eine konstante, sondern eine stetig auf null abfallende Krümmung haben. Aus demselben Grund sind echte Eisenbahnschienen nicht wie ihre Gegenstücke in der Modellbahn aus geraden Stücken und Kreisbögen zusammengesetzt, sondern folgen speziellen Kurven, den so genannten Klothoiden.

Im Querschnitt betrachtet, entspricht die primitive Skatebahn – Kreisbogen plus angesetztes Geradenstück – zwar einer differenzierbaren Funktion, denn die Kurve hat in jedem Punkt eine Tangente. Die Funktion ist sogar zweimal differenzierbar, aber die zweite Ableitung ist nicht mehr stetig, sondern macht einen Sprung am Übergangspunkt.

Allgemein teilt man in der Differenzialrechnung die Funktionen in Qualitäts-(Glattheits-)klassen ein. Die Klasse C^1 umfasst alle Funktionen, deren Ableitung existiert und stetig ist, das heißt keine Sprünge macht. Zur Klasse C^2 gehören

die »zweimal stetig differenzierbaren Funktionen«, das heißt solche, bei denen die zweite Ableitung existiert und stetig ist. Jede C^2 -Funktion gehört automatisch zu C^1 , denn wenn die erste Ableitung nicht stetig ist, kann die zweite nicht existieren. So geht es weiter mit C^3 , C^4 ... bis zu C^∞ , der Klasse der unendlich oft differenzierbaren Funktionen.

Inwiefern kann diese Klasseneinteilung unser Paradox aufklären? In den Beweis, dass die isometrische Einbettung des flachen quadratischen Torus unmöglich ist, ging an entscheidender Stelle die gaußsche Krümmung ein. Diese gibt es jedoch nur für ziemlich reguläre Flächen, denn sie ist wie beschrieben über zweite Ableitungen definiert; also muss die Fläche mindestens der Klasse C^2 angehören. Ist sie nicht hinreichend glatt, sondern gehört beispielsweise nur zur Klasse C^1 , so kann man ihre gaußsche Krümmung nicht mehr berechnen. Dieser Begriff verliert folglich seinen Sinn. Also kann jede Überlegung, die sich auf die Krümmung stützt, nur beweisen, dass es keine Fläche der Klasse C^2 mit den geforderten Eigenschaften gibt. Flächen der niedrigeren Qualitätsklasse C^1 sind damit nicht ausgeschlossen. Durch den Verzicht auf einen Grad an Regularität öffnet sich der Zugang zu einer Welt, in der es auf die gaußsche Krümmung nicht mehr ankommt.

Eine Welt ohne Einschränkungen

Damit ist zwar ein entscheidender Grund dafür entfallen, dass es keine Realisierung des flachen quadratischen Torus geben kann. Aber es könnten noch tausend andere Hindernisse der Existenz einer solchen Einbettung im Weg stehen. Die große Überraschung an dem Ergebnis von Nash besteht darin, dass es keine weiteren Hindernisse gibt.

Um das Ausmaß der Verblüffung besser verstehen zu können, muss man sich die üblichen Arbeitsmittel der Differentialgeometrie vor Augen führen. In diesem Zweig der Mathematik wird die Differentialrechnung (Ableitungen und Integrale) angewandt, um Objekte wie Kurven oder Flächen zu verstehen. Ein Beweis lässt sich mit einem Weg vergleichen, der eine Stadt A – die Voraussetzungen – mit einer Stadt B – der zu beweisenden Behauptung – verbindet.

Zwei Arten von Hindernissen können unserer Reise im Weg stehen: physische wie zum Beispiel ein Meer und rechtliche wie Einfahrverbote oder Landesgrenzen. Gegen Hindernisse der ersten Art hilft gar nichts. Wenn es keine Landverbindung zwischen A und B gibt, haben wir schon verloren und brauchen über so etwas wie Einbahnstraßen nicht mehr nachzudenken. Dieser Teil der Frage ist relativ einfach zu beantworten; meistens genügt ein flüchtiger Blick auf die Landkarte. Auf einer existierenden Landverbindung eine rechtlich zulässige Straße zu finden, erfordert mehr Aufmerksamkeit. Die Idee, einfach nach dem Zufallsprinzip Straßen auszuwählen, wird mit großer Wahrscheinlichkeit scheitern, wenn zum Beispiel A in der Stadtmitte von Paris und B im Zentrum von Marseille liegt.

In einem differenzialgeometrischen Beweis entsprechen den Einbahnstraßen und den Grenzen die Gesetze der Differentialrechnung. Wie eine Straßenverkehrsbehörde erlauben sie gewisse (Beweis-)Wege, während sie an anderen Verbotsschilder aufstellen. Die Suche nach einem »gesetzlich zulässigen« Weg beschäftigt einen Mathematiker oft so sehr, dass er einen anderen wichtigen, aber weniger sichtbaren Aspekt vergisst: die Topologie. Dieses Teilgebiet der Mathematik untersucht diejenigen Eigenschaften, die unter stetigen Deformationen erhalten bleiben. Wenn man beispielsweise eine Kreisscheibe verzerrt, auf der zwei Punkte und eine Verbindungslinie zwischen ihnen eingezeichnet sind, so sieht die Linie hinterher vielleicht sehr wild und krakelig aus; aber sie verbindet immer noch die beiden Punkte. Die Existenz einer Landverbindung von A nach B ist also eine topologische Eigenschaft.

Die konvexe Integration, die befreiende Theorie

In unserer Analogie geht die Topologie der Differentialgeometrie voraus; sie liefert die mathematischen Hilfsmittel, mit denen man die Frage »Gibt es eine Straßenverbindung von A nach B ?« beantworten kann. Falls die Antwort positiv ausfällt, stellt man mit Hilfe der Differentialrechnung fest, ob es auf der vorgeschlagenen Route Straßensperren gibt oder nicht. Die Lösung eines differenzialgeometrischen Problems zerfällt folglich in zwei Phasen (Kasten links oben): eine topologische, in der man die Existenz einer Route nachweist, und eine analytische, in der man mit Hilfsmitteln der Differentialrechnung zeigt, dass es auf dieser Route keine rechtlichen Hindernisse gibt. Die zweite Phase ist oft schwieriger als die erste.

Die Lösung des Problems der isometrischen Einbettung liefert ein geradezu klassisches Beispiel für dieses zweischrit-

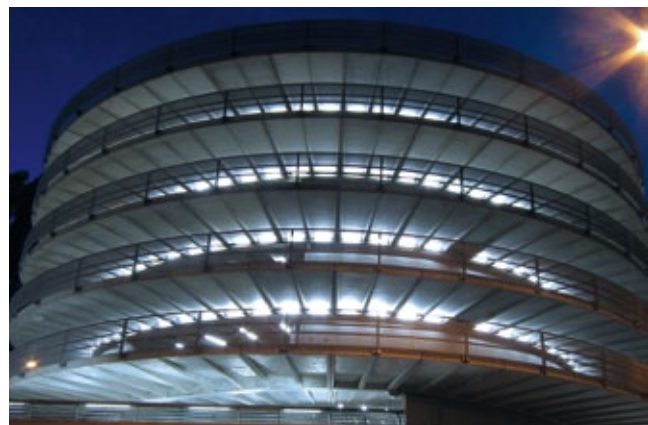
tige Vorgehen. Der erste, topologische Schritt ist vergleichsweise einfach. Wenn man auf die Erhaltung der Längen keine Rücksicht nehmen muss, lässt sich das Quadrat mühelos zum Torus deformieren (Bild S. 46 oben). Es gibt also keine physischen Hindernisse.

Beim zweiten, geometrischen Schritt erscheint sofort ein Verbotsschild – wegen der gaußschen Krümmung. Diese müsste überall null sein, was aber unmöglich ist, wie wir gesehen haben. Aber das Verbotsschild gilt nur für Flächen der Klasse C^2 , so wie wenn die Straße für Kraftfahrzeuge gesperrt ist. Fahrzeuge minderer Qualität wie Fahrräder, das heißt Flächen der Klasse C^1 , sind nicht betroffen. Zum großen Erstaunen der Mathematiker ist kein weiteres Verbotsschild aufgetaucht.

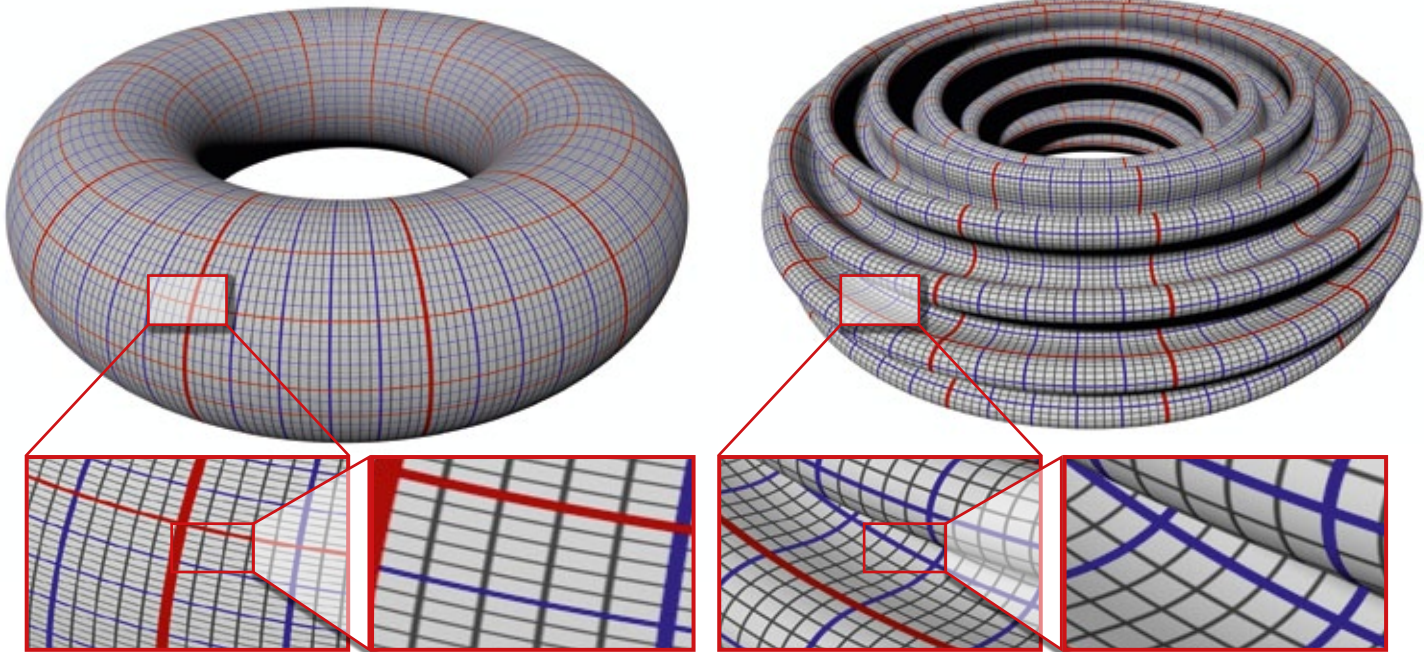
In den 1970er Jahren entdeckte Gromov, dass die von Nash entdeckte Abwesenheit aller Verbotsschilder kein exotischer Einzelfall ist. Er fand eine technische Bedingung namens Homotopieprinzip oder kurz h -Prinzip, die von vielen interessanten differenzialgeometrischen Gleichungen erfüllt wird. Wenn das der Fall ist, gibt es keine Verbotsschilder. Wie durch ein Wunder fallen alle differenzialgeometrischen Hindernisse einfach weg, und nur die topologischen bleiben übrig.

Interessanterweise lieferten Nash mit seinem Beweis und Kuiper mit dessen Verallgemeinerung Gromov die Grundlage für seine Theorie der konvexen Integration. Die wiederum stellt ein Mittel bereit, um im Einzelfall zu bestimmen, ob das h -Prinzip erfüllt ist oder nicht.

Hinter der Theorie steckt folgende Idee, die man in viele Richtungen ausarbeiten kann: Wenn der direkte Weg von A nach B nicht gangbar ist, suche man einen Ausweichweg, der einerseits räumlich dicht bei dem direkten liegt, andererseits länger ist, dadurch die Schwierigkeiten des direkten Wegs »verdünnt« und sie so in den Bereich des Handhabbaren



Eine unlösbare Aufgabe – fahre mit dem Auto eine senkrechte Wand hinauf – wird lösbar, wenn man dem Auto eine kleine Abweichung ε von der vorgeschriebenen Linie genehmigt. Die Lösung besteht in der schraubenförmigen Rampe, die in Parkhäusern Verwendung findet. Dabei darf man die Vorschrift über die Abweichung von der Linie beliebig eng fassen, solange nur ε größer als null bleibt – um den Preis, dass das (punktförmige) Auto sehr viele Runden drehen muss.



VINCENT BORRELLI, SAÏD JABRANE, FRANCIS LAZARUS, DAMIEN ROHMER UND BORIS THIBERT

Bei der üblichen Abbildung eines Quadrats auf einen Torus werden die Kästchen eines Gitters (man denke sich das Quadrat aus Millimeterpapier) zu Vierecken mit ungleichen Seiten-

längen verzerrt (links, Ausschnittvergrößerung in zwei Stufen). Indem der Torus in – horizontale – Runzeln gelegt wird, gelingt es, diese Ungleichheit zu verringern. Im Grenzwert unendlich vieler

bringt. In dem klassischen Beispiel liegt B genau vertikal über A , und das Auto, das von A nach B fahren soll, kann nur eine begrenzte Steigung bewältigen. Lässt man das Auto mit der maximal möglichen Steigung in A losfahren, so wird es sich von der direkten Strecke weiter entfernt haben, als die Vorschrift zur räumlichen Nähe zulässt, bevor es die geforderte Höhe über Grund erreicht hat. Das scheint auf ein geometrisches Verbot hinauszulaufen. Aber dieses lässt sich leicht umgehen, und die Lösung findet sich sogar im Alltag: Man schickt das Auto auf einen schraubenförmigen Weg, der sich um die vertikale Linie windet wie die Fahrbahnen in einem mehrstöckigen Parkhaus (Bild S. 49 unten).

Ein Effekt der Mittelung

Das geschilderte Problem ist nicht topologischer, sondern differenzialgeometrischer Natur. Es geht ja darum, dass das Auto nur eine gewisse Maximalsteigung bewältigen kann, und die Steigung berechnet sich über die Ableitung der Bahnkurve, genauer gesagt über deren Tangentialvektor. Das ist ein Vektor der Länge 1, der »mit dem Auto mitfährt« und in jedem Moment in dessen Bewegungsrichtung zeigt.

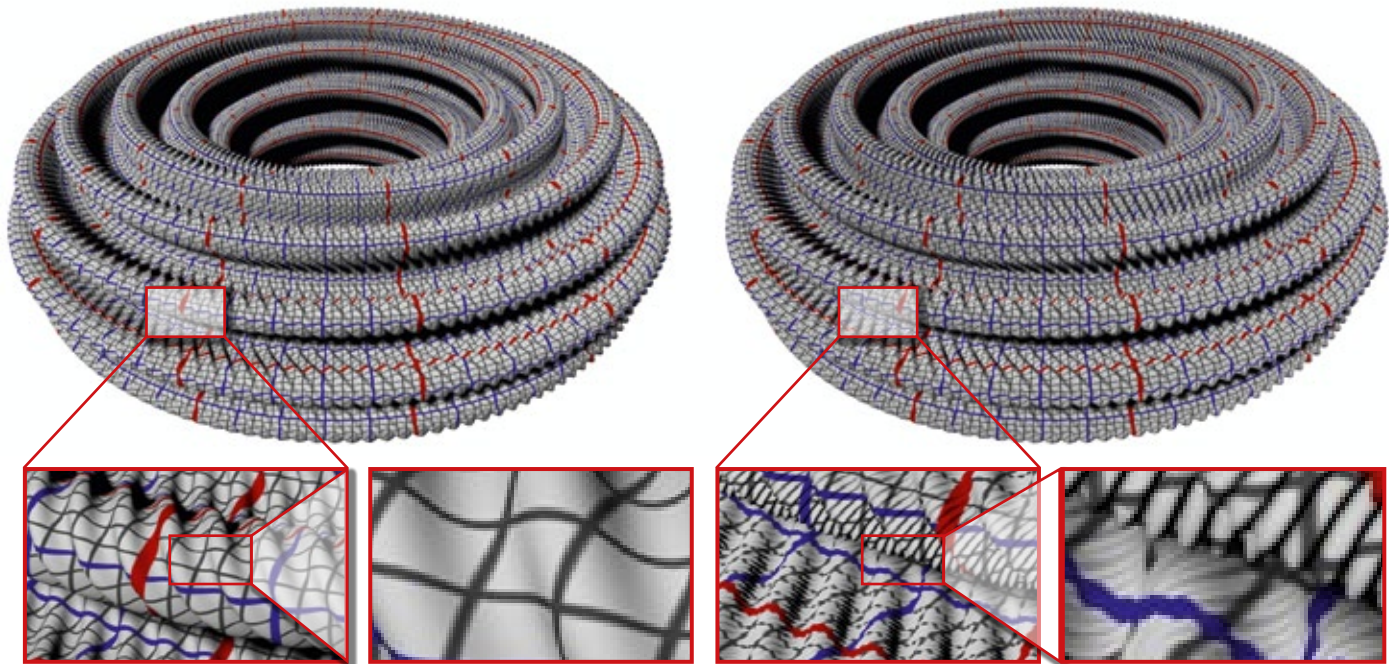
Während das Auto eine Runde fährt, beschreibt sein Tangentialvektor – dessen Anfangspunkt man sich in den Nullpunkt verschoben denkt – eine horizontale Kreislinie in geringer Höhe über der Horizontalen. Mittelt man den Tangentialvektor über eine Runde, so fallen die horizontalen Anteile weg, und es bleibt ein kurzes vertikales Stück übrig. Wie bei gewöhnlichen Funktionen ist auch bei der Bahn des Autos das Integral über die Ableitung gleich dem Funktionswert selbst. Durch Integrieren der Ableitung (des Tangentialvek-

tors) über eine Runde oder, was bis auf eine Konstante dasselbe ist, durch Mittelung können wir erstens zeigen, dass sich das Auto im Verlauf einer Runde ein kurzes Stück in (hier vertikaler) Richtung auf das Ziel bewegt hat. Das ist in diesem einfachen Beispiel zwar offensichtlich, im allgemeinen Fall aber keineswegs.

Zweitens können wir beweisen, dass die Differenz zwischen einem Punkt der Bahn und dem entsprechenden Punkt der eigentlich vorgeschriebenen Kurve (hier der Vertikalen) nicht über den Kreis, den der Tangentialvektor beschreibt, hinausläuft. In der Fachsprache: Sie verbleibt in der »konvexen Hülle« der Kurve des Tangentialvektors. Das erklärt, warum die Technik »konvexe Integration« heißt.

Auch außerhalb unseres Problems liefert die konvexe Integration ein mächtiges Werkzeug der Differenzialgeometrie. So findet sie Anwendung beim »Umstülpen einer Sphäre«. In den 1950er Jahren entdeckte der amerikanische Mathematiker Stephen Smale ein Verfahren, eine Sphäre (Kugeloberfläche) umzustülpen, ohne unterwegs scharfe Kanten oder Spitzen zu erzeugen. Allerdings muss man zulassen, dass sich die Sphäre im Verlauf des Prozesses selbst durchdringt. Wenn das Innere und das Äußere dieser Sphäre in unterschiedlichen Farben angemalt sind, dann sind nach der Umstülpung Innen- und Außenfarbe vertauscht. Zu diesem an sich schon überraschenden Resultat hat die Theorie der konvexen Integration noch das Ergebnis hinzugefügt, dass diese Umstülpung isometrisch erfolgen kann – das heißt, alle Längen bleiben während der Umstülpung erhalten.

Nach der Einführung der konvexen Integration wurde Nashs Einbettung plötzlich begreiflicher. Sie war nicht mehr



VINCENT BORRELLI, SAÏD JABRANE, FRANCIS LAZARUS, DAMIEN ROHMER UND BORIS THIBERT

Verrunzelungen mit anders orientierten, immer kleineren und zahlreicheren Deformationen strebt die Ungleichheit gegen null: Die Einbettung ist isometrisch geworden, und alle Maschen-

weiten sind gleich. Hier sind nur die ersten drei Schritte des Verfahrens gezeigt; alle weiteren erzeugen nur noch Deformationen, die für das bloße Auge unsichtbar sind.

ein exotisches Einzelergebnis, sondern Anwendungsfall einer umfassenderen Theorie. Aber vorstellen konnte man sich so eine Fläche immer noch nicht, und wegen ihrer paradoxen Eigenschaften hatte sie nach wie vor die Aura des Geheimnisvollen. Wie kann sie untadelig glatt sein und zugleich jedem, der sie mit dem Skateboard herunterfährt, eine unendliche Serie von Stößen verpassen? Wie würde sie aussehen?

In der Hoffnung, diese Fragen beantworten zu können, bildeten wir drei 2006 zusammen mit dem damaligen Doktoranden Saïd Jabrane eine Arbeitsgruppe; 2012 stieß noch Damien Rohmer dazu, ein Spezialist für Visualisierung. Wir waren davon überzeugt, dass die konvexe Integration uns einen Weg zu einer Visualisierung weisen würde. Gromovs Beweis des Satzes von Nash und Kuiper ist nämlich »quasikonstruktiv«. Das heißt, er begnügt sich nicht etwa mit dem Nachweis, dass die Annahme der Nichtexistenz einer solchen Fläche auf einen Widerspruch führen würde, sondern liefert so etwas wie ein Verfahren zu ihrer Konstruktion – allerdings viel zu abstrakt und allgemein, als dass man es ohne Weiteres in ein Computerprogramm hätte umsetzen können.

Unsere Überzeugung war begründet; allerdings brauchten wir volle sechs Jahre, bis wir eine einzige dieser berückichtigten Einbettungen visualisiert hatten. Unter den unendlich vielen Möglichkeiten, die Gromovs Beweis uns anbot, mussten wir uns für eine entscheiden. Darüber hinaus nahmen wir einige Vereinfachungen vor, die nur für den Torus gelten, aber uns für diesen die Arbeit erleichterten.

Unser Programm beginnt mit der Standardabbildung vom Quadrat auf einen gewöhnlichen Torus. Dabei sind die Längenmaßstäbe so gewählt, dass jede Entfernung auf dem

Torus kürzer ist als die entsprechende Entfernung auf dem Quadrat. Insbesondere sind alle Breitenkreise kürzer als die ihnen entsprechenden horizontalen Linien von der linken zur rechten Quadratseite.

Runzeln in jedem Maßstab

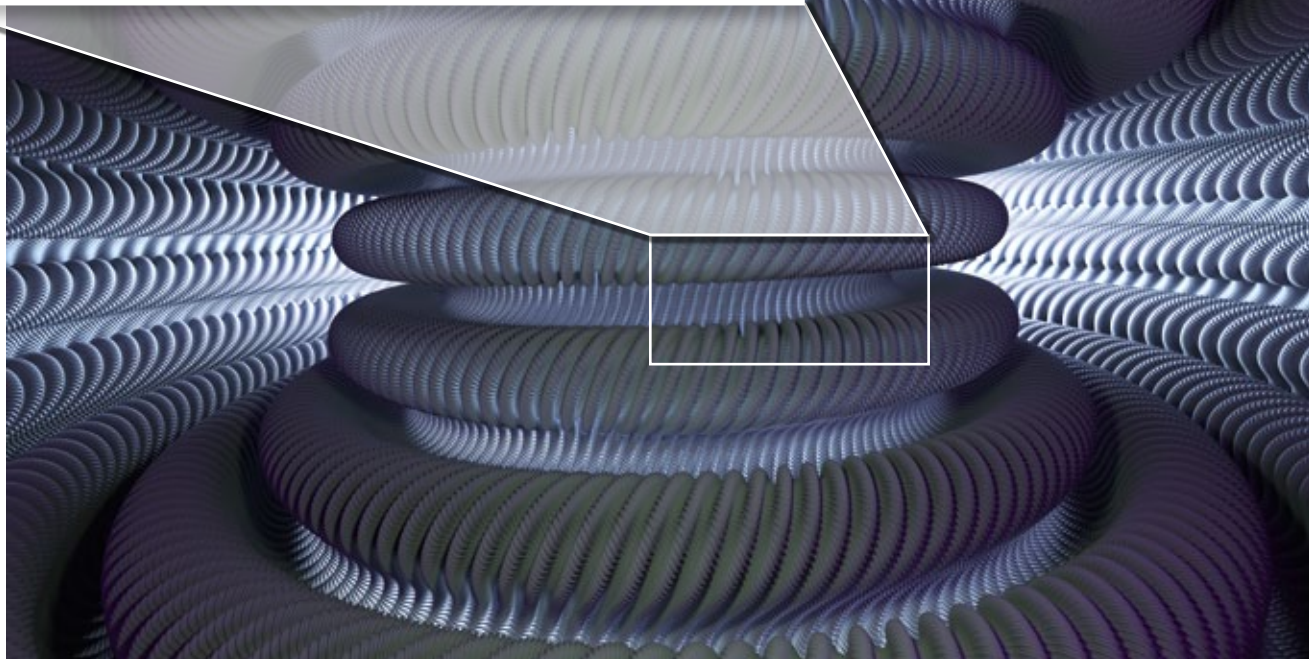
Die Torusfläche müsste also überall größer sein, als sie ist, und zwar außen ein bisschen und innen sehr viel. Unser Programm macht nun die Fläche größer – außen ein bisschen, innen sehr viel mehr –, aber so, dass sie bis auf kleine Abweichungen an ihrem Platz bleibt. Dazu legt es die Fläche in sorgfältig dimensionierte Runzeln (»corrugations«, siehe Bilderreihe oben).

Durch diese Aktion wird die Abweichung von der Isometrie zwar kleiner, aber noch nicht null. Ein zweiter Verrunzelungsschritt ist erforderlich, in einer Richtung schräg zu der des ersten Schritts und mit kleineren und zahlreicheren Runzeln. Wieder wird die Abweichung von der Isometrie kleiner, aber verschwindet nicht ganz, so dass ein weiterer Schritt erforderlich wird, und so weiter. Erst nach unendlich vielen Verrunzelungen ist das Ziel erreicht. Aber bereits nach vier Schritten sieht man mit bloßem Auge keinen Unterschied mehr.

Das Endergebnis ist überraschend (Bilder S. 44 und S. 52). Man könnte die sich ergebende Fläche mit einem Fraktal verwechseln, weil sie in jedem Maßstab dieselben Strukturen zeigt. Sie ist aber kein klassisches Fraktal wie etwa die Koch-Kurve oder die Peano-Kurve (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 72), denn diese Kurven haben in keinem Punkt eine Tangente. Unsere Fläche dagegen ist glatt, denn sie hat in je-



Der Blick von innen in die isometrische Einbettung des flachen quadratischen Torus zeigt deren fraktale Struktur: Unter der Vergrößerung werden neue, kleinere Runzeln sichtbar – bis ins Unendliche.



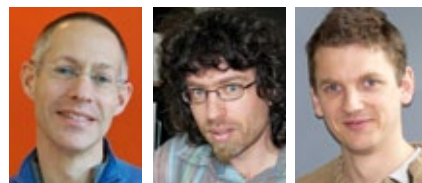
VINCENT BORRELLI, SAÏD JABRANE, FRANCIS LAZARUS, DAMIEN KOHNEK UND BORIS THIBERT

dem Punkt eine Tangentialebene, aber nicht so glatt wie eine klassische Fläche, denn sonst hätte sie eine gaußsche Krümmung. Wir bezeichnen eine derartige Fläche als C^1 -Fraktal oder als glattes Fraktal.

Nachdem es uns gelungen ist, den flachen quadratischen Torus zu visualisieren, hoffen wir, auch andere isometrische Einbettungen riemannscher Mannigfaltigkeiten im dreidimensionalen Raum mit dem Computer darstellen zu können. Insbesondere denken wir an die poincarésche Kreisscheibe, ein bekanntes Modell der nichteuklidischen Geometrie in der Ebene (Spektrum der Wissenschaft 10/1990, S. 12, und 2/2010, S. 49). Zweifellos werden derartige Visualisierungen abermals glatte Fraktale zu Tage fördern.

Unsere neuen Flächen sind eine Art »missing link« zwischen fraktalen und gewöhnlichen Flächen; vermutlich werden sie auch bei anderen mathematischen Fragen auftauchen. Höchstwahrscheinlich werden auch diverse Strukturen aus der Physik, der Chemie oder den Lebenswissenschaften, die bislang als Fraktale gelten, sich als C^1 -Fraktale entpuppen. Weitere Gebilde dieser Klasse dürften der Entdeckung harren. \approx

DIE AUTOREN



Vincent Borrelli (links) ist Dozent an der Université Claude Bernard und Mitglied des Institut Camille Jordan in Lyon. **Francis Lazarus** (Mitte) ist Informatiker und arbeitet am Laboratorium Gipsa-lab, einer Gemeinschaftseinrichtung des französischen Forschungsverbands CNRS und der Université de Grenoble. **Boris Thibert** ist Dozent für angewandte Mathematik an der Université Joseph Fourier und Mitglied des Laboratoire Jean Kuntzmann, beides in Grenoble.

QUELLE

Borrelli, V. et al.: Flat Tori in Three-dimensional Space and Convex Integration. In: Proceedings of the National Academy of Science USA 109, S. 7218–7223, 2012

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1319586

THEMEN AUF DEN PUNKT GEBRACHT: Spektrum KOMPAKT

In den **Spektrum KOMPAKT**-Digitalpublikationen finden Sie alle wichtigen Informationen zu einem bestimmten Themenkomplex als PDF-Download.

€ 4,99
je Ausgabe



Diese und weitere Kompaktausgaben erhalten Sie unter:
www.spektrum.de/kompakt

QR-Code per
Smartphone
scannen!



Produktionsdatum: siehe Magnetfeld

Wo immer der Mensch hohe Temperaturen einsetzte, entstanden nicht nur Produkte wie Keramiken oder Metalle, sondern oft auch magnetische Minerale. Weil diese die Richtung des damaligen Erdmagnetfelds speicherten, versuchen Archäologen sie nun zur Altersbestimmung zu nutzen. Auch wenn das Verfahren nicht universell einsetzbar ist, kann es doch oft andere Datierungsmethoden ergänzen.

Von Elisabeth Schnepf

Zur Kunst der Archäologen gehört es, Siedlungsschichten in eine zeitliche Abfolge zu bringen – beispielsweise anhand von Stilmerkmalen der ausgegrabenen Gebrauchskeramiken. Letztlich bleiben das jedoch relative Datierungen. Ein absolutes Alter können außer Schriftquellen nur naturwissenschaftliche Verfahren wie die Radiokohlenstoffmethode (^{14}C), Thermolumineszenz oder die Dendrochronologie ermitteln. Noch wenig bekannt ist die Paläo- beziehungsweise Archäomagnetik. Sie erreicht zwar nicht immer die gleiche Genauigkeit wie die genannten Verfahren, ist aber auch dann anwendbar, wenn in der archäologischen Stätte keine organischen Überreste entdeckt werden. In jedem Fall kann sie die genannten Techniken ergänzen und deren Datierungen absichern.

Die physikalische Grundlage der Methode bilden Schwankungen des Erdmagnetfelds. So wechselt es jeweils nach etwa einer halben Million Jahre seine Ausrichtung. Aufgezeichnet ist dies unter anderem in den Ozeanböden. Quellen dort glutflüssige Magmen aus Rissen in den Mittelozeanischen Rücken, so richtet sich die Magnetisierung bestimmter

AUF EINEN BLICK

DATENSPEICHER AUS TON

1 Das **Erdmagnetfeld variiert** nach Betrag und Richtung über Zeiträume von Hunderttausenden von Jahren, zudem in geringerem Maß innerhalb von **wenigen Jahrhunderten**.

2 Bei der **Erzverhüttung** und beim **Brennen von Ton** nehmen magnetisierbare Minerale die Ausrichtung des zu diesem Zeitpunkt herrschenden Magnetfelds an. Daher lässt sich das Alter von Proben durch einen **Vergleich mit Referenzkurven** ermitteln.

3 Derzeit bemühen sich Experten dieser Archäomagnetik, solche Kurven für ganz Europa zu ermitteln und schon vorhandene fortzusetzen. Dazu benutzen sie die **Magnetisierungswerte archäologischer Befunde**, die mit anderen Verfahren gut zu datieren sind.



DIE SERIE IM ÜBERBLICK

NATURWISSENSCHAFT
IM DIENST DER ARCHÄOLOGIE

- Teil 1 ▶ Antike Farbenspiele November 2014
Ina Reiche und Katharina Müller
Dem Eisen auf der Spur
Philippe Dillmann und Roland Schwab
- Teil 2 ▶ Unser rätselhafter neuer Dezember 2014
Verwandter
Michael Marshall
Elektroden statt Spaten
Stefan Hecht
- Teil 3 ▶ Datieren nach dem Magnetfeld Januar 2015
Elisabeth Schnepf
Met & Co. – Alkopops bei den Nordmännern
Annine Fuchs

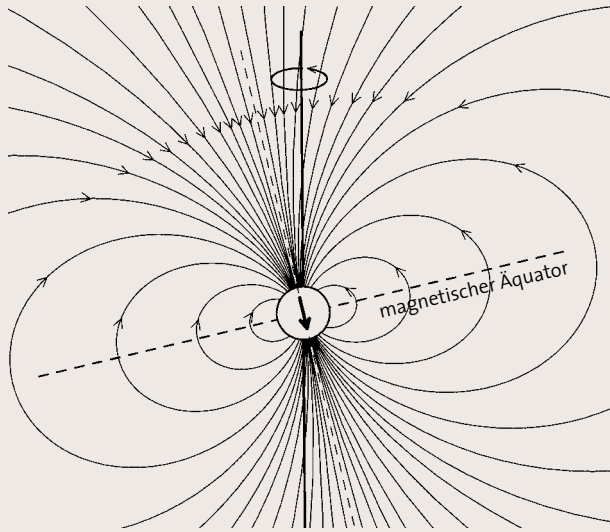
Stilvergleiche von Keramiken erlauben es Archäologen, Siedlungsschichten zeitlich einzuordnen. Beispielsweise zeigen die hier abgebildeten Gefäße – in einer Grube entsorgte Fehlbrände aus Massenproduktion – für das 13. Jahrhundert in Niedersachsen typische Dekorleisten. Nicht minder interessant sind inzwischen aber auch die Töpferöfen selbst (im Hintergrund ist eine verschlackte Wand zu sehen), da sich in ihnen das zur Zeit des Brennens herrschende Erdmagnetfeld einprägt und aus dem ortsfesten Ofen verlässlich wieder auslesen lässt. (Das Foto zeigt eine Präsentation im Ausstellungshaus zur Ton- und Töpfereigeschichte KERAMIK.UM, Fredelsloh.)



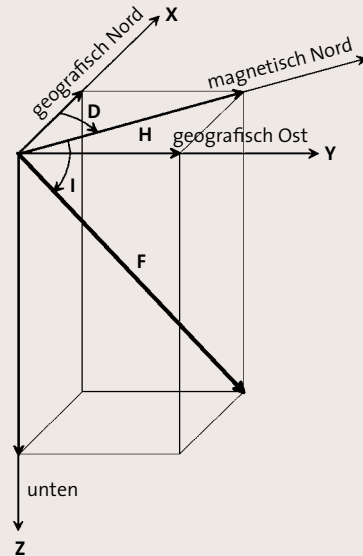
ELISABETH SCHNEPP / AUSSTELLUNGSHAUS KERAMIKUM FREDELSOH

Unser magnetischer Planet

Wahrscheinlich erzeugen schraubenförmige Strömungen der mehrere tausend Grad Celsius heißen und damit flüssigen Metalle im Erdkern das Erdmagnetfeld. Es wird durch die Bewegung der darin enthaltenen Ladungsträger nach dem Dynamo-Prinzip induziert. Zum größten Teil entspricht das Erdmagnetfeld dem eines sehr kurzen Stabmagneten, also einem Dipol,



dessen Achse um etwa elf Grad bezüglich der Rotationsachse der Erde geneigt ist. Die Richtung einer Feldlinie lässt sich an jedem Ort durch zwei Winkel angeben: Die Inklination (I) ist ihre Neigung zur Horizontalen (H), die Deklination (D) gibt die Abweichung zur geografischen Nordrichtung an, die Intensität (F) entspricht der lokalen Feldstärke.



Eisenminerale beim Erkalten der Basalte nach dem aktuellen Feld aus. Noch viele Millionen Jahre später können Geowissenschaftler diese Information aus Gesteinen auslesen und den Epochen der Erdgeschichte zuordnen. Stärke und Richtung des Magnetfelds schwanken aber auch regional und über Zeiträume von oft nur wenigen Jahrzehnten. Hier können menschengemachte »Gesteine« das Feld zum Zeitpunkt ihrer Entstehung aufzeichnen. Dazu gehören insbesondere alle aus Lehm und Ton gebrannten Strukturen sowie eisenhaltige Schlacken. Dabei entstehen die magnetisierbaren Minerale oft erst bei deren Fertigung.

Dem Physiker Giuseppe Folgheraiter von der Accademia Nazionale dei Lincei

in Rom war Ende des 19. Jahrhunderts an etruskischen und griechischen Vasen wohl als Erstem aufgefallen, dass Keramiken gleichen Alters sehr ähnliche Feldwerte gespeichert haben. Unter der Annahme, die Vasen seien auf einer horizontalen Fläche gebrannt worden, ermittelte er die Inklination und vermochte eine zeitliche Entwicklung nachzuzeichnen. Emile und Odette Thellier am Institut de Physique du Globe in Paris widmeten sich systematisch der Methode in den 1930er Jahren. Grundsätzlich benötigt man 10 bis 20 Proben, deren Magnetisierungen im Labor gemessen werden. Anders als bei ^{14}C oder der Thermolumineszenz handelt es

sich dabei vor allem um Größen, die durch Betrag und eine Richtung beschrieben werden. Keramische Gefäße taugen dafür leider nur selten, denn das beim Brennen herrschende Erdmagnetfeld lässt sich nur dann verlässlich aus den Laborwerten errechnen, wenn die genaue räumliche Orientierung der Proben in ihrer ursprünglichen Lage bekannt ist.

Ist das gegeben, erfolgt im nächsten Schritt der Abgleich mit entsprechenden Zeitreihen. Doch erst seit etwa 1600 wurde die magnetische Nordrichtung (fachlich: Deklination)

in Europa notiert, ab dem 18. Jahrhundert zudem die Neigung der Erdmagnetfeldlinie (fachlich: Inklination) bestimmt (siehe Kasten oben), dank der Fortschritte der Physik im 19.

Dank des »magnetischen Vereins« können Physiker das Magnetfeld der Erde mathematisch fassen

Jahrhundert dann auch seine Stärke. Die deutschen Forscher Carl Friedrich Gauß und Wilhelm Weber gründeten dazu einen »Magnetischen Verein« mit Sitz in Göttingen. Weltweit wurde die Entwicklung des Erdmagnetfelds damals in bis zu 50 Observatorien fünf Jahre lang an den meisten Wochentagen im Fünf-Minuten-Takt gemessen. Inzwischen gehören solche Datenerhebungen zum Alltag spezieller Observatorien – sie liegen von magnetischen Störungen wie Stromleitungen entfernt –, ergänzt durch Satellitenmessungen.

Damit lässt sich seit etwa 1830 die zeitliche Entwicklung des Feldvektors für die gesamte Erdoberfläche mathema-

tisch beschreiben; Werte zwischen den Messstationen werden durch so genannte Multipolentwicklung berechnet.

Eine wertvolle Datenquelle boten alte Schiffslogbücher, in denen Angaben zur geografischen Breite und Länge eines Kurses mit denen der Kompassweisung notiert waren. Dank der großen Menge solcher Informationen konnten der britische Physiker Andrew Jackson und der niederländische Nautikhistoriker Art Jonkers, damals an der School of Earth Sciences in Leeds, die Beschreibung des Erdmagnetfelds bis in das Jahr 1600 zurück ausdehnen.

Beschränkung des Messgebiets

Gilt es, eine neuzeitliche Fundstätte zu datieren, kann die Archäomagnetik punkten, denn die Genauigkeit von Radiokohlenstoff- und Thermolumineszenztechnik ist bei einem Alter von wenigen hundert Jahren deutlich schlechter. Doch im Allgemeinen wird auch sie für weiter zurückliegende Zeiten angewendet. Dazu müssen entsprechende Zeitreihen aufgestellt werden, zum Beispiel durch die Messung der Magnetisierung archäologischer Proben, die bereits mit anderen Verfahren datiert wurden. Leider liefert dieses Verfahren nicht dieselbe Präzision wie ein Raster aus 40 bis 50 Messstationen. Zudem sind geeignete Fundstätten sehr ungleich über die Erde verteilt. Verschiedene Arbeitsgruppen haben dennoch Multipolentwicklungen unternommen, doch diese ergaben oft nicht akzeptable Fehler.

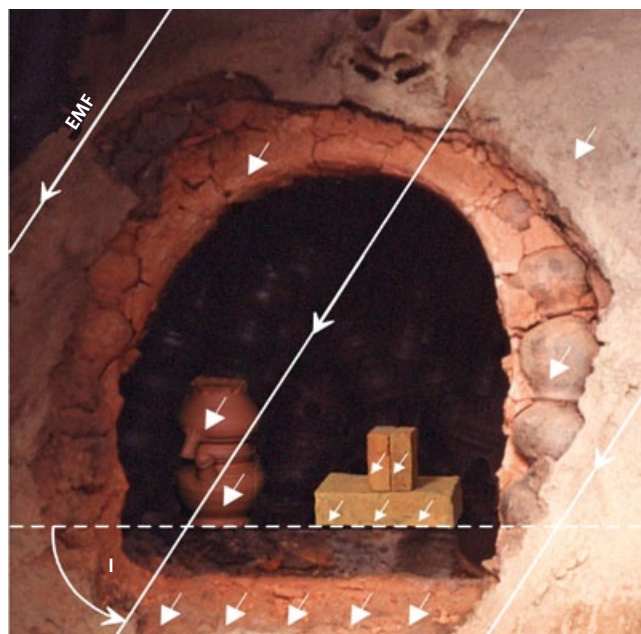
Die Lösung besteht darin, sich auf Gebiete von 500 bis 1000 Kilometer Radius zu beschränken, weil die Feldlinien darin weit gehend parallel verlaufen. Dann sollte es möglich sein, auch mit einer geringeren Zahl von Messorten zeitliche Schwankungen des Erdmagnetfelds zu ermitteln, die sich innerhalb von einem bis wenigen Jahrhunderten vollziehen, die so genannten »Säkularvariationen«. Die erste derartige Kurve wurde 1981 publiziert; sie umfasst den Zeitraum von Christi Geburt bis 1800 und beschränkt sich auf Frankreich. In den 1950er und 1960er Jahren unternahmen Arbeitsgruppen weltweit weitere Anläufe. Die meisten Daten betrafen zwangsläufig Kulturräume in Europa und dem Mittelmeerraum, da es dafür bereits etablierte Chronologien zum Beispiel für Keramiken gab und Schriftzeugnisse oft eine präzise Zeitzuweisung erlaubten. Die umfassendste Kurve entwickelte Mary Kovacheva von der Bulgarian Academy of Sciences in Sofia: Sie rekonstruierte die letzten 8000 Jahre der Erdmagnetfeldvariationen Bulgariens.

Als ich mich 1994 erstmals bei einer Abteilung des Niedersächsischen Amtes für Bodenforschung, aus dem das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) hervorging, mit dem Thema befasste, konnte ich nur auf wenige Daten für den deutschsprachigen Raum zurückgreifen. Insbesondere hatte mein Kollege Rudolf Pucher Ende der 1980er Jahre solche Messungen in einer Pilotstudie in einem denkmalgeschützten Gebäude der Lübecker Altstadt vorgenommen, das urkundlich als Bäckerei verzeichnet war. Bei Renovierungen kam dort eine Reihe von »Brotföbenböden« zum Vorschein. Dabei handelte es sich um die aus gebranntem Lehm beste-

henden Bodenplatten, über die sich einst ein kuppelförmiger Backofen aus Ziegeln wölbte. War eine Platte rissig geworden, wurde einfach eine neue Schicht Lehm aufgetragen, und als der Ofen schließlich zu niedrig geriet, hat man die alte Kuppel abgerissen und eine neue gebaut. Insgesamt dokumentierte Uwe Müller, damals am Amt für Vor- und Frühgeschichte der Hansestadt Lübeck, einen Stapel von 25 Böden aus vier Ofenphasen. Am Ende war der letzte Boden etwa 1,5 Meter über dem Niveau des ersten. Die Ziegelkuppel wurde nun endgültig abgetragen, ein Fußbodenbelag aufgebracht und die so entstandene Stufe zur Lagerung von Mehl verwendet (siehe Bild S. 58).

Um die Messwerte aus der Pilotstudie von Pucher zu präzisieren, nahmen wir etliche weitere Proben. Zuvor mussten wir deren räumliche Orientierung messen. Am einfachsten geht dies, wenn der Ofenboden eine horizontale Fläche ist. Dann kann man nach der Kompassweisung eine Referenzlinie für den geografischen Norden aufmalen. Weil die Ofenböden aber geneigt waren, ermittelten wir mit einer Wasserwaage und einem speziellen Kompass alle notwendigen Informationen, um später die an den Proben gemessenen Magnetisierungsrichtungen in die Inklination und Deklination des einstigen Erdmagnetfelds umzurechnen.

Im Labor wurden die Proben in kleinere Stücke zerlegt und für die Messung in die Röhre eines Kryogenmagnetome-



SCHNEPPE: ARCHÄO- PALÄO- UND UMWELTMAGNETIK. IN: BORK, H.-R. ET AL. UMWELTARCHÄOLOGIE – NATURKATASTROPHEN UND UMWELTWANDEL IM ARCHÄOLOGISCHEN BEFUND. 3. MITTELDEUTSCHER ARCHÄOLOGENTAG 2010 IN HALLE (SAALE). TAGUNGSDAS LANDSCHAFTSMUSEUM FÜR VORGESCHICHTE HALLE, 6. LANDESMUSEUM FÜR DENKMALPFLEGE UND ARCHÄOLOGIE SACHSEN-ANHALT HALLE (SAALE), S. 57-69, 2011, ABB. 3

Magnetische Minerale richten sich beim Brennen von Ton oder Lehm nach dem zu diesem Zeitpunkt herrschenden Erdmagnetfeld (weiße Linien, EMF) aus und konservieren diese Information beim Abkühlen (kleine weiße Pfeile). Wird das Brenngut herausgenommen, geht die Richtungsinformation verloren. Allenfalls die Inklination (I) lässt sich rekonstruieren, sofern die Objekte auf einer horizontalen Fläche (gestrichelte Linie) standen. Im Allgemeinen werden deshalb Stücke vom Ofen vor Ort entnommen und im Labor ausgewertet.

ters eingebracht. Diese schirmt das äußere Feld ab, so dass sich nun die Magnetisierung des Objekts mit drei zueinander senkrecht stehenden, hochempfindlichen, supraleitenden Spulen messen lässt. Für den Fall, dass Körnchen eines ferromagnetischen Materials in der Probe waren, die ihre Magnetisierung schon bei der Entnahme dem heutigen Erdmagnetfeld anpassen und somit die Messung verfälschen würden, wurden die Proben in einem abgeschirmten Ofen in mehreren Stufen aufgeheizt. Nach jedem Schritt ließen wir das Material abkühlen und maßen die Veränderungen der Werte, so lange bis der Zustand stabil blieb. Nun ließen sich die mittlere Richtung und ihr Fehler berechnen. Insgesamt hatten wir mehr als 400 Proben genommen, auf die beschriebene Weise behandelt und durchgemessen.

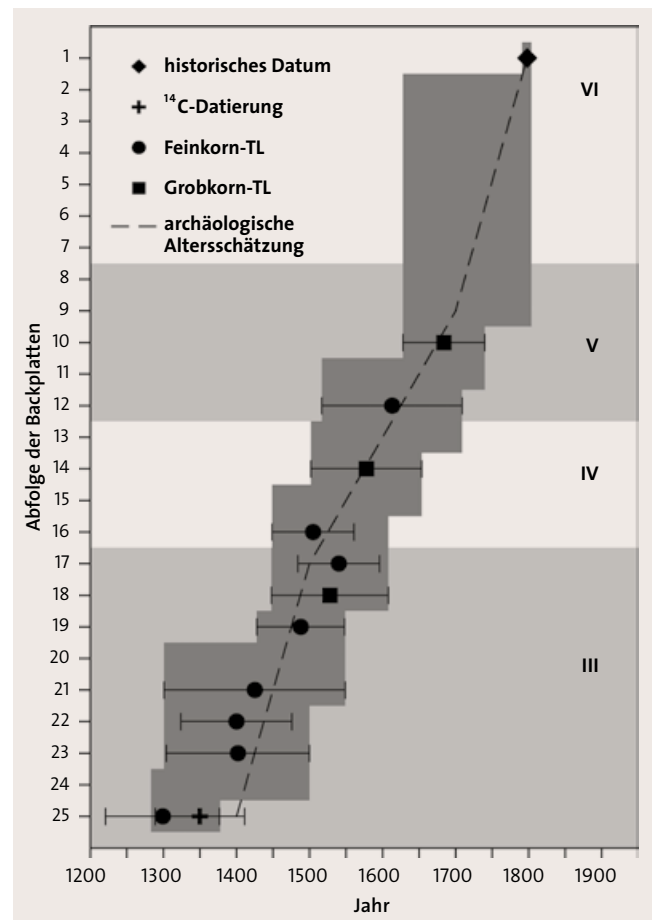
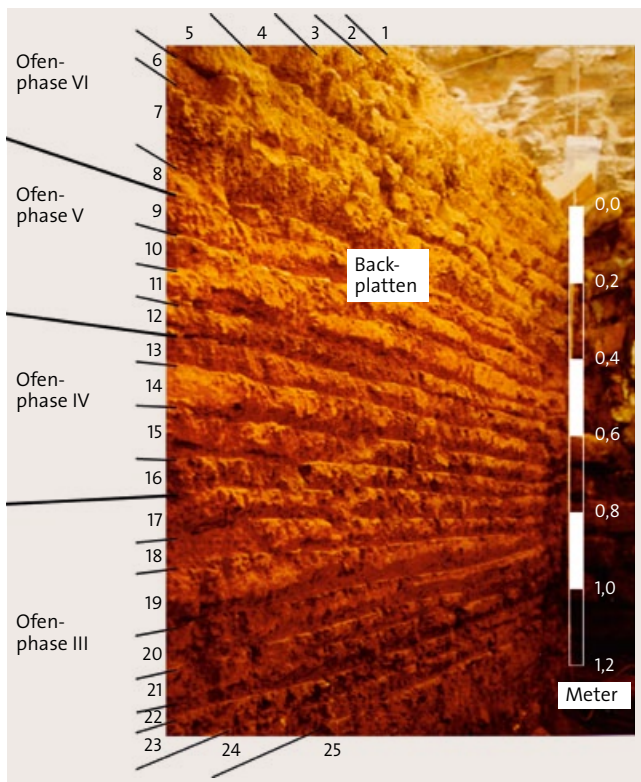
Schon in Dokumenten aus dem Jahr 1301 wurde das Gebäude als Backhaus bezeichnet. Auf Grund weiterer historischer Quellen und des archäologischen Fundmaterials ließ sich der Zeitraum, in dem der fragliche Ofen in Betrieb war, auf das 14. bis 17. Jahrhundert eingrenzen. Die Backplatten waren bei der Untersuchung in den 1980er Jahren zur Hälfte

Historische Dokumente und archäologische Funde verrieten bereits, dass das Backhaus vom 14. bis zum 17. Jahrhundert in Betrieb war

abgetragen worden; die andere Hälfte aber war noch erhalten und auch für uns zugänglich. Wir konnten also mehrmals Proben nehmen. Zudem bargen wir aus dem Ofenschutt unter der tiefsten Platte einige Holzkohlestückchen für eine Radiokohlenstoffdatierung (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2011, S. 48) sowie aus mehreren Plattenschichten Material für eine Thermolumineszenzanalyse; letztere erfolgte im Rathgen-Forschungslabor in Berlin. Als Ergebnis lagen schließlich ein Radiokohlenstoff- und elf Thermolumineszenzalter, 24 Richtungen und 22 Intensitäten des Erdmagnetfelds vor, die zu einem Zeitraum von 400 Jahren gehörten. Zahlreiche weitere archäologische Stätten in Mitteleuropa lieferten zusätzliche Datensätze aus etwa 2500 Jahre Geschichte.

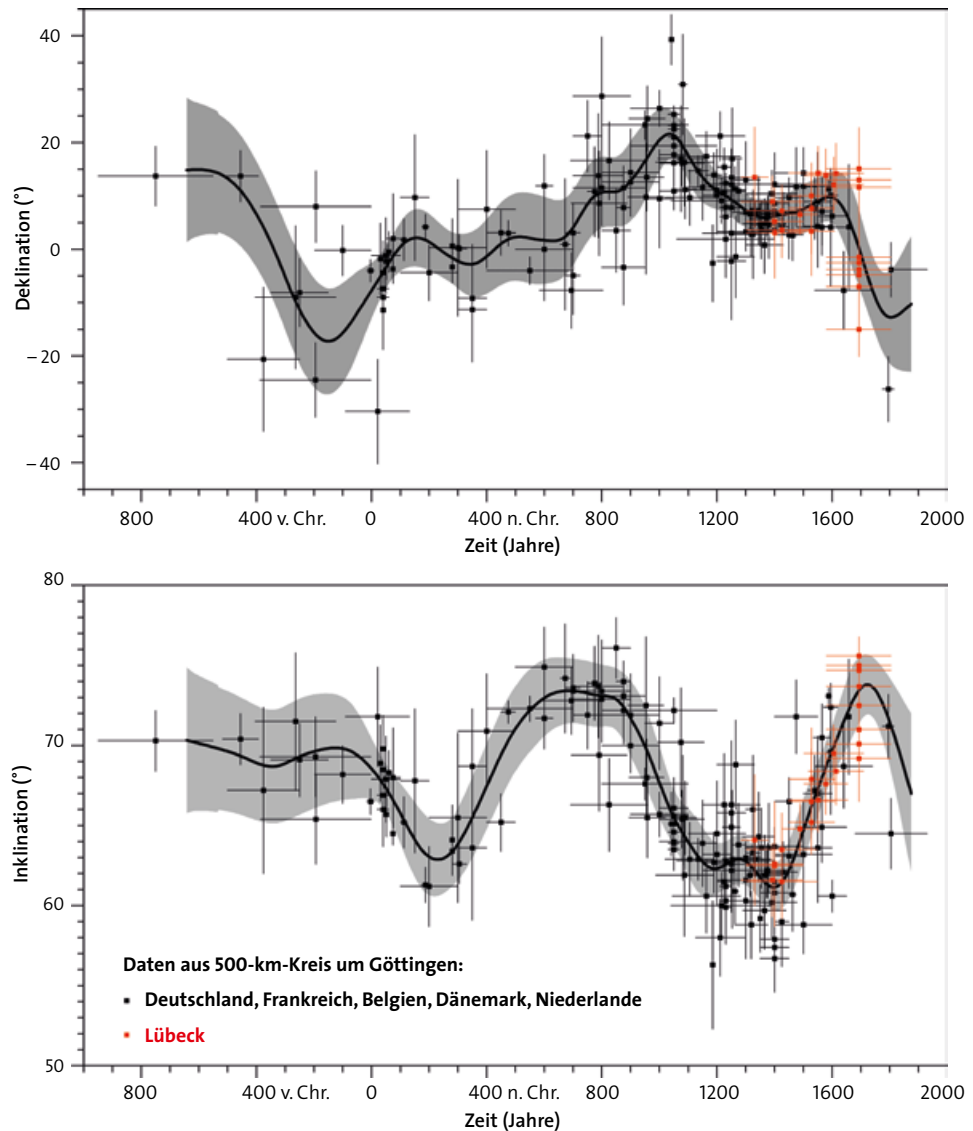
Um daraus Säkularvariationskurven für Deutschland und Österreich zu berechnen, müssen die mehr oder weniger fehlerbehafteten Messwerte gemittelt werden. Erst seit wenigen Jahren geschieht dies nicht mehr nach Augenmaß, sondern computergestützt nach einem mathematischen Algorithmus. Dabei wird ein Zeitfenster, das zwischen 50 und 200 Jahre umfasst, Stück für Stück über den gesamten Da-

Einen Stapel von 25 Backplatten in einer denkmalgeschützten Bäckerei der Lübecker Altstadt (Foto) datierten Forscher mittels Thermolumineszenz- (TL) und Radiokohlenstoffverfahren (^{14}C) und bestimmten die dazugehörigen archäomagnetischen Daten.



BEIDE ABB.: EUSABETH SCHNEPPNACH-SCHNEPPE ET AL.: PALEOMAGNETIC DIRECTIONS AND THERMOLUMINESCENCE DATING FROM A BREAD OVEN-FLOOR SEQUENCE IN LÜBECK (GERMANY). A RECORD OF 450 YEARS OF GEOMAGNETIC SECTULAR VARIATION. IN: JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH 108, B2, 2078, 2003. FIG. 2, 4-4

Als Säkularvariation bezeichnet man die langsame Änderung der Richtung und Intensität des Erdmagnetfelds mit der Zeit (grau: Fehlerbreite). Die Richtungen der Backplatten aus Lübeck wurden zunächst auf den Ort Göttingen umgerechnet (rot), anschließend zusammen mit anderen Daten genutzt, um eine Säkularvariationskurve für Deutschland zu modellieren.



ELISABETH SCHNEPPMACH-SCHNEPPE, E. LANOS, P. ARCHÄOMAGNETISCHE SEKULARVARIATION IN GERMANY DURING THE PAST 2500 YEARS. IN: GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL 163, S. 479-490, 2005, FIG. 4

tensatz verschoben. Zunächst berücksichtigt das Verfahren Daten in einem Startintervall und gewichtet sie so, dass beispielsweise solche mit großer Fehlerbreite weniger Einfluss auf die anschließende Mittelung erhalten als solche mit geringerer Unsicherheit. Der daraus berechnete Mittelwert samt seinem Fehler wird der Mitte des Zeitfensters zugeordnet, dieses anschließend versetzt und der Vorgang wiederholt.

Stetige Kurve statt Abfolge von Einzelwerten

Das Verfahren hat allerdings auch Nachteile. So wird die Fensterbreite vor der Berechnung festgelegt und lässt sich kaum variieren. Zwangsläufig orientiert sie sich an Zeiträumen, für die es wenig Daten gibt, und wird entsprechend groß. Liegt in einem solchen Fenster eine Phase mit hoher Datendichte, können dort interessante Details bei der Mittelung verloren gehen. Ein weiterer Nachteil ist, dass das Verfahren keine kontinuierliche Kurve liefert, sondern eine Abfolge von Einzelwerten – beispielsweise die Inklination zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort. Benötigt man zur

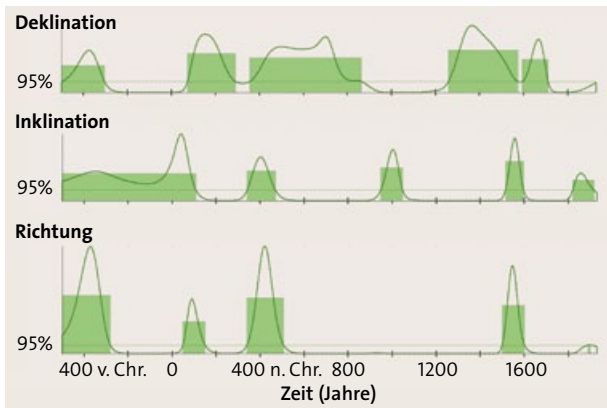
Datierung von Proben Zwischenwerte, müssen diese interpoliert werden, was wiederum je nach Datendichte und Fensterbreite mehr oder weniger genau ist.

Der französische Geophysiker Philippe Lanos vom CNRS Geosciences Rennes verbesserte das Verfahren mittels der so genannten Bayesstatistik, bei der auch anderweitig bekannte Informationen wie die Zuordnung eines Funds zu einer Abfolge von Siedlungsschichten einfließen. Die Fensterbreite passt sich dabei automatisch der Datendichte an, das Ergebnis ist eine durchgehende Kurve.

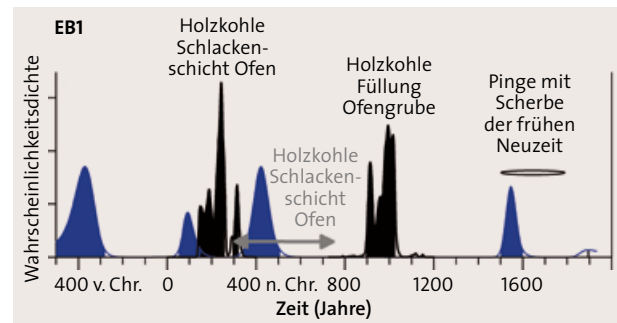
Aus dem Datensatz der Lübecker Backplattenserie sowie weiteren archäomagnetischen Messungen auch aus Fundplätzen in Nachbarländern errechneten wir für ein kreisförmiges Gebiet mit 500 Kilometer Radius die Säkularvariation für Deutschland in den vergangenen 2500 Jahren (siehe Bild oben). Als Referenzpunkt diente Göttingen – es liegt in der Mitte des Gebiets, zudem war dies eine Reverenz an Gauß. Ein Fehlerband gibt den Bereich an, in dem die berechnete Feldrichtung mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent zu einem bestimmten Zeitpunkt lag. Naturgemäß geriet es

Ein Röstherd im Fokus

Für die zeitliche Einordnung der frühen Eisengewinnung im Harz wurden Proben aus drei Öfen beziehungsweise Röstherden bei Elbingerode (EB) genommen und archäomagnetisch untersucht. Hier dargestellt sind die aus Inklination, Deklina-



tion und Richtung des Ofens EB1 jeweils ermittelten Datierungswahrscheinlichkeiten. Die rechte Grafik zeigt die durch Multiplikation berechnete Gesamtverteilung im Abgleich mit Radiokohlenstoffdatierungen. Sie zeigt zwar Mehrdeutigkeiten, doch die Zusammenschau aller Quellen belegt, dass nur die Spätantike (400–800 n. Chr.) als Betriebsphase des Ofens in Frage kommt (blau = archäomagnetische Datierung; schwarz = ^{14}C).



ELSABETH SCHNEPP

ELSABETH SCHNEPP NACH SCHNEPP, E. ARCHÄOMAGNETISCHE DATIERUNG IM ALPER, C. FRÜHMITTELALTERLICHE ERZGEWINNUNG IM SAHLENBURGER BEIRER BERGWERK BEI ELBINGERODE AM BEIENKOPF. IN: ELBINGERODE, E. (Hrsg.) 2015, S. 11. ELBINGERODE, E. (Hrsg.) 2015, S. 11. HELLMUND, J. 2015, S. 11. HELLMUND, J. 2015, S. 11.

umso schmäler, je mehr Daten dem Algorithmus zur Verfügung standen, verläuft also für die vorchristliche Zeit und das Frühmittelalter deutlich breiter als ab dem Hochmittelalter. Der wellenförmige Verlauf der Kurven führt dazu, dass eine archäomagnetische Datierung häufig mehrere mögliche Ergebnisse liefert, die Archäologen auf ihre Plausibilität prüfen müssen.

Welches Potenzial in der Methode steckt, zeigt ein aktuelles Grabungsprojekt am Kleinen Schmidtskopf bei Elbingerode im Harz. Weil dort der Kalksteintagebau die Spuren eines frühen Abbaus von Eisenerz zu zerstören drohte, legte das Team von Götz Alper vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt im Jahr 2007 Suchschnitte an. Sie brachten Abbaugruben (Pingen) und Reste verschiedener Öfen für die Verarbeitung zu Tage.

Verhüttung im Rennofen

Der Verhüttungsprozess hatte bis in die Neuzeit nämlich drei Stufen: Röstöfen reduzierten den Wassergehalt des Erzes bei einigen hundert Grad Celsius und lockerten außerdem seine Struktur für die nachfolgende Zerkleinerung auf. Die eigentliche Verhüttung fand im Rennofen bei mehr als 1000 Grad Celsius statt. Das Ergebnis war ein schwammartiger Eisenbrocken (Luppe) und flüssige Schlacke. Bei den Elbingeröder Öfen wurde diese abgestochen. Danach kam die Luppe in einen Ausheizofen, in dem sie auch geschmiedet wurde, um verbliebene Schlacke und Kohlenstoff zu entfernen. Erst jetzt hatte man massives Eisen gewonnen. Bei guter Erhaltung lassen sich Überreste von Rennöfen von denen der anderen beiden Typen unterscheiden: Sie waren rund oder oval, und ihre Wände bildeten einen Schacht, während Röst- und Ausheizherde flache Wannen waren.

Eine der Siedlungen auf der Elbingröder Hochfläche wurde erstmals wohl 956 in einer Schriftquelle erwähnt, so wundert es nicht, dass die wenigen gefundenen Scherben vor allem in das Mittelalter und in die Neuzeit verweisen. Einige stammten aber auch aus dem 4. Jahrhundert n. Chr. Zudem befand sich im 10. Jahrhundert n. Chr. ein Dorf nahebei, dessen Name Bodfeld überliefert ist. Doch wann genau waren die Öfen in Betrieb gewesen und hatte die mittelalterliche Siedlung überhaupt etwas mit der Erzgewinnung zu tun? Die Archäomagnetik sollte hier gemeinsam mit der Radiokohlenstofftechnik für Aufklärung sorgen. Ich nahm daher Proben aus einem Rennofen, zwei Röstherden und zwei Ausheizgruben.

Mitunter lagen verschiedene Öfen so eng beieinander, dass Archäologen sie als zeitgleich einstufen. Einer dieser Doppelfunde, ein Duo mutmaßlich aus Röstherd und Rennofen, befand sich in der Nähe einer Pinge – also eines Trichters, der durch den Einsturz eines Abbauschachts entstanden war. Aus dessen Füllung wurde eine Scherbe geborgen, die mutmaßlich aus dem ausgehenden 15. Jahrhundert stammt. Schriftquellen würden aber einem gleichzeitigen Betrieb der somit datierten Pinge und der Öfen widersprechen: Zu dieser Zeit waren im Harz die kleinen Schmelzplätze auf den Hügeln längst zu Gunsten großer Verhüttungsplätze in der Nähe von Flüssen aufgegeben worden. Eine Zeitgleichheit ist hier also eher unwahrscheinlich.

Die archäomagnetische Untersuchung des Doppelfunds untermauerte die vermutete Zusammengehörigkeit, denn sowohl Deklination als auch Inklination waren weitgehend identisch. Daher wurden diese beiden Öfen als ein einziger Befund gewertet. Der Abgleich mit der Säkularvariationskurve ergab auf Grund des Fehlerbands vier mögliche Alters-

intervalle (siehe Kasten links). Das jüngste überdeckt zwar das 16. Jahrhundert, ist aus historischer Sicht jedoch wie gesagt unwahrscheinlich. Die Archäologen konnten drei Holzkohleproben zur weiteren Klärung des Alters entnehmen. Eine würde den Röstofen in das 10. Jahrhundert einordnen, doch das passt nicht zu den archäomagnetischen Daten. Möglicherweise gelangte die Holzkohle dorthin, als Sedi- ment den Ofen längst bedeckte – durch ein Tier, das dort seinen Bau hatte. Geringe Spuren organischer Substanzen lieferte auch die Schlacke des zeitgleichen Schmelzofens. Eine vorsichtige Schätzung verweist auf das 4. bis Mitte des 7. Jahrhunderts, was mit dem dritten archäomagnetischen Intervall überlappt.

Die dritte Holzkohleprobe aus einer anderen Schlacke ergab zwei mögliche Altersintervalle, die von der Mitte des 2. Jahrhunderts bis zum Beginn des 4. Jahrhunderts reichen und daher mit dem dritten sowie mit dem zweiten der archäomagnetisch ermittelten Zeitbereiche korrespondieren würden. Der Zweite lässt sich aber ausschließen, bedenkt man den qualitativen Unterschied zwischen beiden Methoden. Die Radiokohlenstoffuhr beginnt nämlich in dem Moment zu ticken, da Zellen kein radioaktives Kohlenstoffisotop ¹⁴C mehr aufnehmen. Bildet ein Baum den nächsten Jahresring, erzeugt der vorherige keine neue Biomasse mehr, nimmt also auch keinen Kohlenstoff mehr auf und seine Uhr startet. Die Radiokohlenstoffmethode liefert daher für Holzkohle nicht den Zeitpunkt der Verbrennung, sondern das Lebensalter der jeweiligen Holzpartie (so genannter Altholzeffekt).

Die Archäomagnetik hingegen ermittelt, wann ein Ofen zum letzten Mal benutzt wurde. Weil das nicht vor dem Wachsen des Baums gewesen sein kann, lässt sich das ältere archäomagnetische Intervall ausschließen. Zudem bestätigen archäobotanische Untersuchungen des Fundareals durch Monika Hellmund vom Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, dass dort in der Zeit von 340 bis 507 n. Chr. große Bäume in ausreichender Zahl wuchsen. Somit dürfte dieses Intervall das wahrscheinlichste für die beiden zeitgleichen Öfen sein.

Die archäomagnetischen Alter und die Radiokohlenstoffdatierung der anderen Funde fallen in das 10. Jahrhundert; aus dieser Nutzungsperiode stammt vermutlich die irritierende, von einem Tier verschleppte Holzkohle. Demnach wurde bei Elbingrode schon in der ausklingenden Spätantike Erz gewonnen und verhüttet, und diese Tätigkeit im 9. Jahrhundert wieder aufgenommen. Diese Wiederbelebung könnte die Siedlung Bodfeld erklären.

Die archäomagnetische Datierung benötigt also oft Zusatzinformationen und eignet sich nicht als Ersatz der zudem kostengünstigeren Radiokohlenstoffdatierung. Sie kann aber helfen, deren Bestimmungen abzusichern, da sie ganz direkt eine Tätigkeit unserer Vorfahren datiert und immer Minimalalter ermittelt. Das erlaubt es, Besiedlungs- oder Aktivitätsphasen näher einzugrenzen. Zudem ist es möglich, anhand der gespeicherten Magnetisierungsrichtungen die Gleichzeitigkeit von Befunden innerhalb von Jahrzehnten oder Jahr-

hunderten zu beurteilen, selbst wenn noch keine Referenzkurve existiert. In der Neuzeit oder im Frühmittelalter, wo sich die Feldrichtung vergleichsweise schnell verändert hat, kann genauer datiert werden als im Hochmittelalter oder in der Römerzeit. Damit ergänzt das Verfahren die Radiokohlenstoffdatierung, die gerade im Frühmittelalter mit größeren Unsicherheiten behaftet ist. In einem von der Europäischen Union geförderten Forschungsnetzwerk (Archaeomagnetic Applications for the Rescue of Cultural Heritage) wurden Kalibrierungskurven für weite Teile Europas ermittelt. Für West-, Mittel-, Süd- und Südosteuropa existieren sie nun, decken jedoch unterschiedliche Zeiträume ab und werden derzeit erweitert.

Gemeinsam mit französischen Kollegen und mitteleuropäischen Archäologen konzentriere ich mich außerdem auf die Hallstattzeit, also den älteren Abschnitt der Eisenzeit, der von etwa 800 bis 475 v. Chr. reichte. An Proben aus Moyenvik in Lothringen versuchen wir neben der Richtung auch die Stärke des damaligen Felds zu ermitteln. Mit meinen Kollegen Karl Fabian von NGU Trondheim und Roman Leonhardt vom ZAMG in Wien arbeite ich an einer Methode, den Zeitaufwand der Messungen der Magnetfeldstärke zu verringern. Noch sind die bisherigen Resultate oft zu fehlerbehaftet, um sie für Altersbestimmungen zu verwenden. Es zeigte sich aber schon, dass das Erdmagnetfeld in der frühen Hallstattzeit fast doppelt so stark war wie heute. Auch die Richtung des Felds variierte stärker, als man es bislang wusste. Wir hoffen, dass unsere Bemühungen letztlich sehr feine Datierungen für den keltischen Raum liefern werden, für den es nur wenige schriftliche Überlieferungen gibt, die zudem aus den Mittelmeerkulturen stammen. ~

DIE AUTORIN



Die Geophysikerin **Elisabeth Schnepf** lehrt und forscht an der Montanuniversität Leoben mit dem Schwerpunkten Paläo- und Archäomagnetismus.

QUELLEN

- Alper, G.:** Archäologische Untersuchungen zur Eisengewinnung am Kleinen Schmidtskopf bei Elbingrode, Lkr. Harz. In: Jahreschrift für Mitteldeutsche Vorgeschichte 95, erscheint 2015
- Batt, C.M., Zananiri, I.:** Archaeomagnetic Applications for the Rescue of Cultural Heritage (AARCH), Edited Special Issue. In: Physics and Chemistry of the Earth 33, S. 403–608, 2008
- Hervé, G., Chauvin, A., Lanos, P.:** Geomagnetic Field Variations in Western Europe from 1500BC to 200AD. Part I: Directional Secular Variation Curve. In: Physics of the Earth and Planetary Interiors 218, S. 1–13, 2013
- Schnepf, E., Lanos, P.:** Archaeomagnetic Secular Variation in Germany During the Past 2500 Years. In: Geophysical Journal International 163, S. 479–490, 2005

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1317947

Met & Co. – Alkopops bei den Nordmännern

Wie kann man etwas über die Trinkgewohnheiten im Skandinavien des 1. Jahrtausends v. Chr. lernen? Indem man Getränke Rückstände in Grabbeigaben chemisch analysiert.

Von Annine Fuchs

Glaubt man griechischen Chronisten, waren die Bewohner Skandinaviens in der Bronzezeit und vorrömischen Eisenzeit (etwa 1800 v. Chr. – 160 n. Chr.) dem Alkohol verfallene Barbaren. Auch heutzutage sind Met saufende Nordmänner eine gängige Vorstellung. Tatsächlich aber wissen Historiker nur wenig über das Nordeuropa jener Zeit, denn eine Schrift war nicht gebräuchlich, die wenigen Berichte stammen daher aus zweiter Hand. Neuerdings liefern naturwissenschaftliche Verfahren aber weitere Daten über den Alkoholkonsum der Nordmänner.

Die antiken Kulturen Mittel- und Südeuropas erhielten ihre Informationen dank eines florierenden Fernhandels. So notierte der römische Geschichtsschreiber Dionysios von Halikarnassos um die Zeitenwende, die Skandinavier bereiten einen Trunk aus Gerste, indem sie es in Wasser verrotten ließen. Zudem wusste Diodor im 1. Jahrhundert v. Chr. von einem Bier, das neben importiertem römischen Wein auch jenes Wasser enthalte, das nach dem Reinigen von Honigwaben übrig blieb. Eine Vorstellung, die ihm undenkbar erscheinen mochte, handelte es sich dabei doch um ein Abfallpro-



dukt und kein reines Wasser, womit man im mediterranen Raum Wein zu verdünnen pflegte.

Altertumsforscher sehen darin einen Hinweis auf den Honigwein Met, der laut archäobotanischen Befunden bereits deutlich früher im Norden bekannt gewesen ist. Eine wichtige Rolle spielt in diesem Zusammenhang ein hölzerner Eimer aus dem so genannten Egtved-Grab, der auf das Jahr 1370 v. Chr. datiert wird. Mikroskopische Untersuchungen von getrockneten Rückständen an den Innenwänden brachten Spuren von Honig, Weizenmalz und verschiedenen Beeren zum Vorschein, typischen Bestandteilen von Met und Bier.

Trinkgefäße und Behältnisse, die wahrscheinlich der Herstellung oder dem Transport alkoholischer Getränke dienten, finden sich im gesamten skandinavischen Raum. Mitunter enthalten sie noch eine Kruste, die neue Informationen über die Trinkgewohnheiten der Nordmänner liefern könnte – sofern die Zersetzung des organischen Materials noch nicht zu weit fortgeschritten ist. Ein Spezialist für diese Fragen ist Patrick E. McGovern, Leiter des Biomolecular Archaeology Project for Cuisine, Fermented Beverages, and Health am University of Pennsylvania Museum in Philadelphia. Seit mehr als 20 Jahren setzt er dafür naturwissenschaftliche Methoden ein; so konnte er mittels chemischer Analysen nachweisen, dass vergorene Getränke schon um 9000 v. Chr. in China bekannt waren. In einem internationalen Team aus Forschern verschiedener Disziplinen untersucht er nun die

AUF EINEN BLICK

BARBARISCHE SITTEN

1 Griechische und römische Chronisten hielten die Trinksitten der Völker des Nordens für unkultiviert: Diese tranken **unverdünnten Wein** und mischten ihn oft mit anderen Alkoholika wie Honigwein.

2 Um solche Aussagen zu überprüfen, untersuchen Wissenschaftler eingetrocknete **Rückstände in Grabbeigaben**.

3 Mit **Verfahren der Lebensmittelanalytik** wiesen Forscher Substanzen nach, die bestätigen, dass die Nordmänner tatsächlich schon in der Antike so etwas wie **Met** kannten, ihm aber auch gern **Wein, Bier oder diverse Kräuter zusetzten**.

Um die Zeitenwende war eine junge Frau auf der heute zu Dänemark gehörenden Insel Lolland mit allerlei Beigaben beerdigt worden. So entdeckten die Archäologen in dem »Juellinge-Grab« nicht nur gläserne Becher und ein Trinksieb (Mitte), sondern auch eine bronzene Situla (rechts) mit Getränkerückständen.



MIT FELD. GEN. VOM NATIONALMUSEUM DÄNEMARK / ROBERTO FORTUNA & MIRA LISSEM

Trinkgefäße von vier archäologischen Stätten der fraglichen Zeit in Dänemark und Schweden.

Aufschlussreiche Daten lieferte das nach dem Fundort auf der dänischen Insel Lolland benannte Juellinge-Grab. Dort war eine junge Frau um die Zeitenwende mit wertvollen Beigaben bestattet worden. Neben Schmuck und bronzenem Kosmetikkästchen gehörten nicht nur zwei Trinkhörner dazu, wie man sie in einem nordischen Grab durchaus erwarten würde, sondern auch ein römisches Weinsset, bestehend aus einer bronzenen Situla – einem eimerförmigen Behälter –, gläsernen Bechern und einem Sieb, um das Getränk zu filtern. Dass man es der Verstorbenen sogar in die Hand gelegt hatte, unterstreicht die Integration mediterraner Trinksitten in den gehobenen Kreisen der nordischen Gesellschaft. Denn es handelt sich nicht um einen Einzelfund. So barg das schon 1920 ebenfalls auf Lolland entdeckte Männergrab von Hoby Trink- und Speisegeräte aus einer Werkstatt in Capua. Flemming Kaul, Wissenschaftler der Abteilung Danmarks Oldtid (Dänemarks Altertum) am dänischen Nationalmuseum weist darauf hin, dass sich dieses Phänomen auch bei den Gräbern offenkundig weniger reicher Personen der vorrömischen Eisenzeit nachweisen lässt: Die den Toten mitgegebenen Ess- und Trinkgeschirre bestanden zwar aus Ton, waren aber mitunter den römischen Metallwaren nachempfunden.

Bierwürze und Weinsäure im Rückstand

An der Innenseite der Juellinge-Situla hatten sich Rückstände erhalten, die schon 1911 mikroskopisch untersucht wurden. Damals wurden organische Reste entdeckt, die von Gerstenkörnern, Beerenfrüchten und Hefezellen herrühren konnten – für die Wissenschaftler ein deutlicher Hinweis auf ein durch Gärung gewonnenes alkoholhaltiges Getränk. Mit modernen Analyseverfahren sollten diese alten Befunde nun bestätigt und weitere Informationen gewonnen werden.

Aus diesem Grund unterzog McGovern eine Juellinge-Probe zunächst der Fourier-Transform-Infrastrukturmetrie (FT-IR): Die absorbierten Anteile einer Abfolge von Infrarotlicht verschiedener Frequenzen bestätigte, dass nach wie vor organische Stoffgruppen vorhanden waren. Mit verschiedenen Verfahren der Lebensmittelanalytik trennten die Chemiker sie auf und identifizierten die darin vertretenen Substanzen mit Massenspektrometern und Gaschromatografen.

Auf diese Weise wiesen sie ein Pflanzenwachs nach, das man auf den Schalen von Preisel- und Moosbeeren findet. Die Kruste enthielt außerdem Verbindungen, wie sie in Wacholderzweigen und Blättern des Gagelstrauchs vorkommen. Letztere dienten in Nordeuropa vermutlich seit der Zeitenwende zum Würzen von Bier, als Heilmittel sowie zur Verlängerung der Haltbarkeit.

Vor allem aber fanden die Forscher mehrfach Spuren von Weinsäure, die neben Weinstein ein deutlicher Hinweis auf Traubenwein ist. Weil Reben im kühlen Norden nicht gedeihen, und es laut McGovern auch keine anderen Pflanzen in Skandinavien gab, die diese Säure enthielten, ist er sich ziem-

lich sicher, dass Diodor Recht hatte: Die Nordmänner importierten römischen Wein. Sie haben ihn dann aber – anders als Römer und Griechen – nicht mit Wasser gemischt, sondern wohl mit einheimischen Produkten wie Bier und Honigwein, zu etwas, das er »Nordischen Grog« nennt.

Peter Steen Henriksen, Met-Experte des dänischen Nationalmuseums, mahnt allerdings zur Vorsicht: Gerade der Weinnachweis sollte nicht überstrapaziert werden. Denn die Situla war selbst Importware, könnte also schon in der römischen Welt dem Mischen von Wein gedient haben. Dann wären die Rückstände möglicherweise nicht erst durch den Gebrauch in Lolland entstanden. Um dies zu klären, schlägt er vor, anhand mikroskopischer Schnitte zu untersuchen, ob sich in der Rückstandskruste verschiedene Schichten unterscheiden lassen.

Zwar repräsentiert die Juellinge-Probe nur einen Ort und Zeitabschnitt, doch auch die anderen drei Fundorte der jüngsten Untersuchungen zeigen ähnliche Bilder. Demnach bevorzugten die Nordmänner alkoholische Mischgetränke aus Getreide, Honig und Früchten – denen sie mitunter römischen Wein beimengten. McGovern und seine Kollegen glauben zudem, dass es den Nordmännern auch um die medizinische und desinfizierende Wirkung alkoholischer Getränke ging. Sie begründen dies mit dem bis in die Neuzeit üblichen Genuss von Wein und Bier an Stelle des oft durch Fäkalien und Produktionsabfälle verunreinigten Wassers. Auch Inhaltsstoffe wie die Blätter des Gagelstrauchs und Wacholderzweige wertet er in diese Richtung.

Dass sie ihren »Grog« unverdünnt tranken, galt Diodor und seinen Zeitgenossen aber als Ausdruck mangelnder Kultur. Auch den Met achteten Griechen und Römer gering, was diesem sicher nicht gerecht wurde. Denn Honig zu beschaffen war keine leichte Aufgabe, weshalb Met als Getränk der nordischen Oberschicht anzusehen ist. ☞

DIE AUTORIN

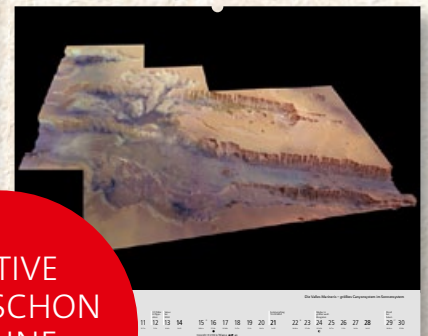
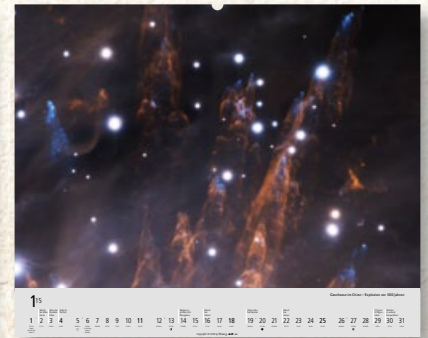


Annine Fuchs studierte Klassische Archäologie, Archäobotanik und Paläopathologie. Sie schreibt als freiberufliche Autorin zu archäologischen und kulturwissenschaftlichen Themen.

QUELLEN

- Both, F. (Hg.):** Gerstensaft und Hirsebier. 5000 Jahre Biergenuss. Isensee, Oldenburg 1998
- McGovern, P.E.:** European Bogs, Grog, Burials and Binges. In: McGovern, P.E. (Hg.): *Uncorking the Past: The Quest for Wine, Beer and Other Alcoholic Beverages*, University of California Press, S. 129–158, 2009
- McGovern, P.E. et al.:** A Biomolecular Archaeological Approach to »Nordic Grog«. In: *Danish Journal of Archaeology* 2, S. 112–131, 2013; online: 10.1080/21662282.2013.867101
- Nelson, M.:** *The Barbarian's Beverage – a History of Beer and Ancient Europe*, Routledge, London 2005

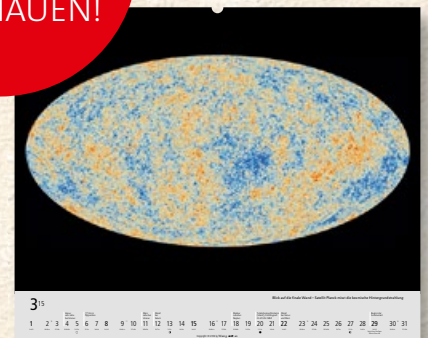
Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1317950



**MOTIVE
JETZT SCHON
ONLINE
ANSCHAUEN!**

DER NEUE BILDKALENDER HIMMEL UND ERDE 2015

Sterne und Weltraum präsentiert im Bildkalender »Himmel und Erde« insgesamt 13 herausragende Motive aus der astronomischen Forschung. Sie stammen aus verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: dem sichtbaren Licht, dem Infrarotlicht, dem Mikrowellen- und Radiowellenbereich. Vom Valles Marineris auf Mars geht es zu Gas- und Staube nebeln im Milchstraßensystem, von fernen Galaxien bis hin zur Finalen Wand, als die Strahlung nach dem Urknall von der Materie entkoppelte. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2015 und erläutert ausführlich auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern abgebildeten Objekte.
14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

sterne-und-weltraum.de/kalender2015

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!

Die Auferstehung der Amerikanischen Kastanie

Ein eingeschleppter Pilz vernichtete die einstmals riesigen Kastanienwälder Nordamerikas fast vollständig. Dank aufwändiger Kreuzungsprogramme sowie moderner Gentechnik könnten sie in absehbarer Zeit wieder neu entstehen.

Von William Powell

Im Jahr 1876 erhielt der amerikanische Landschaftsarchitekt Samuel B. Parsons (1844–1923) eine Schiffsladung mit Kastaniensamen aus Japan und beschloss, die Bäume heranzuziehen und zu verkaufen. Offensichtlich beherbergte die Fracht aber einen blinden Passagier, der eine der größten Umweltkatastrophen verursachte, die jemals über Nordamerika hereingebrochen sind. Die Samen waren wahrscheinlich mit den Sporen des Pilzes *Cryphonectria parasitica* kontaminiert, gegen den asiatische Kastanien Resistenzen entwickelt haben – aber nicht deren amerikanische Vettern. *C. parasitica* ist der Erreger des Kastanienrindenkrebsses. Bei einem dafür anfälligen Baum ruft er Wucherungen sowie eingesunkene Bereiche abgestorbenen Pflanzengewebes in seiner Rinde hervor, die den Baumstamm umgreifen und den Wasser- und Nährstofftransport zwischen Wurzeln und Blättern abschnüren. Innerhalb von 50 Jahren vernichtete der Pilz mehr als drei Milliarden Kastanienbäume.

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts machte die Amerikanische Kastanie (*Castanea dentata*) etwa ein Viertel aller

Hartholzbäume in ihrem Verbreitungsgebiet aus: den östlichen Laubwäldern der USA sowie kleinen Bereichen von Kanada. Heute sind davon nur noch wenige ausgewachsene Exemplare übrig – und Millionen Wurzelstümpfe. Hin und wieder schaffen es solche noch lebenden Stümpfe, ein paar Schösslinge auszutreiben, die dann auch mal zehn Jahre oder länger überdauern können. Aber meist kommen sie nicht so weit, Samen zu produzieren, da der Pilz sie fast immer wieder heimsucht und niederringt.

Zu ihrer Glanzzeit galt die Amerikanische Kastanie als Schlüsselart der nordostamerikanischen Wälder, die von entscheidender Bedeutung für die Gesundheit einer Vielzahl von Organismen in ihrem Ökosystem war. Verschiedenste Vogelarten, Insekten und kleinere Säugetiere nisteten auf ihren Ästen oder lebten in ihrer Rinde. Bären, Rotwild, Truthähne, Blauhäher, Eichhörnchen und andere Tiere ernährten sich von den großen nahrhaften Kastanien. Nach dem massenhaften Verlust der Bäume gingen die Wildbestände zurück, und die Artenvielfalt nahm ab. Die Eichen, welche die Kastanien seitdem ersetzt haben, können lange nicht so viele Tiere versorgen; ihre Eicheln sind nur halb so nährstoffreich. Und Kastanien brachten einst weit größere Erträge als die Eichen heutzutage, zum Teil weil sie erst später im Jahr blühten, wenn die Frostgefahr für die zarten Knospen geringer war.

Auch der ökonomische Wert der Amerikanischen Kastanie war beträchtlich. Ihre Früchte können als Nahrung oder zur Herstellung von Ethanolkraftstoff dienen. Da der Baum rasch wächst und festes, geradfaseriges sowie vor allem äußerst verrottungsbeständiges Holz besitzt, liefert sie ausgezeichnetes Baumaterial. Wäre die Kastanie weiterhin stark verbreitet, würden Böden und andere tragende Flächen wahrscheinlich meist aus ihrem Holz gefertigt statt aus druckimprägniertem Holz anderer Bäume, das oft Schwermetalle und andere Konservierungstoffe enthält, die Umwelt und Gesundheit gefährden können.

Lange wirkte es unausweichlich, dass von der Amerikanischen Kastanie nur noch eine verblässende Erinnerung bleibt. Doch glücklicherweise zeigen sich nun klare Hoff-

AUF EINEN BLICK

GENTECHNIK IM DIENST DER BIODIVERSITÄT

1 In ihrer Blütezeit vor mehr als einem Jahrhundert spendete die **Amerikanische Kastanie** in den nordostamerikanischen Wäldern vielen anderen Lebewesen Schutz und Nahrung. Dann vernichtete ein von Menschen **eingeschleppter Pilz** innerhalb von 50 Jahren mehr als drei Milliarden Bäume.

2 Um die Amerikanische Kastanie zu retten, haben Wissenschaftler sie mit ihrem widerstandsfähigeren chinesischen Vetter **gekreuzt**. Ein präziserer und erfolgreicherer Ansatz, pilzresistente Bäume zu erhalten, schleust **Resistenzgene von Weizen** oder anderen Pflanzen in die Kastanie ein.

3 Sofern die staatliche Genehmigung erteilt wird, diese veränderten Bäume in der freien Natur auszupflanzen, wird die Amerikanische Kastanie die erste **gentechnisch erzeugte Pflanze** sein, mit der eine **bedrohte Spezies** in ihrem ursprünglichen Verbreitungsgebiet wieder angesiedelt wird.



Die fünf imposanten Bäume im Vordergrund des Fotos von zirka 1910 sind Amerikanische Kastanien. Ein solcher Anblick ist heute nicht mehr zu finden.

FOREST HISTORY SOCIETY

nungsschimmer. Nach einem Jahrhundert wirkungsloser Bemühungen, den Kastanienrindenkrebs zu bekämpfen, verfolgen Forscher derzeit zwei Ansätze mit einigem Erfolg. Der eine davon versucht, resistente Amerikanische Kastanien mit Hilfe der konventionellen Gartenbautechnik der Hybridisierung zu züchten; besonders aktiv ist hier die American Chestnut Foundation. Nach Kreuzung mit der weitaus kleineren, aber pilzresistenten Chinesischen Kastanie sollen dabei durch mehrfache Rückkreuzung mit Amerikanischen Kastanien deren Charaktereigenschaften so weit wie möglich erhalten werden, ohne dass die für die Krebsresistenz verantwortlichen Gene verloren gehen. Das Ergebnis des komplexen Züchtungsprogramms ist ein Baum, dessen Erbgut zu etwa 94 Prozent dem der Amerikanischen Kastanie entspricht, der aber zumindest theoretisch die Resistenz des chinesischen Verwandten besitzen sollte. Seit einigen Jahren wachsen nun mehrere Zehntausend dieser Kastanienhybriden auf Testflächen, wo sie auf ihre Empfindlichkeit nicht nur dem Kastanienrindenkrebs, sondern auch Witterungseinflüssen, Wildschäden und anderen Krankheiten gegenüber überprüft werden.

Meine Mitarbeiter und ich konzentrierten uns dagegen auf den zweiten Ansatz, der die DNA der Kastanie direkt ver-

ändert. Er geht wesentlich präziser vor als traditionelle Züchtungen und besitzt das Potenzial, pilzresistente Bäume in größeren Mengen und in kürzerer Zeit zu produzieren. Wir entnahmen unter anderem Weizen und der Chinesischen Kastanie verschiedene Gene und bauten sie in das Erbgut der Amerikanischen Kastanie ein. Auf diese Weise haben wir Hunderte solcher »transgener« Bäume erzeugt, von denen sich einige mindestens genauso gut wie ihre asiatischen Vettern gegen *C. parasitica* wehren können. Sofern das Landwirtschaftsministerium (USDA), die Umweltbehörde (EPA) sowie die Lebens- und Arzneimittelbehörde (FDA) der USA unsere Bäume zulassen – was bis 2019 geschehen könnte –, werden dies die ersten transgenen Organismen sein, die eine Schlüsselart wieder in ihrem natürlichen Umfeld ansiedeln.

»Chestnuts roasting on an open fire«

Es gibt auch andere Bestrebungen, gefährdete oder ausgestorbene Spezies mit gentechnischen und anderen biotechnologischen Methoden wiederzubeleben, etwa Wandertaube, Beuteltiger oder Mammut. Verglichen damit wäre die Wiederbelebung der Amerikanischen Kastanie allerdings mit weit weniger Hürden und deutlich größerem Nutzen verbunden. Im Gegensatz zu solchen Tieren brauchen Bäume keine Ersatzmütter und keine Erziehung oder Sozialisation. Und als riesiger Organismus, der vielen anderen eine Heimstatt bietet, kann eine einzelne Kastanie die Gesundheit des Waldökosystems wesentlich deutlicher verbessern als irgendein individuelles Tier.

Als ich ein Kind war, beschränkte sich mein Wissen über Kastanien wie bei vielen heutigen Erwachsenen in den USA auf die erste Zeile eines bekannten Weihnachtslieds, »Chestnuts roasting on an open fire«. Aber schon 1983 begann ich als Doktorand bei dem Pflanzenpathologen Neal Van Alfen, damals an der Utah State University, starkes Interesse für den prächtigen Kastanienbaum und seinen tragischen Untergang durch einen exotischen pathogenen Pilz zu entwickeln.

Nachdem ich 1989 an das State University of New York (S.U.N.Y.) College of Environmental Science and Forestry in Syracuse gewechselt hatte, trat der 2012 verstorbene Stanley Wirsig von der American Chestnut Foundation an meinen Kollegen Charles Maynard und mich heran. Er wollte das aktuelle Kastanien-Hybridisierungsprogramm der Stiftung durch ein neues Wiederaufforstungsprojekt ergänzen, das sich gentechnischer Methoden bedient. Diese kamen gerade erst auf und versprachen eine schnellere und präzisere Möglichkeit zur Schaffung resistenter Amerikanischer Kastanien. Eine meiner Aufgaben war es, ein Gen zu finden, das die Bäume gegen *C. parasitica* resistent machen könnte. Währenddessen entwickelten Maynard und Scott Merkle von der University of Georgia die nötigen Techniken, um dieses Gen in Kastanienbaum-Embryonen einzuschleusen. Falls alles wie geplant lief, würden die Embryonen – kleine Pakete sich schnell vermehrender Zellen – zu Bäumen mit der Fähigkeit, den Pilz zu bekämpfen, heranwachsen.



CARY BRASH

Der Pflanzenphysiologe Gary J. Griffin von der Virginia Polytechnic Institute and State University untersucht mit einem Vergrößerungsglas ein Geschwür einer infizierten Kastanie.

Zu jener Zeit hatte noch nie jemand versucht, einen Baum gentechnisch so zu verändern, dass er einen virulenten Pilz bekämpfen kann. Aber es gab ein paar Ideen, wie wir das angehen könnten. Im Lauf der Jahre hatten Wissenschaftler einige wichtige Details darüber gelernt, wie *C. parasitica* die Kastanien angreift. Das Pathogen bildet zarte Gespinste, so genannte Myzelfächer, die Oxalsäure produzieren. Diese frisst sich dann durch die Baumrinde und verschafft so dem Pilz Eintritt. Während der Erreger sich seinen Weg in den Baumstamm bahnt, reagiert die Pflanze auf den Angriff mit Ausbildung einer Wucherung: dem Rindenkrebs.

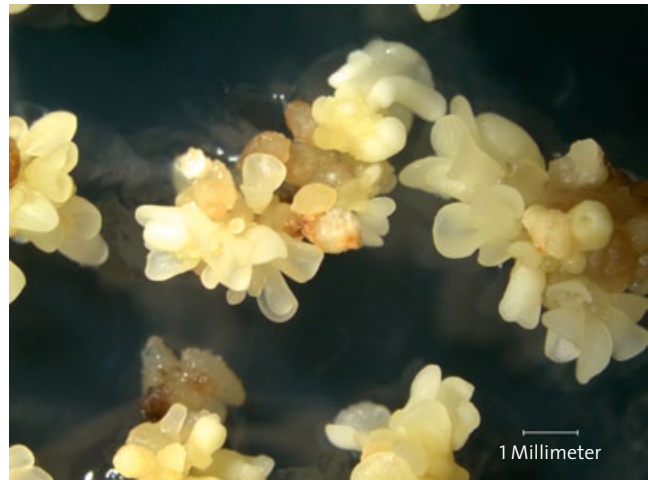
Zunächst suchten wir nach einer Möglichkeit, den Myzelfächer zu schwächen. Wir wussten, dass die Immunsysteme vieler Pflanzen und Tiere über kurze Aminosäureketten verfügen, die Pilzzellen zerstören – so genannte antimikrobielle Peptide (AMPs). Anlehnend an die AMP-Gene des Afrikanischen Krallenfroschs als Modell konstruierten wir von Grund auf neue Erbfaktoren, um Peptide zu erhalten, die *C. parasitica* bekämpfen können. Wir hofften, dass die Myzelfächer schlaffer und dadurch gutartig würden, wenn gentechnisch veränderte Kastanienbäume wenigstens kleine Mengen dieser AMPs produzierten. Da solche Peptide aber notorisch instabile Moleküle sind, benötigten wir eine Alternative.

Oxalsäure – die chemische Waffe des Pilzes als geeignetes Angriffsziel

Ungefähr zu dieser Zeit gab mir ein Doktorand ein Buch, das viele der Studien zusammenfasste, die kurz zuvor auf der Jahrestagung der Amerikanischen Gesellschaft der Pflanzenbiologen präsentiert worden waren. Eine der Untersuchungen löste bei mir ein Aha-Erlebnis aus. Sie war von Ousama Zaghmout und Randy Allen, damals beide an der Texas Tech University in Lubbock, durchgeführt worden und drehte sich um ein Weizengen für ein Enzym namens Oxalatoxidase, das Oxalsäure abbaut – also genau jene ätzende Substanz, die der Pilz produziert. Die Forscher hatten sogar bereits einen Weg gefunden, dieses Gen namens *OXO* in Pflanzen einzuschleusen: Sie bauten es in die Mikrobe *Agrobacterium* ein – ein Bodenbakterium, das DNA in Pflanzenzellen übertragen kann – und brachten die Pflanzen in Kontakt mit dem veränderten Mikroorganismus. Die resultierenden transgenen Gewächse wurden dadurch resistent gegenüber einem Oxalsäure produzierenden Pilz namens *Sclerotinia sclerotiorum*. Vielleicht könnten wir bei der Amerikanischen Kastanie ja ähnlich vorgehen, schoss mir durch den Kopf.

Zu jenem Zeitpunkt konnten wir allerdings keinen der beiden gentechnischen Ansätze an Kastanien testen, da wir immer noch nicht herausgefunden hatten, wie man diese empfindliche Pflanze im Labor heranzieht. Also entschieden wir, die *OXO*-Methode zunächst bei einem anderen Baum prinzipiell zu überprüfen: der Hybridpappel, die gut untersucht ist und oft für Experimente genutzt wird. Haiying Liang, damals am College of Environmental Science and Forestry, stellte transgene Exemplare her, die entweder das *OXO*-Gen oder unser AMP-Gen enthielten. Als die Bäume alt

genug waren, infizierten wir sie mit *Septoria musiva* – einem Pilz, der ziemlich viel Oxalsäure produziert und in Hybridpappeln Blattfleckenkrankheit und Krebsgeschwüre verursachen kann. Die meisten der so behandelten Bäume blieben aber relativ gesund. Damit hatten wir es geschafft, eine Baumsorte mit gentechnischen Methoden pilzresistent zu machen. Nun mussten wir das Kunststück mit der richtigen Baumart und dem richtigen Pilz wiederholen.



Embryonales Gewebe aus Kastaniennüssen wird zum Wachsen auf Nährboden angeregt (oben). Ändert man dessen Zusammensetzung, treiben die Klumpen Sprosse und schließlich Wurzeln.

Während Liang die Pappelerperimente durchführte, ging Linda McGuigan, seinerzeit ebenfalls Doktorandin am College, daran, herauszufinden, wie man im Labor Kastanienbäume aus Embryonen zieht. Manche Pflanzen wie Karotten und Petunien lassen sich bemerkenswert einfach im Labor züchten. Bei Versorgung mit genügend Wasser, Nährstoffen und bestimmten Hormonen wachsen beispielsweise aus einem winzigen Blattstückchen neue Sprösslinge und Wurzeln. Die Amerikanische Kastanie zeigte sich nicht so kooperativ. Aufbauend auf den Arbeiten früherer Studenten verbrachte McGuigan zweieinhalb Jahre damit zu lernen, wie man Weizengene mit Hilfe von *Agrobacterium* erfolgreich in embryonale Kastanienbaumzellen einbringt und dann diese im Labor zu jungen Bäumen heranzieht. Normalerweise wachsen die sich schnell teilenden Zellen des Kastanienembryos innerhalb der schützenden Hülle eines heruntergefallenen Samens, schieben durch diesen hindurch Wurzeln in den Boden und treiben schließlich grüne Sprösslinge in Richtung Sonne. McGuigan lernte, Licht, Feuchtigkeit und Temperatur gemäß den normalerweise innerhalb eines Samens herrschenden Bedingungen zu steuern und die Gabe verschiedener Hormoncocktails auf die unterschiedlichen frühen Entwicklungsstadien abzustimmen, um das Wachstum der Wurzeln und Sprösslinge auszulösen.

Im Jahr 2006 konnten wir die ersten transgenen Amerikanischen Kastanien auf Versuchsfelder pflanzen. Die Bäume benötigen mindestens zwei bis drei Jahre, bis sie eine Größe erreichen, bei der wir sie mit dem Kastanienrindenkrebspilz konfrontieren können. Um die Produktion der Oxalatoxidase auf bestimmte Gewebe zu beschränken, hatten wir das OXO-Gen an einen Promotor angehängt – eine Art genetischen Schalter, der festlegt, wie oft eine Zelle die Geninformationen abliest. Wir hofften, die resultierenden geringen Konzentrationen des Enzyms würden den Pilz bekämpfen, ohne unerwünschte Nebenwirkungen zu verursachen. Leider erfüllte sich diese Hoffnung nicht: Die erste Serie an Bäumen konnte dem Erreger nicht widerstehen. Die Pflanzen starben zwar etwas langsamer als normal, aber letztendlich erlagen sie der Krankheit.

Bis 2012 hatten wir einen neuen Promotor für das OXO-Gen konstruiert und produzierten Bäume, die weit größere Mengen des säureabbauenden Enzyms herstellten. Und endlich hatten wir Erfolg! Die neuen Pflanzen widerstanden sich

der Pilzkrankheit fast genauso gut wie die Chinesische Kastanie. Zudem haben wir inzwischen eine Technik entwickelt, welche die Resistenz gegen den Kastanienrindenkrebs bereits an den Blättern eines nur wenige Monate alten Baums messen kann. Wir müssen also nicht mehr drei Jahre warten, um zu erfahren, ob das Experiment funktioniert hat. Bei diesem Test ritzen wir die Blätter leicht an, infizieren sie mit dem Pilz und warten darauf, dass sich von der Wunde ausgehend ein Kreis absterbenden Gewebes bildet. Je kleiner der abgestorbene Bereich, desto resistenter ist der Baum. Einige unserer neuesten Exemplare, die in all ihren Geweben Oxalatoxidase herstellen und 2013 ausgepflanzt wurden, könnten sogar noch resistenter sein als die Chinesische Kastanie. Wir müssen das vorläufige Ergebnis noch bestätigen, wenn die Bäume älter geworden sind – aber es sieht so aus, als ob das aus dem Weizen stammende Gen unsere Erwartungen übertroffen hat.

Aufwändige Gensuche

Oft werden wir gefragt, warum wir nicht einfach nach den Resistenzgenen der Chinesischen Kastanie suchen und diese statt des Weizengens verwenden. Aber als wir damals unser Forschungsprojekt starteten, hatte noch niemand das Genom der Chinesischen Kastanie gründlich untersucht. Es hätte zu viel Zeit und zu viele Ressourcen gekostet, die vielen verschiedenen Gene zu lokalisieren, die vermutlich für eine so komplexe Eigenschaft wie die Resistenz gegen den Kastanienrindenkrebs verantwortlich sind. Jedes dieser Gene würde wohl nur einen kleinen Beitrag zu der Fähigkeit des Baums, den Pilz zu bekämpfen, liefern und daher für sich allein genommen wahrscheinlich ineffizient sein.

Inzwischen sind jedoch bereits 27 Erbfaktoren identifiziert, die an der Resistenz der Chinesischen Kastanie gegen den Kastanienrindenkrebs beteiligt sein könnten: die Früchte einer kürzlich unter Federführung der Forest Health Initiative erfolgten Gemeinschaftsarbeit vieler Forscher. Nach bisherigen Ergebnissen scheinen zwei dieser Gene die Bäume jeweils mit einer immerhin mittelstarken Widerstandskraft auszustatten. Die Untersuchungen mit den anderen Gen-Kandidaten laufen noch.

Joseph Nairn von der University of Georgia in Athens hat uns zudem zwei weitere Gene zur Untersuchung gegeben: Das eine produziert ein Weintraubenzym, das die Bildung des für Pilze giftigen Resveratrols unterstützt; das andere ist ein Pfeffergen und kodiert ein AMP, das unmittelbar Pilzzellen am Wachsen hindert. Letztendlich wollen wir die Amerikanische Kastanie mit vielen verschiedenen Genen ausrüsten, die auf unterschiedlichen Wegen Resistenz verleihen. Dann wird der Baum nicht hilflos sein, selbst wenn der Pilz gegen einen der eingebauten Verteidigungsmechanismen unempfindlich würde.

Inzwischen wachsen mehr als 1000 transgene Kastanienbäume auf Versuchsfeldern, die meisten im Bundesstaat New York. Bevor wir aber Bäume im Wald auspflanzen können, müssen die oben erwähnten staatlichen Regulationsinstitute FDA, USDA und EPA sicherstellen, dass die gen-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema »Wald und Waldsterben« finden Sie unter



www.spektrum.de/wald





Die Amerikanische Kastanie ist mit der europäischen Ess- oder Edelkastanie verwandt. Sie enthält meist drei Nüsse pro Frucht.

technisch veränderten Kastanien sich nicht auf irgendeine unerwartete Weise signifikant von normalen Bäumen, dem »Wildtyp«, unterscheiden. Im Gegensatz zu den Kreuzungen, die wegen der von den chinesischen Vetterern stammenden DNA-Anteile genetisch merklich von der Amerikanischen Kastanie abweichen, enthalten unsere transgenen Bäume nur sehr wenige neue Erbfaktoren. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass die Wurzeln des Wildtyps und der gentechnisch veränderten Kastanien die gleiche Symbiose mit nützlichen Pilzen eingehen. Auch wachsen unter den modifizierten Bäumen vergleichbare Gemeinschaften kleinerer Pflanzen. Dieselben Insektenspezies besuchen transgene wie Wildtypbäume, und die Früchte beider Sorten habe gleiche Nährstoffzusammensetzung. Sobald diese Untersuchungen abgeschlossen sind, werden wir bei USDA, EPA und FDA den gleichen regulierungsfreien Status beantragen, den sie bereits genetisch veränderten Feldfrüchten zuerkannt haben.

Eine letzte Hürde stellt dann die Akzeptanz durch die Öffentlichkeit dar. Ermutigend ist, dass viele Leute, die genetische Modifikationen normalerweise ablehnen, bei der Amerikanischen Kastanie eine Ausnahme machen. Manche begründen dies damit, dass Menschen das Verschwinden der Kastanien zu verantworten haben und dies nun auch wieder in Ordnung bringen sollen. Andere akzeptieren das Vorhaben, da wir nicht auf Profit aus sind und die Bäume nicht patentieren lassen wollen.

Außerdem sind die Umweltrisiken einer Wiederaufforstung mit Amerikanischen Kastanien vernachlässigbar. Das Risiko, dass Pollen der transgenen Kastanienbäume die eingeschleusten Gene in andere Pflanzen übertragen, ist sehr gering. Pollen einer Baumart kann nur dieselbe oder sehr nah verwandte Arten befruchten. Die Amerikanische Kastanie hat aber zumindest im nördlichen Teil ihres natürlichen Verbreitungsgebiets keine engen Verwandten. In den

südlichen Bereichen treten gelegentlich Kreuzungen mit Zwergkastanien (*Castanea pumila*) auf. Aber auch diese Art wird vom Kastanienrindenkrebs befallen und würde von einer gewissen genetischen Widerstandskraft profitieren. Im Idealfall könnte transgener Pollen die Resistenz auf zumindest einen Teil jener verbliebenen Baumstümpfe der Amerikanischen Kastanien übertragen, deren neue Austriebe bis zur Blüte kommen, und somit so viel von ihrer genetischen Vielfalt retten wie möglich. Dann entstünde letztlich eine krebsresistente Population, die dieser einst herausragenden Schlüsselart im Lauf der Zeit wieder ihre frühere Bedeutung verschafft.

Der Kastanienrindenkrebs ist aber nicht die einzige Bedrohung für die Baumwelt, die sich mit gentechnischen Methoden ausrotten ließe. Wir verlieren derzeit den Kampf gegen viele andere exotische Schädlinge wie die Hemlocktannenlaus (*Adelges tsugae*) und den Asiatischen Eschenprachtkäfer (*Agrilus planipennis*) – einen metallisch grünen Käfer, dessen Larven einen Tunnel unter der Rinde von Eschen bohren – sowie die Verursacher des Plötzlichen Eichensterbens und der »Thousand Cankers Disease« bei der Walnuss, um nur einige zu nennen. Hier müssen wir rasch handeln. In den meisten Fällen sind die traditionellen Züchtungstechniken jedoch zu langsam. Nur mit Hilfe der Gentechnik können wir dann artenreiche und gesunde Wälder bewahren. ~

DER AUTOR



William Powell ist Professor am College of Environmental Science and Forestry der State University of New York, wo er den Einsatz von Biotechnologie gegen Waldkrankheiten erforscht.

QUELLEN

- Merkle, S. A. et al.:** Restoration of Threatened Species: A Noble Cause for Transgenic Trees. In: *Tree Genetics & Genomes* 3, S. 111–118, 2007
- Newhouse, A. E. et al.:** Transgenic American Chestnuts Show Enhanced Blight Resistance and Transmit the Trait to T1 Progeny. In: *Plant Science* 228, S. 88–97, 2014
- Newhouse, A. E. et al.:** Chestnut Leaf Inoculation Assay as a Rapid Predictor of Blight Susceptibility. In: *Plant Disease* 98, S. 4–9, 2014

WEBLINKS

- www.acf.org
Die Non-Profit-Organisation American Chestnut Foundation versucht, die Amerikanische Kastanie durch Kreuzung mit der Chinesischen Kastanie pilzresistent zu machen und wieder anzusiedeln.
- www.esf.edu/chestnut
Das gentechnisch ausgerichtete American Chestnut Research and Restoration Project bietet viele Informationen zu den Fortschritten der Forschung und den verwendeten Methoden.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1319589

NICHTKOVALENTE WECHSELWIRKUNGEN

Verbunden werden auch die Schwachen mächtig

Über Gestalt und Verhalten von Molekülen bestimmen oft Kräfte,
die längst nicht so stark sind wie echte chemische Bindungen.

VON ROALD HOFFMANN

Schon immer hatte ich eine Schwäche für starke Bindungen und energiereiche Reaktionen, weil sie einfach zu beobachten und zu verstehen sind. Sie lassen Feuer brennen und bilden die Basis für einen Großteil der industriellen Chemie. Starke Bindungen halten zum Beispiel das Methanmolekül (CH_4) zusammen. Darin teilen sich das Kohlenstoff- und ein Wasserstoffatom jeweils ein Elektronenpaar. Chemiker bezeichnen das als kovalente Bindung. In Salzen wie Natriumchlorid liegen dagegen Ionen vor, die sich elektrostatisch anziehen. Deshalb spricht man hier von einer ionischen Bindung. Auch sie ist sehr stark.

Vieles in der Welt um und in uns beruht jedoch auf subtileren atomaren und molekularen Wechselwirkungen, die zehn- bis hundertmal schwächer sind. Stellen Sie sich vor, Sie tauchen einen Pinsel ins Wasser oder sehen in einem Hollywoodklassiker, wie der Filmstar Esther Williams in den Pool springt – was sie stets mit aufregender Lässigkeit und einer tollen Frisur tat. Wenn der Pinsel oder die »badende Venus« wieder aus dem Wasser hochkommen, kleben die Haare aneinander. Instinktiv würde man sagen, das liege daran, dass sie nass sind. Aber Vorsicht: Schauen Sie den Pinsel unter Wasser an – die Haare stehen voneinander ab, und nasser geht es wohl kaum.

Die Nässe kann daher nicht für das Verklumpen verantwortlich sein. Verursacht wird es vielmehr durch die schwachen Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen,

die auf den Haaren verblieben sind und diese einschließen. Der Zusammenhalt zwischen ihnen äußert sich makroskopisch als so genannte Oberflächenspannung. Diese sorgt unter anderem dafür, dass sich in den Wolken Wassertropfen bilden und Taumelkäfer auf Teichen nicht untergehen. Der britische Physiker Charles Vernon Boys (1855–1944) hat dafür einst den schönen Ausdruck »Wasserhaut« geprägt.

Solche schwachen Bindungen sind allgegenwärtig, und das verleiht ihnen eine ungeahnte Macht. So beeinflussen sie im Fall von Wasser die Geologie und das Klima der gesamten Erde. In Körperzellen entscheiden sie maßgeblich darüber, wie sich Proteine falten. Außerdem verbiegen sie die Erbsubstanz DNA zur imposanten wendeltreppenartigen Doppelhelix. All das machte mich letztthin wankend in meiner Vorliebe für hohe Energien.

Die kumulative Macht von kleinen Effekten

Was aus einem Blickwinkel groß erscheint, kann aus einem anderen klein sein, und Energie lässt sich auf vielerlei Art messen. Unter hohen Energien verstehe ich solche von mindestens einem Elektronenvolt pro Molekül. Das entspricht 23,1 Kilokalorien oder 96,5 Kilojoule pro Mol, wobei ein Mol gleich der Atom- oder Molekülmasse in Gramm ist und $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen enthält. Ein Photon aus dem gelben Bereich des Spektrums hat eine Energie von ungefähr 2,1 Elektronenvolt. Die Wasserstoffbrücken, welche die DNA-Basen-

paare in meinem Körper zusammenhalten, sind dagegen um etwa eine Zehnerpotenz schwächer.

In der theoretischen Chemie suchte ich nach Molekülen, deren spezielle Anordnung von Bindungen mindestens ein Elektronenvolt stabiler ist als jede andere Konfiguration. Desgleichen interessierte ich mich für Reaktionen, deren Aktivierungsenergie – die am Start zu überwindende Barriere – wenigstens ein Elektronenvolt unter der jeder konkurrierenden Umsetzung lag, so dass sie viel leichter abliefen.

Um die Ausgangsstoffe und Produkte einer chemischen Reaktion theoretisch zu beschreiben, braucht man die Quantenmechanik; denn die schrödingersche Wellengleichung liefert die Energien der entsprechenden Materiewellen. Ich glaube, der eigentliche Grund, warum ich große Energiewerte den kleinen vorzog, war mein Unvermögen, diese äußerst komplizierte Gleichung exakt zu lösen. Ich beschränkte mich auf grobe Näherungen und erhielt die Energien deshalb nur auf etwa ein Elektronenvolt genau. Für Reaktionen mit hohem Energieumsatz ist das gut genug.

Bei alldem wusste ich natürlich, dass auch wesentlich kleinere Energiedifferenzen bei fundamentalen molekularen Prozessen – etwa in den Körperzellen – eine entscheidende Rolle spielen können. Durch die Summierung vieler winziger Unterschiede gelingt es der Natur, solche Vorgänge präzise zu steuern. Das gilt zum Beispiel für Proteine, die als Werkzeuge für das Knüpfen und



PICTURE ALLIANCE

PICTURE ALLIANCE / MARY EVANS PICTURE LIBRARY



Filmstar Esther Williams demonstrierte als »badende Venus« einst glamourös das Wirken schwacher Kräfte. Unter Wasser schwebt ihr Haar frei (rechts), aber wenn sie auftaucht, klebt es wegen der durch Wasserstoffbrückenbindungen vermittelten Oberflächenspannung zusammen (links).

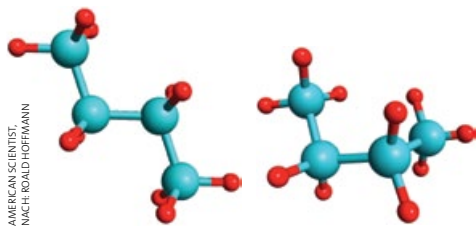
Lösen von Bindungen dienen. In diesen hochkomplexen Molekülen aus mehr als 100 Aminosäuren schaffen kleine Unterschiede bei der Faltung und Variationen bei den Komponenten äußerst fein abgestimmte Andockstellen für die jeweiligen Reaktionspartner.

Über die Summe von winzigen Wechselwirkungen kann die Natur zum Beispiel exakt einstellen, wie schnell eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung (C-C) gespalten wird, in welcher geometrischen Anordnung sich Sauerstoff (O₂) an ein Substrat anlagert oder wann eine Nervenzelle ein Signal aussendet. Zwar bietet die Biologie auch Raum für große Energiepakete: Man denke nur an die zwei bei der Fotosynthese aufgenommenen Lichtquanten. Doch binnen Kurzem verteilt sich dieser heftige

Energiestoß auf eine Kaskade von vielen kleinen Umsetzungen. Diese Aufteilung maximiert zugleich den Wirkungsgrad des Gesamtprozesses und sorgt so dafür, dass ein Höchstmaß der in den Lichtquanten steckenden Energie in Adenosintriphosphat (ATP), den Energieträger der Zelle, umgewandelt wird. Aber auch in der Technik gewinnt die Addition von winzigen Effekten zu etwas Großem zunehmend an Bedeutung, sei es bei Anwendungen der Nanotechnologie oder der Entwicklung von Quantencomputern.

Für die Wasserstoffbrückenbindung, die nasse Haare aneinanderkleben lässt, braucht es ein Wasserstoffatom, das mit einem sehr auf Elektronen erpicht (»elektronegativen«) Element wie Sauerstoff oder Stickstoff verknüpft

ist. Dieses erhebt deshalb einen größeren Anspruch auf das gemeinsame Elektronenpaar der kovalenten Bindung und zieht es weiter zu sich herüber. Das verleiht dem Wasserstoff eine schwach positive Ladung. Gerät er nun in die Nähe einer negativen Ladung, typischerweise das einsame Elektronenpaar eines benachbarten Sauerstoff- oder Stickstoffatoms, kommt es zu einer elektrostatischen Anziehung zwischen beiden. Das ist zumindest die in Chemikerkreisen übliche Erklärung der Wasserstoffbrückenbindung. Ich bin da anderer Ansicht, aber das zu erörtern, würde hier zu weit führen. Die Energie einer solchen Wechselwirkung beträgt im Allgemeinen weniger als fünf Kilokalorien pro Mol oder 0,2 Elektronenvolt.

AMERICAN SCIENTIST,
NACH ROALD HOFFMANN

Durch eine Rotation um die frei drehbare mittlere C–C-Bindung geht beim Butan (C_4H_{10}) die *anti*- (links) in die *gauche*-Form (rechts) über.

Außer den Wasserstoffbrücken gibt es noch andere kleine Kräfte. Dazu zählen etwa die multipolaren Wechselwirkungen, bei denen eine dauerhafte Asymmetrie der Elektronenverteilung im Molekül für eine elektrostatische Anziehung oder Abstoßung sorgt. Eine wichtige Rolle in der Natur spielen außerdem die so genannten Dispersionskräfte, die nach ihrem Entdecker, dem niederländischen Physiker Johannes Diderik van der Waals (1837–1923), auch Van-der-Waals-Wechselwirkungen heißen. Sie sind die Ursache dafür, dass Gase sich beim Abkühlen irgendwann verflüssigen und bei genügend tiefen Temperaturen schließlich zu einem Festkörper erstarren – jedenfalls in den allermeisten Fällen.

1930 lieferte der deutsch-amerikanische Physiker Fritz London (1900–1954) eine quantenmechanische Erklärung für diese Wechselwirkungen, weswegen man manchmal auch von londonschen Dispersionskräften spricht. Physikalisch beruhen sie darauf, dass eine vorübergehende Schwankung der Elektronenverteilung in einem Atom eine lokale Asymmetrie der Elektronen bei seinem unmittelbaren Nachbarn verursacht. Die Elektronen der Wechselwirkungspartner stimmen ihre Bewegungen also aufeinander ab. Daraus resultiert eine Anziehungskraft, die mit der 6. Potenz des Abstands zwischen den beteiligten Atomkernen abfällt.

Die Stärke der Dispersionskräfte richtet sich grob danach, wie groß die Oberfläche der jeweiligen Atome oder Moleküle ist. Bei zwei Heliumatomen sind sie deshalb winzig, weshalb dieses Element bei extrem tiefen Temperatu-

ren zwar flüssig, aber unter Normaldruck nie fest wird. Anders verhält es sich bei ausgedehnten Molekülen wie den Kohlenwasserstoffen im Kerzenwachs. Trotzdem stellt auch hier der Abfall mit $1/R^6$ sicher, dass die Anziehung nur dann wirkt, wenn zwei Atome sich sehr nahe kommen.

Warum Kohlenwasserstoffe gerne kuscheln

Unverzweigte langkettige Kohlenwasserstoffe – fachsprachlich auch Alkane genannt – gehören zu den einfachsten organischen Molekülen. Ihre allgemeine Formel lautet $CH_3(CH_2)_nCH_3$. Sie kommen zum Beispiel im Benzin vor, wo sie einen Wert von n um die 6 haben. Mit steigendem n gelangt man zu Dieseltreibstoff, Kerosin, Öl und Schmiermitteln. Bei noch höheren Werten sind Alkane schließlich fest. Dann kann man sie praktisch zu nichts mehr gebrauchen außer für Kerzenwachs.

Bei solchen Kohlenwasserstoffen entscheiden schwache Wechselwirkungen über die genaue räumliche Anordnung der Atome im kettenförmigen Molekül und damit über dessen äußere Form. Denn Alkane enthalten frei drehbare C–C-Bindungen. Rotationen um diese Bindungen führen zu so genannten Konformationen, die jeweils leicht unterschiedliche Energien haben. Chemiker interessieren sich für die spezielle Gestalt eines Moleküls, weil diese gewissermaßen Teil seiner Persönlichkeit ist, das heißt sein Verhalten und seine Reaktionen beeinflusst.

Im Innern einer Kohlenwasserstoffkette haben Abschnitte aus vier Kohlenstoffatomen jeweils die Wahl zwischen einer gestreckten »*anti*-Konformation« und zwei gewinkelten Formen, die spiegelbildlich zueinander sind und als *gauche*-Konformationen bezeichnet werden (Bild oben). Die Energiedifferenz zwischen den beiden Typen beträgt nur eine Kilokalorie pro Mol. Das entspricht gerade einmal 1/50 der Energie eines Photons, das bei der Photosynthese vom Chlorophyllmolekül absorbiert wird. Um so viel ist die *gauche*-Konformation energiereicher als die gebogene *anti*-Form.

Der Unterschied zwischen den beiden Konformeren beruht auf einer Drehung um 120 Grad um die mittlere C–C-Bindung. Hier macht sich eine weitere schwache Wechselwirkung bemerkbar, welche die Molekülgeometrie beeinflusst. Über deren genaue Natur sind sich meine Theoretikerkollegen immer noch uneins. Gemeinhin ist von einer »sterischen« Hinderung die Rede, weil sich die an dem C–C-Gerüst sitzenden Wasserstoffatome bei der Drehung räumlich etwas stören. Dadurch besteht eine kleine Energiebarriere für die Rotation in Höhe von etwa drei Kilokalorien pro Mol.

Für die Frage, welche Konformation ein Alkan einnimmt, spielt außer der Energie aber auch die Entropie eine Rolle. Diese spiegelt den Grad der Unordnung im Molekül wider, wobei ein hoher Wert begünstigt ist. Da es zwei *gauche*-Formen gibt, repräsentieren diese einen weniger geordneten Zustand als die nur in einer Version existierende *anti*-Konformation und werden daher von der Entropie bevorzugt. Folglich dürfte nur am absoluten Temperaturnullpunkt bei $-273,15$ Grad Celsius ausschließlich die eingefrorene *anti*-Konformation von unverzweigtem Butan vorliegen. Ansonsten gibt es stets genügend aus molekularen Stößen stammende Energie, so dass zu einem gewissen Prozentsatz auch die *gauche*-Konformation auftreten sollte.

Zu guter Letzt spielen – und damit komme ich zum eigentlichen Punkt – auch Dispersionskräfte eine entscheidende Rolle. Zur Veranschaulichung betrachte man zwei Konformationen des längerkettigen unverzweigten Alkans $C_{18}H_{38}$ (Bild rechts). Die eine ist die gestreckte *all-anti*-Form. Die andere gleicht einer Haarnadel, wobei zwei *gauche*-Drehungen für die scharfe Biegung in der Mitte sorgen.

Dieser Knick kostet Energie, aber nur ganz wenig: Der Preis pro *gauche*-Drehung beträgt, wie erwähnt, etwa eine Kilokalorie pro Mol. Doch durch die Biegung kommen die beiden Kettenhälften nun seitlich nebeneinander zu liegen. Zwischen ihnen wirken deshalb anziehende Dispersionskräfte, die der

gestreckten *all-anti*-Form versagt bleiben. So klein sie im Einzelnen auch sein mögen, in der Summe geben sie irgendwann den Ausschlag: Der Gewinn an Energie durch die Dispersionskräfte im gebogenen Molekül überwiegt bei länger-kettigen Alkanen den Verlust durch die *gauche*-Konformationen. Das Molekül, von dem man bei oberflächlicher Betrachtung denken könnte, es sei gestreckt, bevorzugt in Wahrheit also manchmal die Haarnadelform!

Meines Wissens war es Jonathan Goodman von der University of Cambridge (England), der diese Idee 1999 als Erster zu Papier gebracht hat. Theoretische Überlegungen aus seiner und anderen Forschungsgruppen ergaben, dass der Übergang von einer gestreckten zu einer gebogenen (oder noch stärker verknäulten) Konformation für Moleküle der Form $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_3$ etwa bei $n=16$ stattfindet, also bei 18 Kohlenstoffatomen. Der experimentelle Beweis dieser Hypothese gelang vor gut zwei Jahren Nils O.B. Lüttschwager und seinen Kollegen an der Universität Göttingen.

Ein recycelbares molekulares Filter

Schwache Bindungskräfte spielen aber nicht nur in der Natur eine große Rolle, sondern lassen sich auch für neuartige Untersuchungsmethoden nutzen. Das Große vom Kleinen zu trennen ist

sehr wichtig in der Wissenschaft. Das geschieht zum Beispiel bei der Gelelektrophorese oder beim Zentrifugieren. Die Entwicklung von Nanofiltern hat neue Wege eröffnet, um schnell kleine Teilchen von noch kleineren abzusondern, aber bis vor Kurzem wurden schwache Bindungen dabei nicht genutzt, weil darauf basierende Materialien gewöhnlich instabil sind. Doch 2011 gelang es Boris Rybtchinski und seinen Mitarbeitern am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel), ein Nanofilter herzustellen, das nur durch schwache Wechselwirkungen zusammengehalten wird. Es hat den weiteren Vorteil, wiederverwertbar zu sein.

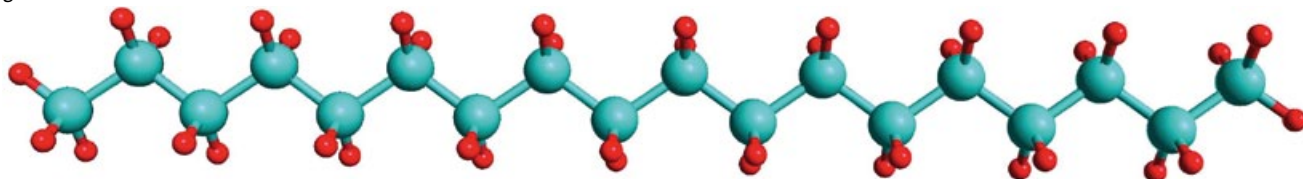
Um dieses Nanofilter zu erhalten, gossen die israelischen Wissenschaftler die Lösung eines Moleküls – nennen wir es PP2b, den komplizierten systematischen Namen will ich Ihnen ersparen – auf eine herkömmliche Membran. Dort entstand daraus ein farbiges Gel, das kleine Nanoteilchen hindurchtreten ließ und größere zurückhielt. Bei Zugabe einer Mischung aus Wasser und Ethanol – der Alkoholgehalt entsprach dabei dem eines guten Wodkas – löste sich das Gel wieder auf und passierte zusammen mit den großen Partikeln die Membran. Beide ließen sich anschließend leicht voneinander trennen, so dass das PP2b bereit für den nächsten Einsatz war.

Die Magie solcher supramolekularen Polymere beruht auf einer ausgeglichenen Balance zwischen hydrophoben und hydrophilen Wechselwirkungen, die eine Abneigung oder Vorliebe für eine wässrige Umgebung widerspiegeln. Ist ein Teil eines Moleküls polar, liegen dort also positive und negative Ladungen räumlich getrennt vor, dann sucht dieser Teil die Nähe von Wasser, während ein unpolares Molekülsegment sie eher meidet und stattdessen ein fettiges Milieu bevorzugt. Die Funktion von Seifen und Tensiden etwa beruht auf Bereichen mit hydrophoben und hydrophilen Wechselwirkungen. Eine solche Balance ist auch für die Herstellung manch anderer guter Dinge in dieser Welt nützlich, zum Beispiel Majonäse.

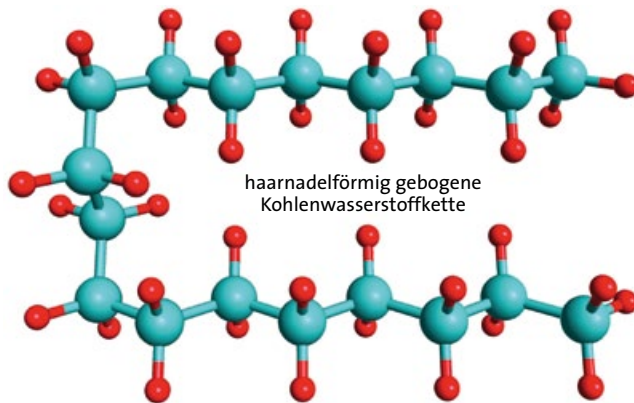
Die plättchenartigen Kohlenwasserstoffringe in der Mitte von PP2b (siehe Bild S. 76) sind unpolar, während der $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}$ -Teil, der sich durchschnittlich 19-mal wiederholt, den polaren, wasserfreundlichen Teil bildet. In vielen Lösungsmitteln, darunter auch das häufig verwendete THF (Tetrahydrofuran), liegt PP2b als isoliertes Molekül mit zwei Schwänzen vor. Aber in Gegenwart von großen Wassermengen kommen die hydrophilen und hydrophoben Wechselwirkungen zum Tragen. Die Wassermeidenden Plättchen rücken dann dicht zusammen und bilden Aggregate,

Weil die *gauche*-Konformation energiereicher ist als die *anti*-Form, sollte der langkettige Kohlenwasserstoff $\text{C}_{18}\text{H}_{38}$ vorzugsweise als gestrecktes Molekül (unten) vorliegen. Bei einer haarnadelförmig gebogenen Anordnung der Kette treten jedoch anziehende Dispersionskräfte zwischen den nebeneinanderliegenden Molekülhälften auf. Deshalb ist diese Konformation in Wahrheit energetisch günstiger.

gestreckte Kohlenwasserstoffkette

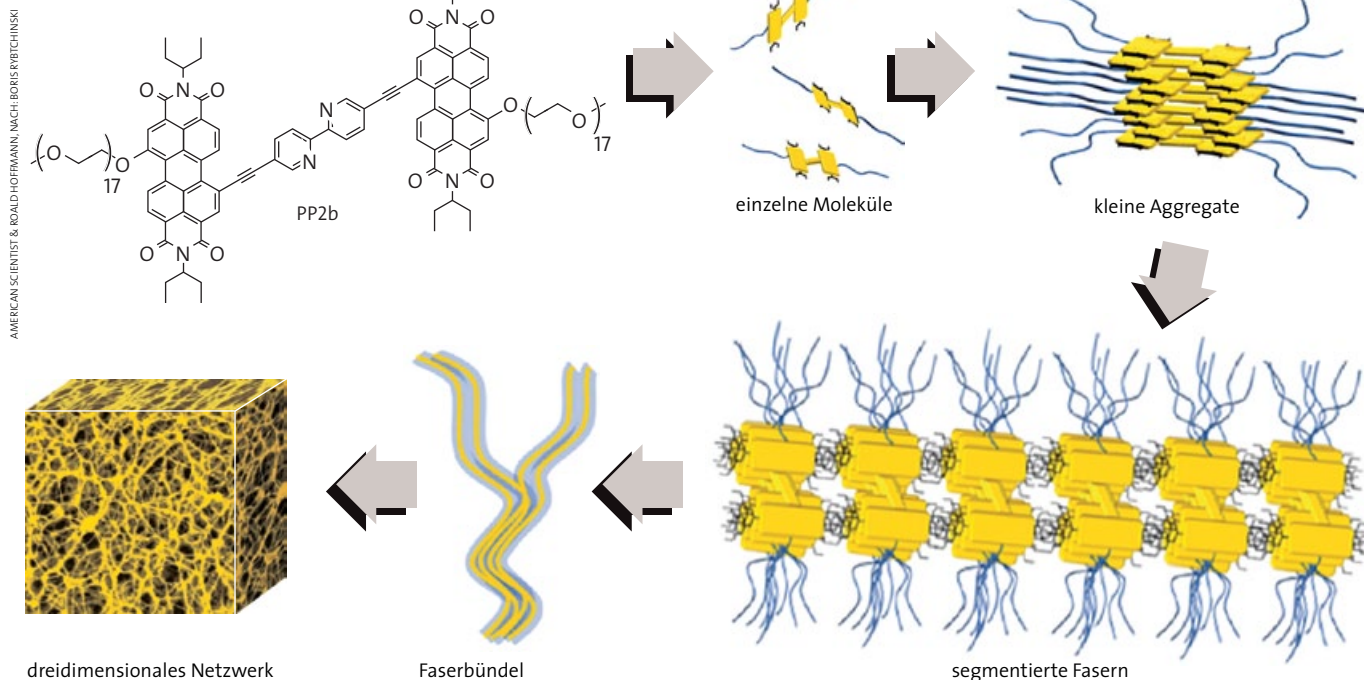


AMERICAN SCIENTIST, NACH: ROALD HOFFMANN



haarnadelförmig gebogene Kohlenwasserstoffkette

AMERICAN SCIENTIST, NACH: ROALD HOFFMANN



Die Substanz PP2b kann als Nanofilter fungieren, weil sie in Lösung bei Zugabe von Wasser ein Fasernetz bildet. Die Aggregation der Einzelmoleküle zu einem dreidimensionalen Geflecht kommt

dadurch zu Stande, dass hydrophobe (Wasser abweisende) Plättchen (gelb) und hydrophile (Wasser anziehende) Schwänze (blau) jeweils miteinander und mit Wasser wechselwirken.

die sich mit ihren Ethylenglycolschwänzen schließlich zu Fasern zusammenlagern. Bündel aus diesen Fasern ergeben dann ein robustes Netzwerk, das bei Temperaturen bis etwa 70 Grad Celsius beständig ist: das Nanofilter.

Von der molekularen zur makroskopischen Ebene

Nach einigem Schwanken bin ich schlussendlich doch bei meiner Vorliebe für große Energien geblieben. Ich betrachte einfach gern einzelne Moleküle bei ihren Kollisionen miteinander, wobei Bindungen gebrochen und geknüpft werden. Mein Hang zum Großen und Besonderen – und mein Widerwille gegen die Berechnung von Mittelwerten über Milliarden von molekularen Trajektorien – hat jedoch seinen Preis. Ich gelange auf diese Weise nicht von der Ångström-Skala der Moleküle in die makroskopische Welt, wo die praktischen Resultate der Chemie zu Hause sind. Ferromagnetismus und Viskosität oder Esther Williams' Wechselwirkung mit Wasser bleiben mir für immer verschlossen.

Und klar ist auch, dass die kleinen Wechselwirkungen nicht wirklich vernachlässigt werden können, nur weil ein beschränkter Theoretiker mit unzulänglichen Werkzeugen beschließt, dass er dort nichts ausrichten kann. Die Natur wird schließlich beherrscht von der Summe winziger Effekte. Wie könnte es auch anders sein in einer Welt, wo man für einen einzigen erfrischenden Schluck Wasser $6 \cdot 10^{23}$ Moleküle braucht?

Das Umlagern von vielen kleinen Dingen führt zum Wandel, nicht der komplette Umbau großer Einheiten. Das hat die Evolution schon vor Jahr-millionsen entdeckt, und es gilt sogar in der Politik, wo kleine Beiträge vieler Menschen bedeutende Veränderungen herbeiführen können – sei es bei der Abschaffung der Sklaverei, dem Fall der Berliner Mauer, der Gleichstellung von Frauen oder der Reduktion von Autoabgasen. Was der große Freiheitsdichter Friedrich Schiller einst dazu dachte, verrät übrigens die Überschrift meines Artikels, die ich aus seinem »Wilhelm Tell« entlehnt habe. ~

DER AUTOR



Roald Hoffmann ist emeritierter Frank H.T. Rhodes Professor of Humane Letters der Cornell University in Ithaca (New York) und Träger des Chemie-nobelpreises 1981.

QUELLEN

- De Greef, T. F. A. et al.:** Supramolecular Polymerization. In: Chemical Reviews 109, S. 5687–5754, 2009
- Goodman, J. M.:** What Is the Longest Unbranched Alkane with a Linear Global Minimum Conformation? In: Journal of Chemical Information and Computer Sciences 37, S. 876–878, 1997
- Krieg, E. et al.:** A Recyclable Supramolecular Membrane for Size-Selective Separation of Nanoparticles. In: Nature Nanotechnology 6, S. 141–146, 2011
- Lütschwager, N. O. B. et al.:** Das letzte Alkan mit gestreckter Grundzustandskonformation. In: Angewandte Chemie 125, S. 482–485, 2013

© American Scientist

Dieser Artikel im Internet:

www.spektrum.de/artikel/1318449



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

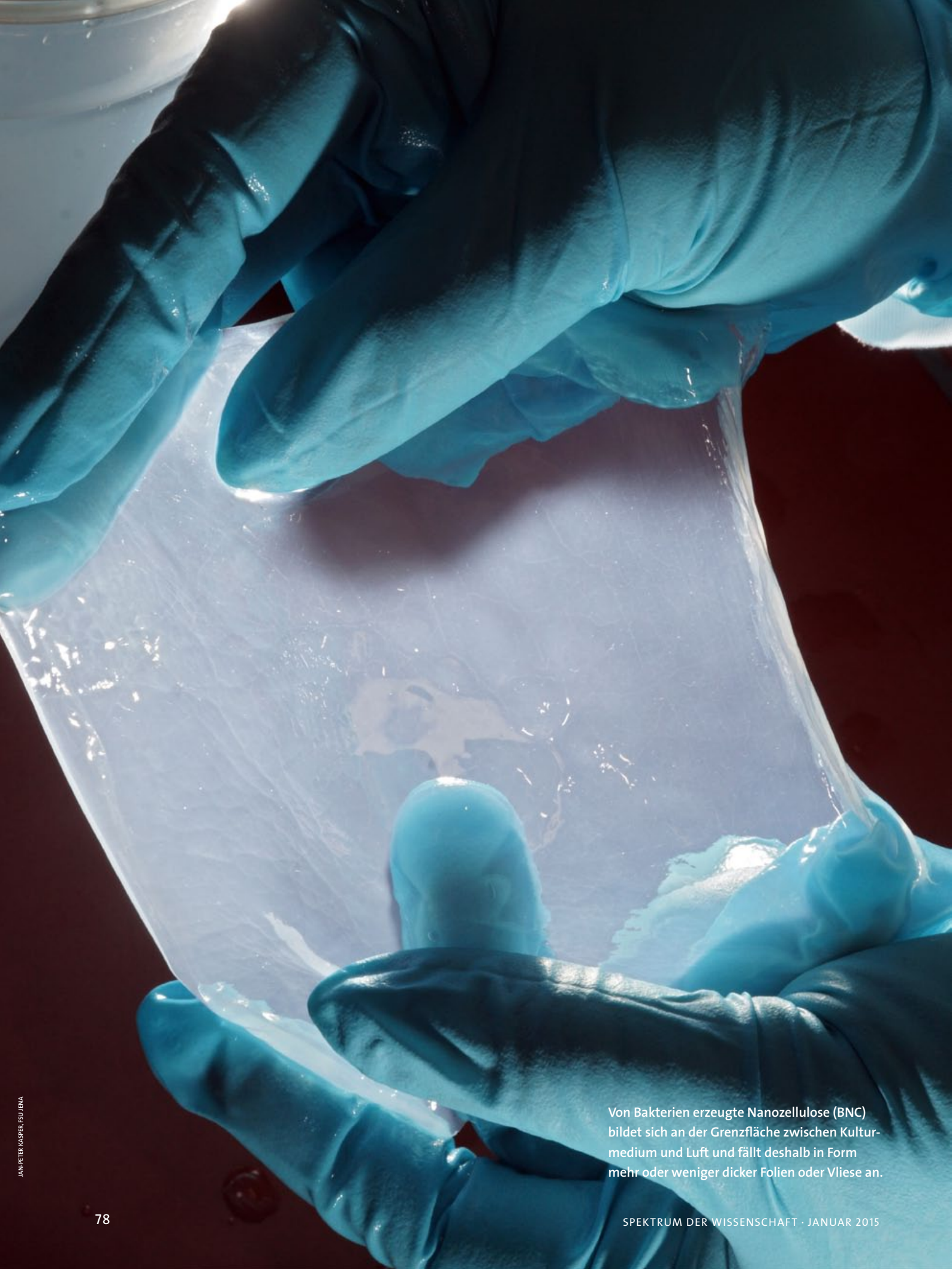
Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.de



Von Bakterien erzeugte Nanozellulose (BNC) bildet sich an der Grenzfläche zwischen Kulturmedium und Luft und fällt deshalb in Form mehr oder weniger dicker Folien oder Vliese an.

BIOTECHNOLOGIE

Nanozellulose – ein bakteriell erzeugtes Hochleistungspolymer

Herkömmliche Kunststoffe belasten Umwelt und Klima. Alternativen auf pflanzlicher Basis sind deshalb begehrt. Ein besonders aussichtsreiches Produkt ist biotechnologisch gewonnene Nanozellulose. Mit seiner einzigartigen Kombination von Eigenschaften eignet sich das natürliche Material für unterschiedlichste Einsatzzwecke – von Wundverbänden über Kosmetikartikel bis zu Chipkarten.

Von Dana Kralisch

Bei Polymeren aus nachwachsenden Rohstoffen denken die meisten Menschen an kompostierbare Mulchfolien, Einkaufstüten oder Wegwerfgeschirr. Doch inzwischen sind solche Biomaterialien in noch viel mehr Alltagsprodukten enthalten. Die Palette reicht von Jogurtbechern über Pflanztöpfe, Computertastaturen, Kugelschreiber und Kinderspielzeug bis hin zu Lenkrädern. Dabei kommen nicht nur natürliche Rohstoffe wie Stärke, Zellulose, Chitin oder Kasein zum Einsatz. Auch die industrielle oder »weiße« Biotechnologie spielt eine immer wichtigere Rolle.

Paradebeispiel ist die fermentative Produktion von Milchsäure, die größtenteils zum Polymer Polymilchsäure (kurz PLA) weiterverarbeitet wird. Wegen der hohen Ausbeute des Verfahrens von etwa 90 Prozent hat sich dieser Biokunststoff zum regelrechten Massenprodukt entwickelt. Er lässt sich inzwischen genauso preiswert herstellen wie Polymere auf Erdölbasis – etwa Polyethylen oder das von PET-Flaschen bekannte Polyethylenterephthalat – und auch auf dieselbe Weise verarbeiten, hat aber eine deutlich günstigere Ökobilanz. Deshalb dient PLA längst nicht mehr nur für Verpackungsmaterialien. Sogar Medizinprodukte wie vom Körper resorbierbare Implantate – zum Beispiel Platten, Schrauben und Nägel zur Stabilisierung von Knochenbrüchen – werden daraus gefertigt.

Andere biotechnologisch gewonnene Polymere befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Im Zentrum der Forschung stehen derzeit Methoden zur Verarbeitung von preiswerten natürlichen Rohstoffquellen wie etwa Abfällen der

Zuckerindustrie. Viele Untersuchungen zielen außerdem darauf ab, die Effizienz der verwendeten Bioreaktoren und ihre Zelldichte zu steigern.

Dass sich dieser Aufwand auszahlt, zeigt sich am Beispiel der biotechnologisch gewonnenen Nanozellulose (kurz BNC). Sie wird aus Rohstoffen wie Zucker, Melasse, Bagasse oder Kokoswasser mit Hilfe von Bakterien erzeugt. Chemisch ist sie identisch mit pflanzlicher Zellulose, hat aber nicht deren grobfaserige Struktur. Im Rasterelektronenmikroskop (siehe Bild S. 80) erkennt man vielmehr ein dreidimensionales

AUF EINEN BLICK

VIELSEITIGES BIOMATERIAL

- 1 Aus zuckerhaltigen Ausgangsprodukten erzeugen Essigsäurebakterien ein gleichmäßiges **Netz von Zellulosefasern** mit Durchmessern im Nanometerbereich.
- 2 Dieses **Biomaterial** verbindet die Vorzüge pflanzlicher Zellulose mit den besonderen Merkmalen **nanostrukturierter Materialien**. Er ist nicht nur extrem saugfähig, sondern auch äußerst reißfest.
- 3 Wegen seiner **Bioverträglichkeit** bietet sich das Material vor allem in der Medizin an – etwa für **Wundverbände** oder für **Implantate**. Es eignet sich aber ebenso für **Membranen** und **Leichtbauprodukte** sowie als **Diätmittel**.
- 4 Die Herstellung von Nanozellulose ist **kostengünstig**, weil sie keine aufwändigen mechanischen und chemischen Behandlungs-, Aufschluss- oder Reinigungsverfahren erfordert. Die Fermentation lässt sich außerdem so steuern, dass das Produkt gleich in der gewünschten Form anfällt.

Netzwerk aus extrem dünnen Fibrillen. Deren Durchmesser beträgt je nach dem eingesetzten Bakterienstamm nur 40 bis 120 Nanometer – rund ein Hundertstel der Dicke pflanzlicher Zellulosefasern.

Wegen der Bewegung und Teilung der Mikroorganismen besteht das gebildete Netzwerk aus einem regelmäßigen, stark verzweigten Tunnel- und Porensystem. Deshalb verbindet das einzigartige Biopolymer die bekannten Vorzüge der pflanzlichen Zellulose wie toxikologische Unbedenklichkeit mit den besonderen Merkmalen nanostrukturierter Materialien, etwa einer sehr hohen Materialstabilität. Seine Zugfestigkeit ist mit der von synthetischen Hochleistungspolymeren wie Kevlar vergleichbar. Das Fasernetzwerk hat zudem eine immense innere Oberfläche von 100 bis 200 Quadratmetern pro Gramm, was ihm eine hohe Saugfähigkeit verleiht: Es kann mehr als das Hundertfache seines Eigengewichts an Flüssigkeit aufnehmen. Feuchtes BNC-Vlies ist dank der feinen Faserstruktur so weich wie Babyhaut.

Eine solche Kombination günstiger Eigenschaften findet sich bei keinem anderen Polymer, ob nun aus nachwachsenden oder fossilen Rohstoffen gewonnen. Entsprechend breitgefächert ist das Anwendungspotenzial der Nanozellulose. Es reicht von Membranen und Filtersystemen über elektronische Chipkarten, Leichtbauprodukte und materialverstärkte Kunststoffe sowie Zusatzstoffe zur Papierveredelung, Nahrungsmittel und Kosmetikartikel bis hin zu Wundauflagen und Implantaten.

Ein weiterer Vorteil von BNC: Sie ist direkt so einsetzbar, wie sie bei der Fermentation anfällt. Alle pflanzlichen Zelluloserohstoffe – insbesondere Holz – erfordern vor ihrer Verwertung dagegen aufwändige mechanische und chemische Behandlungs-, Aufschluss- und Reinigungsverfahren. Außer-

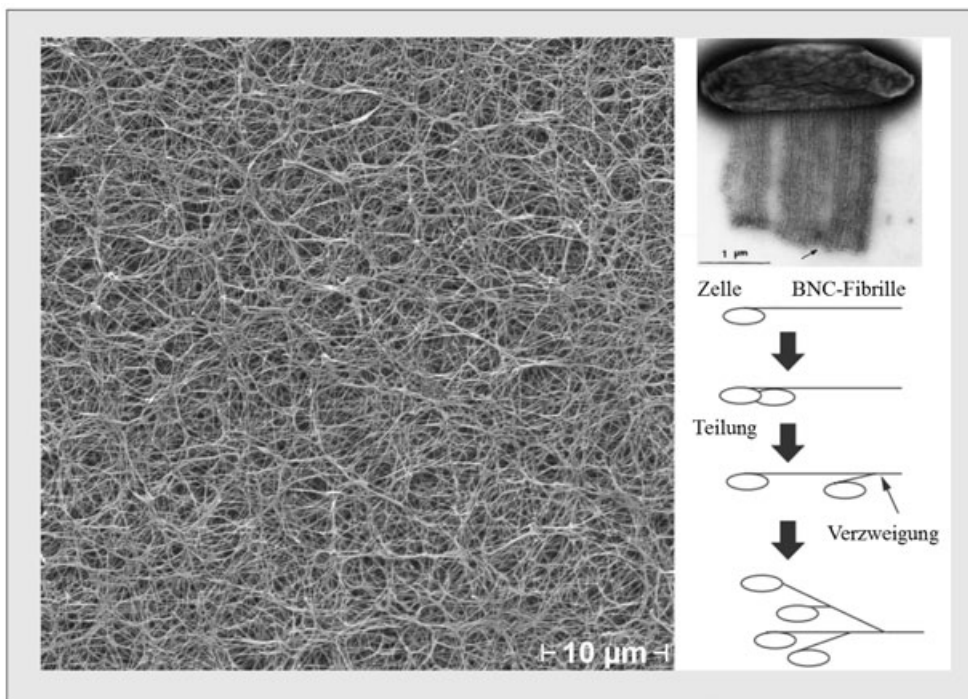
dem lässt sich die Biosynthese der BNC so steuern, dass das Material bei der Entstehung gleich eine gewünschte Form annimmt. Folglich ist es möglich, dünne Folien, dickere Vliese, Röhrchen, Faserbündel, Kügelchen oder andere Formkörper direkt herzustellen.

Biofilm auf verderbenden Früchten und Säften

Was als neues Wundermaterial erscheint, ist freilich schon alt. Der britische Biochemiker Adrian J. Brown (1852–1919) hat BNC 1886 bereits entdeckt, als er den weißen, gelartigen Biofilm untersuchte, den Essigsäurebakterien auf verderbenden Früchten und Blumen sowie nicht pasteurisierten oder sterilisierten Säften, Bier und Wein erzeugen. Um die Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelten Shlomo Hestrin (1914–1962) und Michael Schramm an der Hebräischen Universität in Jerusalem (Israel) dann ein spezielles Kulturmedium, das die Züchtung dieser Bakterien im Labor ermöglichte.

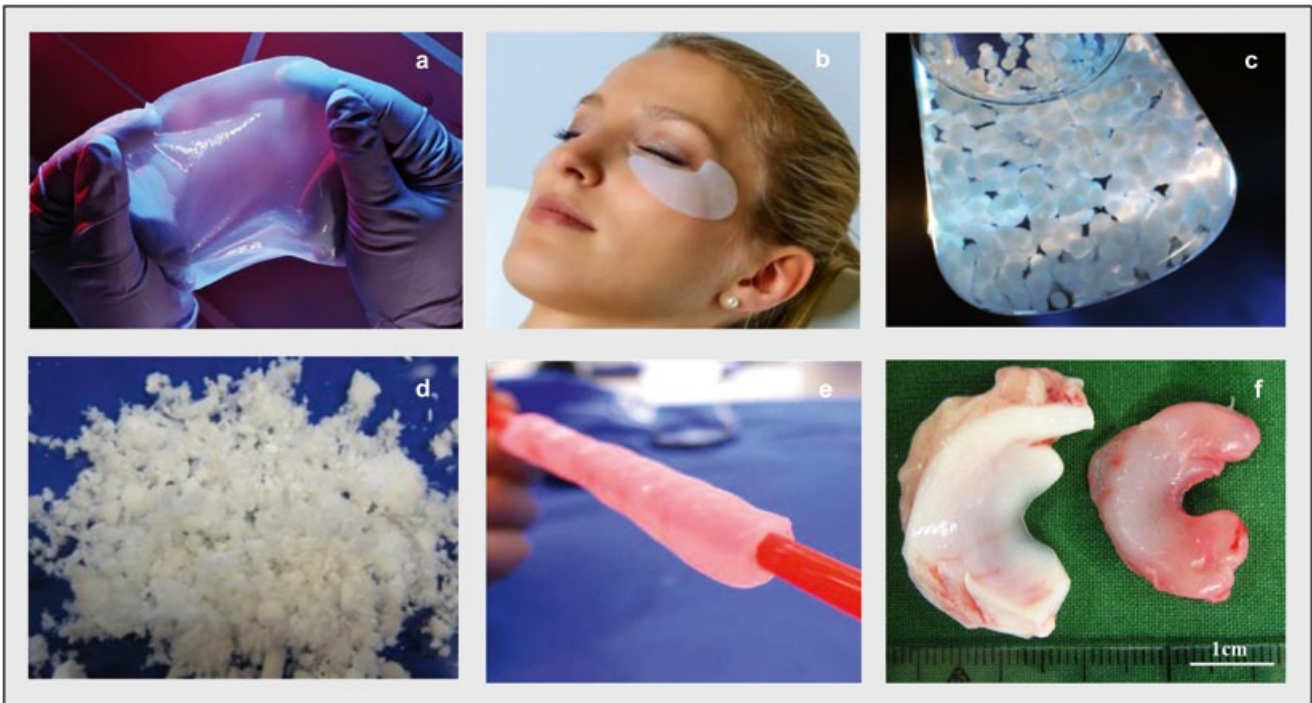
In den 1990er Jahren testeten verschiedene Unternehmen erstmals Fermenter für die großtechnische Herstellung von BNC. Üblicherweise bestehen diese aus einem tiefen Edelstahltank mit Rührwerk und Heizmantel mit Zu- und Abläufen sowie Luft- oder Sauerstoffzufuhr. Allerdings führt das Rühren im klassischen Fermenter wegen der entstehenden Scherkräfte bei einem Großteil der verwendeten Bakterienstämme des Typs *Komagataebacter xylinus* oder *hansenii* zu Mutationen, durch die sich die Ausbeute bei längerer Kultivierungsdauer deutlich verringert.

Nur wenige Stämme sind stabil genug für die Produktion in einem bewegten Medium. Sie wurden jedoch inzwischen isoliert und lassen sich in speziellen Reaktoren verwenden, in denen aufsteigende Blasen für die Durchmischung sowie



Auf dieser rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme von BNC (links) ist das verschlungene Netzwerk extrem dünner Fasern zu sehen, aus dem das Material besteht. Es kommt durch die stetigen Teilungen der die Fibrillen produzierenden Bakterien zu Stande (rechts).

HIRALUND/KOLLEGEN, 2002, FSU JENA



A. C. FSU/JENA, B. D. JE-NA/CELL GMBH; E. KLEMM UND KOLLEGEN, 2009; F. BODIN UND KOLLEGEN, 2007

BNC lässt sich direkt in verschiedenen Formen herstellen: nicht nur als flächige Folie (a), sondern auch in Form von Pads für kosmetische Anwendungen (b) sowie von Kügelchen (c), Fibrillen (d) oder Röhrcchen (e). Selbst kompliziertere Formkörper wie ein künstlicher Meniskus (f) sind realisierbar.

die Sauerstoffzufuhr sorgen. Ein koreanisches Forscherteam berichtete beispielsweise kürzlich, dass es ihm auf diese Weise gelungen ist, einen 50 Liter fassenden Pilotreaktor zu betreiben. Demnächst will es noch größere Gefäße erproben. Durch die Bewegung entsteht BNC in Form von Faseraggregaten oder kugelförmigen Partikeln.

Für die kommerzielle Produktion des Materials dienen heute jedoch überwiegend ruhende Kulturmedien. Dabei entsteht die Nanozellulose an der Grenzfläche zur Luft in Form der schon beschriebenen dünnen Folien oder dickeren Vliese. Diese Schichten müssen in regelmäßigen Abständen entnommen werden. Dadurch ist das Verfahren sehr personalintensiv. Außerdem verlangt es große Flächen. Beides macht es für den Einsatz in Industrieländern ungeeignet.

Im Jahr 2008 hat unser Team an der Universität Jena hier jedoch einen Durchbruch erzielt. Es entwickelte eine Methode, mit der sich die an der Oberseite des Kulturmediums gebildete flächige BNC stetig aus dem Bioreaktor entfernen lässt, ohne den Syntheseprozess zu stören. Während die Kultivierung unter stets gleich bleibenden Bedingungen weiterläuft, entsteht auf diese Weise ein Endlosband aus sehr homogener BNC mit konstanten Materialeigenschaften. Der kontinuierliche Betrieb ermöglicht einen höheren Grad an Automatisierung und verbessert die Produktivität des Bioreaktors erheblich. Inzwischen erzeugt das von mir mitbegründete Start-up-Unternehmen JeNaCell nach diesem Verfahren BNC für medizinische und technische Anwendungen, aber auch für hochwertige Wellnessprodukte (Bilder oben).

Ein anderes innovatives Unternehmen arbeitet daran, mit Hilfe einer Matrixtechnologie röhrenförmige BNC-Hohlkörper zu gewinnen, die als Gefäßimplantate dienen sollen. Generell sollte die Kultivierungsmethode auf die spätere Anwendung abgestimmt sein; denn sie beeinflusst neben der äußeren Form auch die Struktur des Fasernetzwerks sowie die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des resultierenden Biopolymers.

Luftiges Netzwerk oder feinporige Membran

BNC lässt sich sowohl in feuchtem als auch in getrocknetem Zustand einsetzen. Je nach Art des Wasserentzugs entsteht ein mikroporöses Aerogel oder eine nanoporöse Membran. Im Aerogel bewahrt das Netzwerk seine ursprüngliche Struktur, und die Hohlräume füllen sich mit Luft. Das Resultat ist ein Formkörper mit sehr großer Oberfläche und äußerst geringem Gewicht. Diese Eigenschaften sind insbesondere für den Leichtbau von Sportflugzeugen oder für Pkw-Innenverkleidungen gefragt. Bei weniger schonendem Trocknen kollabiert das Netzwerk. Dadurch entstehen mechanisch sehr stabile Membranen, die sich Tests zufolge zur Dialyse oder zur Trennung von Lösungsmittelgemischen wie Alkohol und Wasser eignen.

Durch Zusätze zum Nährmedium ist es zudem möglich, die Netzwerkstruktur und damit die Eigenschaften des Materials während der Kultivierung zu beeinflussen. So lässt sich beispielsweise die Reißfestigkeit oder das Wasserrückhaltevermögen weiter steigern. Andere Additive verändern die Po-

rengröße. Auf diese Weise kann man etwa die Durchlässigkeit der gewonnenen Membran für Flüssigkeiten oder Gase steuern.

Auch nach der Biosynthese bestehen noch Möglichkeiten zur Modifizierung. So kann man in das Netzwerk der BNC die Grundbausteine eines Kunststoffes eindringen lassen und sie anschließend polymerisieren. Dadurch entsteht im Innern ein zweites Netzwerk, über das sich Eigenschaften wie Härte, Biegebruchfestigkeit, Elastizität oder Wasseraufnahmevermögen zusätzlich kontrollieren lassen. Diese Variationsmöglichkeiten nutzt man unter anderem aus, um mechanisch anspruchsvolle und dennoch sehr flexible Implantatmaterialien aus BNC zu erzeugen.

Außer den schon erwähnten technischen Anwendungsmöglichkeiten als Membranen und Leichtbaukomponen-

ten eignet sich BNC für viele weitere Einsatzzwecke. So kann es als Papierzusatz, Trägermaterial für Katalysatoren, Membran in Lautsprechern, Filter und zur Verstärkung anderer Biopolymere oder Kunststoffe dienen.

Diätmittel und Wundauflage

In der asiatischen Lebensmittelindustrie spielt BNC schon seit vielen Jahren eine bedeutende Rolle. Vor allem auf den Philippinen werden in Handarbeit aus Kokoswasser in Bottichen gallertartige Stücke gewonnen. Diese sind mechanisch wenig stabil und damit kaubar. Zusammen mit dem hohen Wasseraufnahmevermögen und der Unverdaulichkeit bieten sie so ideale Voraussetzungen für die Verwendung als Diätmittel und Lebensmittelzusatz. Da das Material trotz der Herkunft aus Kokoswasser fast keinen Eigengeschmack hat, wird es meist aromatisiert und dann in gefärbter Form als Fruchtfleischersatz angeboten. Seine sättigende und quellende Wirkung schätzen Menschen, die schlank werden oder bleiben wollen, mittlerweile nicht nur in Asien.

Diese Eigenschaften als Hydropolymer eröffnen ein weiteres riesiges Einsatzgebiet, in dem BNC künftig sehr gefragt sein dürfte. Allein in Deutschland leiden derzeit rund 4,5 Millionen Menschen an chronischen Wunden, die schwer heilen und aufwändiger Behandlung bedürfen. Ihre Zahl dürfte in dem Maß zunehmen, wie die Bevölkerung weiter altert und lebensstilbedingte Krankheiten wie Diabetes und Fettleibigkeit zunehmen. Hinzu kommen jährlich etwa 4000 Patienten mit schweren Brandwunden. Als Mittel der Wahl zu deren Versorgung haben sich feuchte Wundauflagen erwiesen, die traditionelle Verbände wie Gaze oder Mull daher immer mehr verdrängen.

Nanostrukturierte BNC bietet hier viele Vorteile. Das wasserdampfdurchlässige, feuchtigkeitsspendende und sehr weiche Material beschleunigt den Heilungsprozess und verringert die Narbenbildung. Außerdem lässt es sich schmerzfrei wieder von der Wunde entfernen. Auf Grund seiner Herkunft ist es biokompatibel und frei von synthetischen Verunreinigungen.

Erste Produkte sind bereits auf dem Markt, weitere werden mit Sicherheit folgen. Die Forschung konzentriert sich derzeit auf die Weiterentwicklung der reinen BNC-Wundauflage zum Trägersystem mit kontrollierter Wirkstoffabgabe. Antiseptika, Schmerzmittel und auch Entzündungshemmer ließen sich schon erfolgreich einbringen. Der Verband setzt sie dann nach Bedarf frei. Dabei lässt sich der Abgabezeitraum auf mehrere Tage ausdehnen.

Obwohl feuchte Wundauflagen teurer sind als traditionelle Verbandstoffe, dürften sie die Gesamtkosten der Behandlung senken. Für Einsparungen sorgt nicht nur eine verkürzte Behandlungsdauer, sondern auch die Tatsache, dass der Verband seltener gewechselt werden muss und der Wechsel weniger Zeit beansprucht. Kliniken und Pflegeeinrichtungen profitieren so von kürzeren Belegzeiten und geringerem Personalbedarf. Durch mangelnde Wundversorgung entstehen

Der Herstellungsprozess

Zur Herstellung biotechnologisch erzeugter Nanozellulose (BNC) dienen gramnegative, aerobe Bakterienstämme vom Typ *Komagataeibacter* (früher als *Acetobacter* oder *Gluconacetobacter* bezeichnet). Sie sind nicht genetisch verändert, sondern wurden lediglich aus der Natur isoliert. Unter statischen Bedingungen bildet sich im Bioreaktor bei moderaten Temperaturen zwischen 25 und 30 Grad Celsius an der Grenzfläche zwischen Nährmedium und umgebender Luft ein formstabiles Hydropolymer: ein wässriges Gel mit einem Feststoffanteil von rund einem Prozent. Zur Kultivierung der Bakterien dient im Allgemeinen das Hestrin-Schramm-Medium, das neben Wasser und Glukose einen Hefeextrakt plus Pepton als Stickstoff- und Vitaminlieferanten sowie ein Puffersystem zum Einstellen eines bestimmten pH-Werts enthält. Eine Vielzahl anderer, auch rein pflanzlicher Medien, ist heute ebenfalls bekannt.

BNC entsteht zwischen der Zellwand und der Außenmembran der Bakterienzelle durch einen Zellulose synthetisierenden Enzymkomplex. Dieser verknüpft, ausgehend von Uridindiphosphat-Glukose (UDP-Glukose), jeweils das eine Ende der sich bildenden Zellulosekette mit einer weiteren freien UDP-Glukose unter Abspaltung des UDP. Die bis zu 10 000 Zuckereinheiten lange Kette verlässt die Zelle durch Poren an der Bakterienoberfläche als so genannte Elementar fibrille (siehe Bild S. 80). Gleichzeitig ausgeschiedene Elementar fibrillen lagern sich zu Mikro fibrillen zusammen. Deren Selbstorganisation führt im Zusammenspiel mit der Zellteilung und den dadurch bewirkten Verzweigungen im wässrigen Nährmedium zu dem charakteristischen dreidimensionalen Netzwerk aus nanofibrillären Fasern mit einem System aus wenige Mikrometer großen Poren. Mit diesem Netzwerk schützen sich die Bakterien vor Austrocknung, Feinden, Sauerstoff- und Nährstoffmangel sowie ultravioletter Strahlung.

heute pro Jahr Kosten in Höhe von vier bis fünf Milliarden Euro. Das macht deutlich, welch enormes Potenzial solche innovativen Biomaterialien bergen.

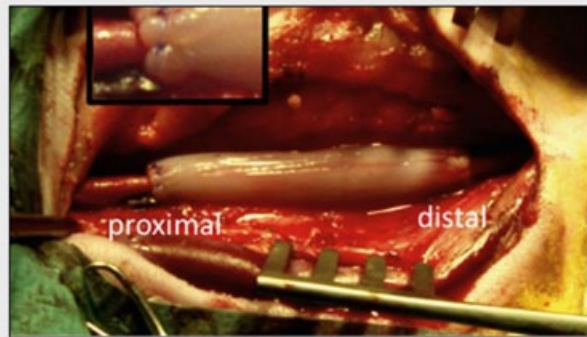
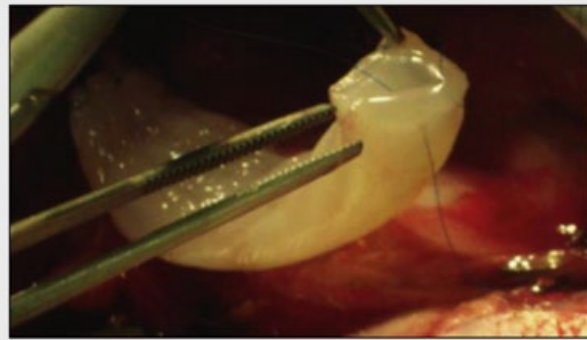
Aber auch im Körperinnern lässt sich BNC einsetzen. Hier bietet sie gleichfalls eine konkurrenzlose Kombination aus Biokompatibilität, Stabilität, Flexibilität und sehr hoher Aufnahmekapazität für Flüssigkeiten. Im Gegensatz zu vielen synthetischen Materialien ruft sie keine Fremdkörperreaktion hervor. Nanozellulose in Röhrenform wird deshalb derzeit im Tierversuch auf ihre Eignung als Gefäßersatz bei Herz-Bypassen getestet (Bild rechts). Synthetische Alternativen gibt es hier nicht. Allein in Deutschland erhalten mehr als 70 000 Patienten jedes Jahr einen Bypass. Sie alle wären dankbar für ein geeignetes Implantatmaterial, durch das sich das problematische Entnehmen körpereigener Gefäße aus dem Bein oder der Brust erübrigen würde.

Auch künstliche Menisken lassen sich aus BNC fertigen, wie Untersuchungen an der Technischen Hochschule Chalmers (Schweden) ergaben. Die dortige Forschergruppe brachte das Material bereits während der Biosynthese in die gewünschte Form. Wissenschaftler in Brasilien wiederum haben gezeigt, dass BNC genauso gute Dienste beim Erzeugen von Hartgewebe im Körper leisten kann. Mit Kompositmembranen aus Nanozellulose und dem Mineral Hydroxylapatit ließen sich Knochen innerhalb weniger Wochen regenerieren. Weltweit liefern sich Forscher inzwischen einen Wettlauf um weitere aussichtsreiche Implantatmaterialien auf BNC-Basis – beispielsweise für den Knorpelersatz oder zum Schließen von Defektstellen an Organen. Er dürfte in den kommenden Jahren reiche Früchte tragen.

Noch offene Fragen beim Einsatz als Implantatmaterial

Speziell beim Einsatz von BNC als Implantatmaterial bestehen allerdings noch offene Fragen. Eine der wichtigsten betrifft die Steuerung der Porengröße in dem nanostrukturierten Netzwerk. Während eine Wundaufgabe keine feste Verbindung mit der Haut eingehen soll, ist bei einem dauerhaft im Körper verbleibenden Implantat ein Einwachsen des umgebenden Gewebes erwünscht. Das erfordert relativ große Poren und Kanäle mit Durchmessern von 10 bis 100 Mikrometern. Im natürlich entstandenen Polymer messen die Hohlräume dagegen nicht mehr als 1 bis 6 Mikrometer im Querschnitt. Momentan versuchen Forscher deshalb, mit moderner Lasertechnologie größere Poren in der BNC zu erzeugen.

Nicht jedes Implantat ist indes für die Ewigkeit gedacht. In vielen Fällen soll es sich stattdessen im Körper auflösen, sobald die Heilung abgeschlossen ist. Der menschliche Organismus kann BNC nicht selbst zersetzen, weil ihm die dafür nötigen Enzyme fehlen. Mit chemischen Methoden wie der Periodat-Oxidation gelingt es zwar, Sollbruchstellen in das Zellulosenetzwerk einzubauen, so dass es leichter resorbiert wird. Das vermindert aber die mechanische Stabilität. Weiterführende Studien müssen hier zeigen, wie sich beide Anfor-



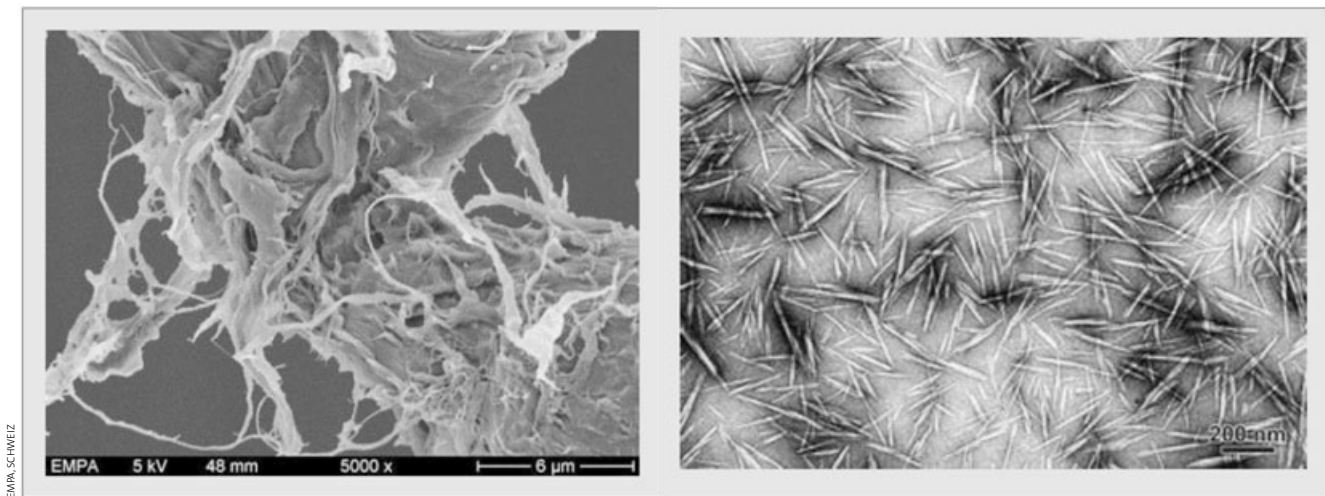
Künstliche Blutgefäße aus BNC (oben) wurden schon erfolgreich am Tier eingepflanzt (unten).

derungen erfüllen lassen. Außerdem ist zu klären, wie das Implantat trotz Einsatz von Chemikalien biokompatibel bleibt.

Zellulose mit einer sehr großen Oberfläche lässt sich auch auf anderen Wegen gewinnen. Zum Beispiel macht mikrofibrilläre Zellulose (kurz MFC) der BNC in einigen Anwendungsbereichen Konkurrenz. Sie wird mittels so genannter Refiner-Technologien aus pflanzlicher Zellulose produziert. Eine mehrfache mechanische Behandlung in Hochdruckhomogenisatoren bewirkt, dass die Zellulosefasern in Mikrofasern zerfallen (siehe Bild S. 84 oben links).

Anfangs war der Energiebedarf für diesen Zerkleinerungsprozess mit bis zu 70 000 Kilowattstunden pro Tonne MFC enorm hoch. Dank umfangreicher Entwicklungsarbeiten, die vor allem Forscher in den Vereinigten Staaten, Japan und Schweden geleistet haben, ist es inzwischen zwar gelungen, ihn durch eine chemische oder enzymatische Vorbehandlung der Zellulose deutlich zu senken. Dennoch hat das Material laut einer aktuellen Studie aus den USA wegen des weiterhin hohen Energiebedarfs und der Verwendung umweltbelastender Chemikalien eine ungünstige Ökobilanz. Das biotechnologische Verfahren zur BNC-Gewinnung läuft dagegen im wässrigen Kulturmedium bei Temperaturen unterhalb von 30 Grad Celsius ab.

MFC weist herstellungsbedingt zudem irreguläre Strukturen mit nicht definierten Oberflächen auf. Um flächige Materialien zu erhalten, muss man es daher als Komposit mit anderen Polymeren herstellen oder aufwändig weiterverarbeiten – etwa durch das so genannte Elektrosplennen, bei dem



Die beiden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen zwei Konkurrenten von BNC: die mikro-fibrilläre (links) und die nanokristalline Zellulose (rechts). Erstere wird durch chemische und energie-aufwändige mechanische Behandlung pflanzlicher Zellulose erzeugt und hat deshalb eine ungünstige Ökobilanz. Außerdem weist sie herstellungsbedingt irreguläre Strukturen mit nicht definierten Ober-flächen auf. Nanokristalline Zellulose besteht aus winzigen Stäbchen. Sie lässt sich durch Einwirkung starker Säuren aus pflanzlicher Zellulose gewinnen.

das in einer Flüssigkeit aufgeschlämmte MCF an einer Elek-trode zerstäubt und an der Gegenelektrode wieder abge-schieden wird.

Trotz dieser Nachteile findet MFC-Pulver breite Anwen-dung. So dient es als Verdicker in der Lebensmittelindustrie oder hilft, die Fließeigenschaften von Farbpasten zu verbes-ern. Auch zur Materialverstärkung und in der Papierverar-beitung wird es eingesetzt.

Von Natur aus sehr homogen ist dagegen ein anderer Kon-kurrent der BNC: die nanokristalline Zellulose oder NCC (Bild oben rechts). Man erhält sie aus Zellulose durch Einwirkung starker Säuren und mechanische Nachbehandlung mit Ul-traschall. Die Nanokristalle haben Stäbchenform. Mit Holz als Ausgangsmaterial sind sie üblicherweise 100 bis 300 Na-nometer lang und 3 bis 15 Nanometer dick. Sie werden der-zeit noch im Labormaßstab untersucht, zeigen jedoch viel versprechende Eigenschaften. Demnach könnten sich so genannte Polyelektrolyt-Multischichten daraus herstellen lassen, die unter anderem in Brennstoffzellen – möglichen Antrieben für Elektroautos – eingesetzt werden. Außerdem dürften sie sich für die Produktion von Nanokompositen eigen-en, aus denen dereinst optisch transparentes Papier für elektronische Displays gefertigt werden soll.

Auf einigen Anwendungsgebieten ist noch offen, wel-ches der drei Hochleistungspolymere – MFC, NCC oder BNC – das Rennen macht. Dabei dürfte es entscheidend da-rauf ankommen, bei welchem zuerst die Produktion im Kilotonnenmaßstab gelingt und wie hoch die Produktions-kosten sind. Die biotechnologisch gewonnene Nanozellu-lose hat jedoch auf jeden Fall einen großen Vorteil: Sie lässt sich direkt als flächiges Material gewinnen und weist ein

mechanisch sehr stabiles, gleichmäßiges Fasernetzwerk auf. Das macht sie nicht nur zum idealen Material für Im-plantate und Wundauflagen, sondern stellt auch sicher, dass die extrem dünnen Fasern mit Durchmessern im Na-nometerbereich großflächig verwoben sind. BNC besitzt so-mit die charakteristischen Merkmale moderner Nanomate-rialien und lässt sich zugleich völlig risikolos herstellen und verwenden. ∞

DIE AUTORIN



Dana Kralisch ist sowohl Wissenschaftlerin an der Friedrich-Schiller-Universität Jena als auch Produktionsleiterin der JeNaCell GmbH. Gemein-sam mit ihrer Kollegin Nadine Heßler erhielt sie den Thüringer Forschungspreis 2012 für die Ent-wicklung des ersten kontinuierlichen Verfahrens zur biotechnologischen Gewinnung von fläch-i-ger Nanozellulose.

QUELLEN

- Hirai, A. et al.:** TEM Study of Band-Like Cellulose Assemblies Produced by *Acetobacter Xylinum* at 4 °C. In: *Cellulose* 9, S. 105–113, 2002
- Klemm, D. et al.:** Nanozellulose Materials – Different Cellulose, Different Functionality. In: *Macromolecular Symposium* 280, S. 60–71, 2009
- Kralisch, D. et al.:** White Biotechnology for Cellulose Manu-facturing – the HoLiR Concept. In: *Biotechnology and Bioengineering* 105, S. 740–747, 2010
- Scherner, M. et al.:** In Vivo Application of Tissue-Engineered Blood Vessels of Bacterial Cellulose as Small Arterial Substitutes: Proof of Concept? In: *Journal of Surgical Research* 189, S. 340–347, 2014

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1319590

1915

Go West! Go Sauerland!

»Heute gilt das Sauerland als das platinreichste Gebiet der Erde, so daß Optimisten es schon ein deutsches Kali-

formien genannt haben. Bisher war man der Ansicht, daß es (das Platin) wegen seiner feinen Verteilung im Urgestein nie abbauwürdig befunden werden dürfte. Erst dem Bergingenieur Karl Schreiber ist es gelungen, ein chemisches Extraktionsverfahren herauszubilden. Nach dem Schreiberschen Verfahren können aus der Tonne

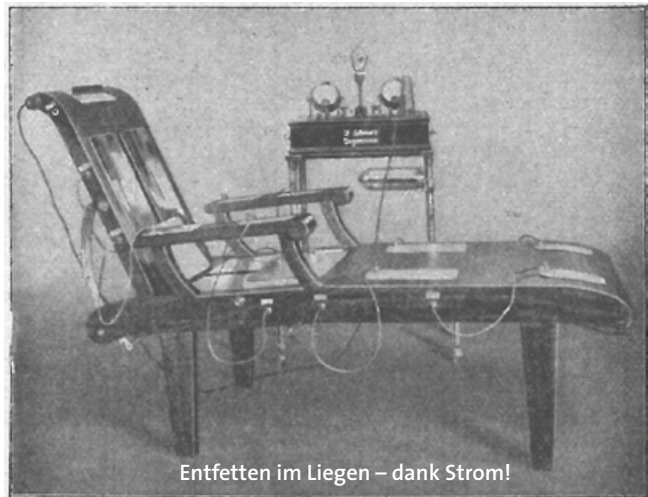
Muttergestein 20–30 g Platin gewonnen werden, außerdem Gold und Silber als Nebenprodukte. Im Ural finden sich nur etwa 6 g in der Tonne Gestein. Das Muttergestein wird gemahlen, und daraus werden die Edelmetalle und zwar restlos extrahiert, während die Überstände zu Chamotte verarbeitet werden. Tiefbauschächte

sind nicht erforderlich. Es haben sich bereits vier Gesellschaften mit einem Aktienkapital von 25 Millionen Mark gebildet.« Die Welt der Technik, Januar 1915, S. 30–31

(Das im Sauerland ausbrechende Platinfieber erlosch rasch wieder, da sich die Analysen als falsch herausstellten und die Gehalte im Gestein weit geringer waren. D. Red.)

Abnehmen ohne Diät

»Leute, die sich eines Übermaßes an Wohlbeibtheit erfreuen, geben sich gewöhnlich die größte Mühe, zu gefälligeren Proportionen zurückzukehren. Dieses Ziel läßt sich durch mehrere Mittel erreichen, die indessen alle den Nachteil haben, daß sie an die Willenskraft große Anforderungen stellen. Mit diesen Hilfsmitteln geht die elektrische Entfettungskur so vor sich, daß der Patient sich ausgekleidet auf den Liegestuhl niederläßt, so daß die elektrischen Ströme durch die in den Stuhl eingelassenen Elektroden beim Rücken und Gesäß ein- und an den auf Armen, Schenkeln, Leib und Brust aufgelegten Elektroden wieder austreten. Die durch den Körper fließenden Kondensatorströme verursachen nun energische Kontraktionen fast der gesamten Körpermuskulatur. Das Ergebnis dieser Zwangsarbeit bildet eine tägliche Gewichtsabnahme von 500–1000 g. Dabei fühlen sich die Patienten durchaus nicht müde, sondern erfrischt und zur



Entfetten im Liegen – dank Strom!

Vornahme weiterer Arbeit befähigt.« Technische Monatshefte, Januar 1915, S. 9–10

Verstrahlung durch Kohle?

»Wie die Fragestunde des Bundestages ergab, enthält Pechkohle auch gewisse Mengen Urans, so daß beim Verfeuern dieser Kohle radioaktive Abgase austreten kön-

nen. Diese Menge an Radium und anderen begleitenden Radionukliden sind im Vergleich zu den anderen Quellen natürlicher Radioaktivität gering. Die Menge an Krypton 85, die von einem Atomreaktor emittiert wird,

ist sehr klein und erreicht längst nicht das auf Grund der maximal zulässigen Konzentration errechnete Radium-Äquivalent. Somit ist festzustellen, daß ein Atomkraftwerk u. U. weniger zur radioaktiven Verseuchung der

1965

Atmosphäre beiträgt als ein konventionelles Kraftwerk mit fossilen Brennstoffen.«

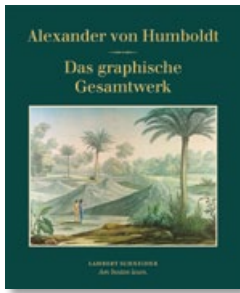
Die Umschau, Januar 1965, S. 61

Sorge um Wale

»Als Vorsitzender der Internationalen Vereinigung zum Schutz aussterbender Tierrassen wandte sich Prinz Bernhard der Niederlande an die Internationale Walfangkonferenz mit der Forderung nach einer Einschränkung des Abschusses von Blau- und Pottwalen und einer besseren Kontrolle der Einhaltung von Walfangvorschriften. Der wissenschaftliche Ausschuß der Walfangkonvention schlug vor, die Jagd auf Blauwale von 10 000 auf 2500 Tiere pro Fangjahr zu beschränken, da sonst ein Aussterben unvermeidlich sei.« Die Umschau, Januar 1965, S. 29

Künstliche Erbsubstanz

»Dem indischen Biochemiker H. Gobind Khorana gelang es, durch chemische Synthese die vier Bausteine der DNS zu bis annähernd 20 Einheiten langen Ketten zu kombinieren. Da sich die Produkte als biologisch aktiv erwiesen, also ›Erbinformation‹ übertragen können, hat ihr Schöpfer die Möglichkeit eröffnet, eines Tages auch Gene auf synthetischem Wege zu gewinnen, die ganz bestimmte erwünschte Eigenschaften vererben.« Kosmos, Januar 1965, S. 2–4



Alexander von Humboldt
Das graphische Gesamtwerk
 Hg. von Oliver Lubrich
 Lambert Schneider, Darmstadt 2014
 800 S., € 129,-

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Augenweide

Erstmals liegen alle Zeichnungen des Naturforschers Alexander von Humboldt in einem Band vor.

Kaum eine europäische Forschungs-Expedition des 18. und 19. Jahrhunderts verzichtete auf einen professionellen Zeichner. Es galt, fremde Länder, Menschen und Kulturen, Pflanzen und Tiere wirklichkeitsgetreu und zugleich kunstvoll zu dokumentieren. Das war auch bei den Expeditionen Alexander von Humboldts so. Der Forscher (1769–1859) war nicht nur als Naturwissenschaftler und Anthropologe, sondern auch als talentierter und fähiger Reisezeichner unterwegs. Dank einer verlegerischen und herausgeberischen Meisterleistung ist Humboldts grafisches Gesamtwerk nun erstmals in einem Band versammelt.

In den mehr als sieben Jahrzehnten seines Schaffens hat Humboldt eine beispiellose wissenschaftliche Leistung erbracht. Er genoss schon zu Lebzeiten als »Wissenschaftsfürst« höchstes Ansehen, galt als »neuer Aristoteles« und wegen seines Hauptwerks – dem Bericht über die große Amerikareise von 1799 bis 1804 – als »zweiter Kolumbus« beziehungsweise als »wissenschaftlicher Wiederentdecker Amerikas«.

Mehrjährige Forschungsreisen führten ihn nach Lateinamerika, in die USA sowie nach Zentralasien. Seine Beschreibungen haben wesentlich dazu beigetragen, die Geografie zu einer empirischen Wissenschaft zu machen – auch weil sie so exzellent bebildert sind. Wie Herausgeber Oliver Lubrich, Professor für Neuere deutsche Literaturwis-

senschaft und Komparatistik an der Universität Bern und (Mit-)Herausgeber weiterer humboldtscher Werke, in der Einführung verdeutlicht, waren Humboldts Zeichnungen einerseits typisch für die damalige Zeit, andererseits einzigartig. Denn dem Universal talent gelangen darstellerische Innovationen, die bis heute nachwirken. Zu ihnen gehören diagrammatische Gebirgsprofile, die mit der Schichtung von Vegetationszonen kombiniert wurden. Zudem war Humboldt der Erste, der geografische Zonen gleicher Durchschnittstemperatur mit isothermen Linien kennzeichnete – so wie auf heutigen Wetterkarten allgemein üblich.



Als Botaniker zeichnete Humboldt Pflanzen wie diesen Drachenaum (oben). Sein Interesse an Ethnologie und Kulturwissenschaft zeigte sich etwa an dieser Darstellung eines Reliefs (rechts).

Die Grafiken des Naturforschers seien ebenso vielschichtig gewesen wie seine Interessen, schreibt Lubrich. »Als Ethnologe und Kulturwissenschaftler skizzierte er Menschen, Gebäude und Alltagsgegenstände. Als Botaniker, Zoologe und Anatom zeichnete er Pflanzen, Tiere und Körperdetails. Als Geologe, Geograph und Kartograph erfasste er Gebirge, Gewässer und Kontinente.« Es gibt kaum einen Bereich, den Humboldt bei seinen wissenschaftlichen Feldstudien unberücksichtigt ließ. Er lieferte Beiträge zur Physik, Chemie, Geologie, Mineralogie, Vulkanologie, Botanik, Vegetationsgeografie, Zoologie, Klimatologie, Ozeanografie und Astronomie. Auch befasste sich Humboldt mit Fragen der Wirtschaftsgeografie, der Ethnologie und der Demografie.

Die vorliegende Edition präsentiert nicht nur die Abbildungen aus Humboldts 29-bändigem Werk über seine Amerikareise. Sie gibt zudem alle in den übrigen Werken verstreuten Motive wieder, durchweg in exzellenter Qualität. Lubrichs Band umfasst somit in der Tat sämtliche 1512 Zeichnungen, die Humboldt in Büchern, Aufsätzen, Artikeln und Essays veröffentlicht hat.

Präsentiert werden sie auf insgesamt 700 Seiten in vier Kapiteln: »Frühwerk«, »Voyage«, »Spätwerk« und »Verstreute Schriften«. Lubrich stellt dem eine kenntnisreiche Einführung in Hum-



boldts Leben und Werk voran. Zeittafel, Werksübersicht, Abbildungs- und Quellenverzeichnis bilden den ausführlichen Anhang. Der Herausgeber hofft, dass dieser »Katalog« künftigen Forschungen als Grundlage dienen kann.

Die Liste möglicher Wissenschaftsbereiche, die dafür in Frage kommen, ist – Humboldts Vielseitigkeit entsprechend – lang. Laut Lubrich eignet sich das grafische Gesamtwerk insbesondere

re »zum Studium von Humboldts Bildproduktion, zum Vergleich mit den Arbeiten zeitgenössischer Reisender, Autoren und Naturforscher (wie Georg Forster, Johann Wolfgang von Goethe oder Charles Darwin), zur visuellen Anthropologie, zur naturgeschichtlichen Taxonomie oder zur Veranschaulichung von Daten, zur Wissenschaftsgeschichte, zur Kunstgeschichte oder zur Ikonografie Amerikas«.

Auch wer nicht forschen, sondern nur genießen will, kommt bei der Lektüre dieses wunderbaren Buchs auf seine Kosten. Zu Recht betont Lubrich, Humboldt sei unter anderem ein »Pionier der ästhetischen Inszenierung wissenschaftlicher Erkenntnisse« gewesen.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als Journalist und Publizist in Celle.



Walter Kraul
Platonische Körper und ihre Verwandlungen
Kreativ gestalten mit Walter Kraul
Freies Geistesleben, Stuttgart 2014
175 S., € 19,90

GEOMETRIE

Symmetrische Polyeder

Ein Waldorflehrer findet neue Blüten auf einer längst abgegrast geglaubten Wiese.

Die Griechen der Antike schätzten sie über alles, doch heutige professionelle Mathematiker haben nur noch ein Achselzucken für sie übrig: jene fünf von ebenen Flächen begrenzten Körper mit maximaler Regelmäßigkeit, die man als die platonischen kennt. Schon recht – mit den modernen Methoden ist auf dem Gebiet kaum noch etwas zu holen; alle begrifflichen Werkzeuge finden sich im Wesentlichen schon bei den alten Griechen, namentlich bei Euklid.

Die Schulmathematik lässt die platonischen Körper und ihre Abkömmlinge ebenfalls links liegen – und hat dafür weit weniger überzeugende Ausreden parat. Das Gebiet ist sehr ergiebig, vor allem wenn man die asketische Forderung nach totaler Einheitlichkeit etwas lockert, aber die nach Symmetrie beibehält: Wenn der Körper unter einer Vielzahl von Drehungen und Spiegelungen wieder in sich selbst übergeht, müssen

seine Flächen nicht alle gleich sein. Die Ergebnisse sind mit Schulmitteln erreichbar und vor allem hübsch anzusehen. Vielleicht hat die analytische Geometrie mit ihren Koordinaten die altherwürdigen Körper an den Rand gedrängt.

Allein in der Waldorfpädagogik genießen sie hohes Ansehen; dort nimmt man sich auch die Zeit, sie als Modelle zum Anfassen herzustellen. Nicht umsonst stammt aus dieser Ecke das inzwischen vergriffene Standardwerk »Platonische und archimedische Körper, ihre Sternformen und polaren Gebilde« von Paul Adam und Arnold Wyss (1984). Für eine theoretisch anspruchsvollere Behandlung gibt es im Wesentlichen nur die Bücher von Rhenus Ziegler vom Goetheanum in Dornach.

Auch der Autor des vorliegenden Buchs Walter Kraul, Jahrgang 1926, ist altgedienter Waldorflehrer. Nebenher

betreibt er eine Firma, die unter anderem Bausätze für Kantenmodelle platonischer Körper aus Messing feilbietet. Gegenüber dem Klassiker von Adam und Wyss erscheint sein neuestes Werk auf den ersten Blick hausbackener und unsystematischer. Auch die abgebildeten Kartonmodelle wirken zuweilen merkwürdig unbeholfen, wie von Kinderhand gefertigt. Auf den zweiten Blick finden sich allerlei Ideen, die Adam und Wyss nicht oder nur am Rand erwähnten.

Die Forderung nach Einheitlichkeit lockern, aber die Symmetrie beibehalten: Dieses Rezept kann man auf sehr viele verschiedene Weisen umsetzen. Durch Wegnehmen, indem man einem platonischen Körper alle Ecken abschneidet, mehr oder weniger tief, aber vor allem von jeder Ecke gleich viel (Kraul nennt das »Stutzen«). Durch Hinzufügen, indem man auf jede Seitenfläche eine Pyramide aufsetzt (»Zelten«). Oder durch Übergang zum »polaren Körper«, indem man auf regelhafte Weise Ecken durch Flächen ersetzt und umgekehrt. Gewisse Raumdiagonalen eines platonischen Körpers, das heißt durch den Körper verlaufende Verbindungslinien von Ecke zu Ecke, lassen sich häufig zu Kanten eines anderen platonischen Körpers zusammenfassen. Das gelingt mehrfach in ein und demselben Körper, so dass zum Beispiel in einem Dodekaeder fünf Tetraeder oder fünf Würfel zu finden sind, die sich gegenseitig durchdringen und damit einen prachtvollen Anblick bieten (Titelbild des Buchs). Andere Diagonalen fügen sich zu jenen Sternkörpern, die in der Literatur unter

den Namen ihrer Entdecker Johannes Kepler und Louis Poinot bekannt sind.

Über dieses »Standardprogramm« hinaus bietet Kraul etliche neue und überraschende Ideen. Platonische Körper kann man »ineinander schachteln«, das heißt aufklappbar aus Karton bauen und ihre Größen so wählen, dass sie genau und möglichst symmetrisch ineinanderpassen. Kraul zeigt uns eine von vielen Möglichkeiten, dies zu tun. Allem Anschein nach gibt es keine, die den anderen klar überlegen wäre.

Der Autor demonstriert auch, wie man geometrische Körper zerschneiden und anders wieder zusammensetzen kann. Oder man baut viele gleiche Exemplare eines platonischen Körpers und konstruiert daraus neue, fantasievolle Bauwerke. Hätten Sie gewusst, dass man 30 reguläre Ikosaeder Kante an Kante zu einem geschlossenen kugelförmigen Gebilde zusammenfügen kann? Kraul entdeckte dies, als er über das »gekerbte Dodekaeder« nachdachte, einen Körper, der in der Li-

teratur als uniformes Polyeder aus zwölf Fünfsternen und 20 Dreiecken bekannt ist.

Das Buch ist opulent bebildert, schreckt den Leser nicht durch Formeln oder exzessiven Gebrauch der Fachsprache und bietet dem Amateur wie dem Lehrer viele Anregungen zum Bau geometrischer Körper.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Ben Moore

Da draußen

Leben auf unserem Planeten und anderswo

Kein & Aber, Zürich 2014

348 S., € 22,90

ASTROBIOLOGIE

Rätselraten um E. T.

Sind wir allein im All? Auch dieses Buch gibt darauf keine Antwort – liefert aber einschlägige Fakten und Argumente.

Wie viele Planeten gibt es? Keine leicht zu beantwortende Frage. Die meisten heute Erwachsenen lernten in der Schule: neun. Seit 2006 sind es aber nur noch acht, denn Pluto gilt nunmehr als Zwergplanet. Doch im gleichen Zeitraum ist die Zahl der bekannten Exoplaneten – jener also, die um andere Sterne als die Sonne kreisen – rasant auf derzeit rund 1500 gestiegen. Weitere 3300 Planetenkandidaten harren ihrer Bestätigung durch die Astronomen. Wie viele bewohnbare Welten mag es da draußen geben? Das weiß niemand. Zumindest aber haben wir gelernt, dass Planeten in der Milchstraße sehr häufig sind. Ihre Zahl geht vermutlich in die Milliarden. Es erscheint also denkbar, dass wir Erdenbewohner nicht die einzigen Lebewesen im All sind.

Das ist der gedankliche Ausgangspunkt von Ben Moores Buch. Der Autor ist Astrophysiker an der Universität Zürich und Experte auf dem Gebiet der Astrobiologie. Diese Wissenschaftsrichtung befasst sich mit dem Ursprung, der Evolution und der mutmaßlichen Verbreitung von Lebewesen im Universum. Wie und wo entstand das irdische Leben? Unter welchen Bedingungen geht unbelebte Materie in belebte über? Und wie könnten extraterrestrische Wesen aussehen? Spannende Fragen, die verschiedenste Bereiche wie Astronomie, Biologie, Chemie, Geologie, Medizin und Philosophie berühren.

Moore erläutert zunächst, wie Astronomen heute Exoplaneten entdecken. In geraffter Form stellt er verschiedene Techniken vor, die darauf abzielen,

schwach leuchtende Sternbegleiter neben ihren viel helleren Zentralgestirnen nachzuweisen – entweder im direkten Licht als Schatten oder durch ihre Schwerkraftwirkung. Leider verzichtet der Autor hier komplett auf Infografiken und Illustrationen, was es den Lesern unnötig erschwert, ihm zu folgen.

Sodann versucht sich Moore an einer Definition von »Leben«. Ein schwieriges Unterfangen, denn diesbezüglich herrscht unter Biologen keine Einigkeit. Für viele Eigenschaften, die solche Definitionen typischerweise auflisten, kann man bereits auf der Erde Gegenbeispiele finden. Viren etwa sind ein komplizierter Grenzfall: Da sie keinen eigenen Stoffwechsel besitzen und sich nicht selbst replizieren können, sind sie recht eindeutig keine Lebewesen. Andererseits fällt es aber schwer, sie als tote Materie anzusehen. Erschwerend kommt hinzu, dass fremdes Leben auf komplett anderer Chemie basieren könnte als irdisches.

In den folgenden Kapiteln umreißt der Autor, wie sich das Leben auf der Erde entwickelt hat. Detailliert erörtert er, warum er die These favorisiert, dass die ersten komplexen Moleküle außerhalb der Erde entstanden und bei Kometeneinschlägen auf unseren Planeten gelangten. Wenn diese Ansicht richtig ist, müssten in der Frühzeit des Sonnensystems sämtliche Planeten mit den »Molekülen des Lebens« geimpft worden sein. Existieren also womöglich extraterrestrische Organismen in unse-

rer unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft?

Moore diskutiert sämtliche Planeten und Monde unseres Sonnensystems, auf denen Lebewesen prinzipiell existieren könnten. Den ernüchternden Befund dieser Betrachtungen kennen wir: Es gibt bei keinem von ihnen auch nur einen schwachen Hinweis auf außerirdische Organismen. Die besten Kandidaten sind der Mars, der früher einmal flüssiges Wasser besaß; der Saturnmond Titan, der über Kohlenwasserstoff-Ozeane sowie eine Atmosphäre verfügt; und der Jupitermond Europa, der unter einer dicken Eisschicht ein tiefes Meer flüssigen Wassers birgt. Moore führt wissenschaftliche Fakten dazu auf und erläutert, wie sich unsere Vorstellungen über extraterrestrisches Leben innerhalb unseres Sonnensystems im Lauf der Geschichte geändert haben.

Der Autor widmet sich auch möglichem Leben auf Exoplaneten und spielt durch, wie wir mit fremden Wesen Kon-

takt aufnehmen könnten. Zudem unternimmt er Ausflüge in die Sciencefiction, analysiert berühmte Klassiker der Literatur und diskutiert, wo die Autoren richtig lagen – und wo nicht. Dieses Kapitel liest sich besonders nett, zumal der Autor zugibt, dass er selbst begeistert fiktionale Literatur liest. Besonders erstaunlich ist sie, wenn sie Erfindungen vorwegnimmt – etwa die Mobiltelefon-technologie.

Eine der berühmtesten Erfindungen der Sciencefiction jedoch, das Beamen, wird ein Wunschtraum bleiben. Zwar kann man heute Quantenzustände instantan über so genannte Quantenverschränkungen übertragen, es scheint jedoch weiterhin unmöglich, komplexere Objekte überlichtschnell zu transportieren. Bemannte Reisen von Stern zu Stern sind damit wohl de facto ausgeschlossen. Das hindert Moore aber nicht daran, in den letzten Kapiteln zu spekulieren, ob die Erde bereits von Außerirdischen besucht wurde, oder wie

sich Zivilisationen in der Milchstraße ausbreiten könnten. Solche Gedanken-spiele sind äußerst reizvoll. Hätten die Wesen solch einer Zivilisation eine Moral? Hätten sie Gefühle? Wie würde sich der Kontakt mit ihnen gestalten?

»Da draußen« ist eine gelungene Reise durch die Astrobiologie, garniert mit Exkursen in die Sciencefiction. Die Exoplanetenforschung hat in den zurückliegenden Jahren riesige Fortschritte gemacht, was auch Spekulationen über außerirdisches Leben beflügelte. Wirklich neu wirkt Moores Buch jedoch nicht. Viele Punkte darin haben ganz ähnlich bereits Hoimar von Ditfurth in »Im Anfang war der Wasserstoff« (1972) oder Carl Sagan in »Unser Kosmos« (1982) behandelt. Und an diese beiden Klassiker kommt Moores Werk nicht heran.

Stefan Gillessen

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPI für extraterrestrische Physik in Garching.

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

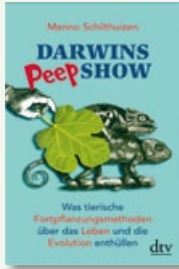
So einfach erreichen Sie uns:

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

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





Menno Schilthuizen

Darwins Peepshow – Was tierische Fortpflanzungsmethoden über das Leben und die Evolution enthüllen

dtv, München 2014. 344 S., € 19,99

Vom vibrierenden Schnakenpenis bis zu nekrophilen Enten: Die tierische Fortpflanzung ist reich an Kuriositäten. Anders als der Titel vermuten lässt, stellt Menno Schilthuizen jedoch nicht einfach pikante Details aus dem tierischen Sexleben vor, sondern achtet stets auf wissenschaftlichen Gehalt. Leser, die bloß nach lustigen Fakten suchen, werden schon im ersten Kapitel abgeschreckt von ausführlichen Begriffsdefinitionen und Hypothesen zur Entstehung der sexuellen Reproduktion. Wer sich dagegen wirklich für »kryptische Weibchenwahl« und »sexuell antagonistische Koevolution« interessiert, wird die Lektüre als spannend und durchaus unterhaltsam empfinden. Schilthuizen schildert die Arbeit von Genitalienforschern und stellt ihre erstaunlichsten Ergebnisse vor. Am Ende ist man fasziniert von den Blüten der Evolution – und hat bei aller Wissenschaft auch einiges gelernt, was man in lockerer Atmosphäre zum Besten geben kann.

ELENA BERNARD



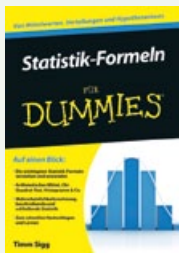
Florian Werner

Helium und Katzensgold. 92 elementare Geschichten

Nagel & Kimche, München 2014. 208 S., € 18,90

Was kommt heraus, wenn ein Literaturwissenschaftler über die Elemente des Periodensystems schreibt? 92 skurrile, kurzweilige Geschichten von Wasserstoff bis Uran. So erzählt Florian Werner von einer traurigen Katze, die unter der Fröhlichkeit tanzender Mäuse leidet und deren depressive Verstimmung mit Lithiumsalz behandelt werden soll. Und das Element Gold holt ein Junge in großen Klumpen aus seinem Riechorgan, nachdem die Lehrerin ihn verärgert gefragt hat, ob er beim ständigen Nasebohren darauf zu stoßen hoffe. Anmerkungen am Ende der Texte informieren kurz über Eigenschaften der jeweils vorgestellten Elemente. Manche Episoden verbinden sich wie Partner bei chemischen Reaktionen. Die kuriosen Texte sind unterhaltsam – einen Abschnitt über Katzensgold sucht der Leser allerdings vergebens. Insgesamt bietet das Werk wenig Wissenschaft, aber viel Belletristik.

KATJA MARIA ENGEL



Timm Sigg

Statistik-Formeln für Dummies

Wiley, Weinheim 2014. 240 S., € 12,99

Der Buchtitel lässt ein trockenes Nachschlagewerk vermuten, das vor allem auf schnelle Auffindbarkeit von Formeln abzielt. Man merkt jedoch bei der Lektüre rasch, dass der Autor auch großen Wert auf Verständlichkeit und Lesbarkeit legt. Von der beschreibenden Statistik über die Wahrscheinlichkeitsrechnung bis hin zu wichtigen Tests der schließenden Statistik behandelt Sigg alle wesentlichen Inhalte einer elementaren Statistikvorlesung. Selbst einfache Begriffe, Konzepte oder Anwendungen bespricht er ausführlich und verdeutlicht sie an zahlreichen Beispielen. Wo es darauf ankommt, legt Sigg, Mathematikprofessor an der Hochschule Esslingen, dennoch Wert auf formalen und präzisen Sprachgebrauch. Das Buch eignet sich für Studierende und Berufstätige, die sich mit Statistik und ihren Anwendungen vertraut machen wollen. Da der Autor jedoch an einigen Stellen auf mathematische Hintergründe und Beweise verzichtet, erreicht sein Werk nicht die fachliche Tiefe eines Lehrbuchs.

ROLAND PILOUS



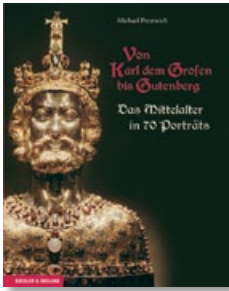
Thomas Brock

Alles Mythos! 20 populäre Irrtümer über die Germanen

Theiss, Darmstadt 2014. 224 S., € 16,95

Über die Germanen werden wunderliche Geschichten erzählt. Das hat einen einfachen Grund: Wir wissen nicht viel über sie. Daher bieten sie sich als Vorlage für allerlei Ammenmärchen und Esoterik an. Der Archäologe und Museumspädagoge Thomas Brock versucht in seinem Buch, die größten Klischees zu rechtzurücken. Mit respektablem Ergebnis: Der Leser erfährt einiges darüber, wie die Menschen zwischen Rhein, Weichsel und Donau einst lebten – und warum man ihnen andichtete, sie seien wild und unzivilisiert. Ausgiebig befasst sich der Autor mit der völkischen Bewegung ab dem 19. Jahrhundert, welche die Germanen in absurder Geschichtsklitterung zu »Urdeutschen« stilisierte. Dabei hinterfragt er auch den Begriff des »Ariers« und zeigt, wie schwammig dieser ist. Gerade Archäologen, so Brocks Fazit, haben sich bei der rassistischen Vereinnahmung der Germanen unruhlich hervorgetan.

FRANK SCHUBERT



Michael Prestwich

Von Karl dem Großen bis Gutenberg

Das Mittelalter in 70 Porträts

Koehler & Amelang, Leipzig 2014

288 S., € 39,95

GESCHICHTE

Von wegen dunkel

Ein erhellendes Buch zeigt, dass das Mittelalter längst nicht so finster war wie sein Ruf.

Kein anderes Zeitalter ist derart klischeebehaftet wie das Mittelalter – jene Epoche, die der italienische Humanist Francesco Petrarca (1304–1374) als »media aetas«, als Antike und Neuzeit trennendes mittleres Zeitalter bezeichnete. In erschreckendem Ausmaß finster sei dieser Abschnitt der Geschichte gewesen, so Petrarca – eine Wertung, die noch der Aufklärer Voltaire (1694–1778) vertrat, indem er das Bild vom »pfäffisch gegängelten, feudal tyrannisierten und materiell wie geistig rückständigen Mittelalter« zeichnete.

Erst die Mediävistik räumte mit diesem Vorurteil auf, indem sie belegte, dass die Zeit von 500 bis 1500 mehr von Erfindergeist geprägt war als von Rückständigkeit und Aberglaube. Diese progressive Sichtweise macht sich auch Michael Prestwich, emeritierter Professor für Geschichte an der Durham University of England, zu eigen. In seinem facettenreichen und unterhaltsam geschriebenen Buch »Von Karl dem Großen bis Gutenberg« erzählt er die Geschichte des Mittelalters in 70 Kurzporträts. Aus denen geht hervor, dass die Jahrhunderte zwischen Antike und Neuzeit jede Menge Erfindungen hervorbrachten – darunter Universität und Reisescheck, Kompass und Brille, Turmuhr und Steigbügel, Versicherungspolice und Buchdruck sowie den Beruf des Auslandskorrespondenten.

Ob Kaiser (Karl der Große, Friedrich Barbarossa, Karl IV.), Könige (Hakon von

Norwegen, Ludwig IX. von Frankreich), Päpste (Urban II., Innozenz III.), Philosophen (Ibn Sina, Thomas von Aquin), bedeutende Heerführer (El Cid, John Hawkwood) oder Personen wie der französische Bauernführer Guillaume Caillet (gest. 1358) – sie alle haben ihrer Zeit den Stempel aufgedrückt und sind umgekehrt von ihrer Zeit geprägt gewesen. Damit dienen sie Prestwich als Kronzeugen dafür, dem Leser »einen Eindruck von der Vielfalt und der Komplexität des Mittelalters« zu vermitteln.

Für den damaligen Erfindungsreichtum stehen zuvorderst Menschen wie Johannes Gutenberg (um 1400–1468), der den Buchdruck mit beweglichen Lettern erdachte, oder der italienische Baumeister Filippo Brunelleschi (1377–1446), der die architektonischen Grundlagen schuf, um den Florentiner Dom mit einer gigantischen Kuppel zu überspannen. Bedeutende Schrittmacher waren auch der päpstliche Leibarzt Guy de Chauliac (um 1300–1368), der Studien an geöffneten Leichen durchführte, sowie der französische Sprengstoffexperte Jean de Lamouilly – er wendete anno 1304 erstmals Schießpulver in der westeuropäischen Kriegsführung an. Nicht zu vergessen der italienische Ingenieur Mariano di Jacopo (1382–1453), dessen Erfindungen (mobile Kräne für Bauarbeiten, Pumpsysteme) wesentlich zur Stadtentwicklung beitrugen, oder der einäugige hussitische General Jan Žižka (gest. 1424), der mit Eisenplatten

und Schießscharten versehene Streitwagen bauen ließ und als Erfinder der Wagenburg gilt. Sie alle finden in Prestwichs Buch ihren Platz.

Der Leser erfährt auch von dem englischen Geistlichen und Gelehrten Geoffrey von Monmouth (um 1100–1155), der die Artuslegende populär machte, und dem Benediktinermönch Guibert von Nogent (1060–1124), Urheber einer der wenigen Autobiografien des Mittelalters. Zusammen mit anderen Denkern haben sie das mittelalterliche Geistesleben inspiriert – darunter zahlreiche Frauen wie Hrotsvit von Gandersheim (935–1000), die erste deutsche Geschichtsschreiberin, sowie die Mystikerinnen Hildegard von Bingen (1098–1179) und Katharina von Siena (1347–1380).

Überhaupt zeigt der Autor, dass die manchmal geäußerte Auffassung, Frauen hätten im Mittelalter nichts zu sagen gehabt, fehlgeht. Auch in vermeintlichen Männerdomänen waren Damen anzutreffen, etwa Herzogin Eleonore von Aquitanien (1124–1204) oder Markgräfin Mathilde von Tuszien (1046–1115), deren Worte bei Kaiser und Papst Gewicht hatten und die wesentlichen Einfluss auf die Politik nahmen.

Es ist das große Verdienst des Buchs, dem Leser das vielschichtige Spektrum der mittelalterlichen Welt zu eröffnen. Allerdings werden die beschriebenen Personen nicht immer in ihren geschichtlichen Kontext eingebettet. Ein weiteres Manko ist die allzu strikte chronologische Kapiteleinteilung in ein »Zeitalter der Imperien (800–1100)«, eine »Epoche der Zuversicht (1100–1200)«, eine »Epoche der Reife (1200–1300)« und so weiter. Diese Unterteilung lässt Übergänge, Kontinuitäten und Brüche nicht zu und wird dem Mittelalter als heterogener Epoche im ständigen Fluss nicht gerecht.

Insgesamt präsentiert sich »Von Karl dem Großen bis Gutenberg« als lesenswertes Buch mit interessanten Details, aber ohne Blick für das große Ganze.

Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist.



Günter Jaritz
Seltene Nutztiere der Alpen
 7000 Jahre geprägte Kulturlandschaft
 Anton Pustet, Salzburg 2014
 336 S., € 39,-

AGRARWISSENSCHAFT

Die vergessene Vielfalt

Hochgezüchtete Einheitsrassen haben die alten Nutztiere der Alpen verdrängt – doch deren Stunde könnte erneut schlagen.

Traditionelle Nutztiere der Alpen haben sich viele Eigenschaften von Wildtieren bewahrt. Raue Witterung, kurze Sommer und starke Temperaturschwankungen bereiten ihnen kaum Probleme. Sie sind trittsicher, genügsam, widerstandsfähig, krankheitsresistent und fruchtbar. Mit ihrer hervorragenden Anpasstheit an ihre jeweiligen Regionen bewähren sie sich schon seit sehr langer Zeit, denn ihre Geschichte begann vor rund 7000 Jahren, als neolithische Bauern die Alpen erreichten.

Heute jedoch sind die alten Nutztiere der Alpen vom Aussterben bedroht, da die Tierwirtschaft des 20. Jahrhunderts auf die Zucht kurzlebiger Hybride (Kreuzungen von Tieren verschiedener Zuchtlinien oder Rassen) setzte, die auf einen möglichst hohen Eier-, Milch- oder Fleischertrag getrimmt sind. Viele Bauern haben zu Gunsten dieser »Tiermaschinen« die Haltung traditioneller Rassen aufgegeben – wodurch ein großes Stück Vielfalt verloren ging.

Der Landschaftsökologe Günter Jaritz beleuchtet diese Entwicklung aus kritischer Perspektive. Er setzt sich im Salzburger Pinzgau (Österreich) für die Erhaltung des Alpiner Steinschafs, der Pinzgauer Strahlenziege und der Blauen Ziege ein. Sein reich bebildeter Band präsentiert gefährdete Rassen und Zuchtlinien des gesamten Alpenraums. Darunter sind Rinder, Schweine, Hühner, Schafe und Ziegen ebenso wie Pferde, Esel und Hunde.

Jaritz' Werk vermittelt einen guten Überblick über die einstige enorme Vielfalt alpiner Nutztiere. Es rückt deren Zuchtgeschichte in den Vordergrund und listet in Tabellen deren Bestände und Gefährdungsgrade auf. Detaillierte »Steckbriefe« stellen einzelne Rassen näher vor und umreißen ihre ursprünglichen Verbreitungsgebiete. Das Alpine Steinschaf zum Beispiel, originär in den Ostalpen gehalten, sucht sein Futter auf höchstgelegenen, steilen Weiden des Hochgebirges. Die Provenzalische Ziege hingegen, optimal an das mediterrane Klima angepasst, ernährt sich von Gehölzen wie der Flaumeiche sowie von trockenresistenten Pflanzen.

Besonders erwähnenswert ist das kleinste Rind der Alpen. Das kastanienbraune Evolèner Vieh mit dem weißen Stirnfleck stammt aus der Schweiz und

hat eine Widerristhöhe von nur 1,15 bis 1,30 Meter. Obwohl so klein, bringt es 500 bis 600 Kilogramm auf die Waage. Das Rind hat einen kurzen Kopf, eine ausgeprägte Muskulatur sowie harte Klauen und kann deshalb sehr steile Hochlagen beweidet werden.

Auf Grund ihrer besonderen Qualitäten könnten die alten Nutztiere künftig wieder wichtig werden, so Jaritz. Denn sie eigneten sich hervorragend für die Landschaftspflege und passten gut in das Konzept eines nachhaltigen, sanften Tourismus. Anreize dafür, sie zu halten, gingen auch von der steigenden Beliebtheit heimischer Produkte aus. Die Tiere erbrächten passable Erträge, ohne unbedingt mit Kraftfutter versorgt werden zu müssen, wie es bei den hochgezüchteten Einheitsrassen der Fall sei. Nicht zuletzt gehörten die traditionellen Rassen als Kulturgut zur Alpenregion.

Der Wert ihrer genetischen Vielfalt sei nicht zu unterschätzen, betont der Autor – insbesondere in der Hühnerzucht. Industrielle Zuchtstämme gingen in der Regel auf nur sehr wenige Zuchtlinien zurück und seien deswegen genetisch so verarmt, dass ihr Immunsystem nur noch eingeschränkt funktioniere. Das mache sie hoch anfällig für Krankheiten und erkläre den massiven Einsatz von Antibiotika in der Tierhaltung. Alte Landhuhnrasen dagegen, etwa die Appenzeller Spitzhaube aus der Ostschweiz, verfügten noch über einen umfangreichen Genpool und seien daher von Natur aus weit gehend krankheitsresistent.

Jaritz' Buch legt überzeugend dar, welche entscheidende Rolle die traditionellen Nutztiere einst beim Vordringen des Menschen in die Alpen spielten, wie groß ehemals ihre Vielfalt war und wie stark ihr Überleben nun von uns abhängt. Eine Wiederverbreitung vieler dieser Tiere hält der Autor für möglich, wenn diese nicht nur zu Erhaltungszwecken gezüchtet, sondern auch in ihrer Region auf der Alp gehalten werden.

Kristina Vonend

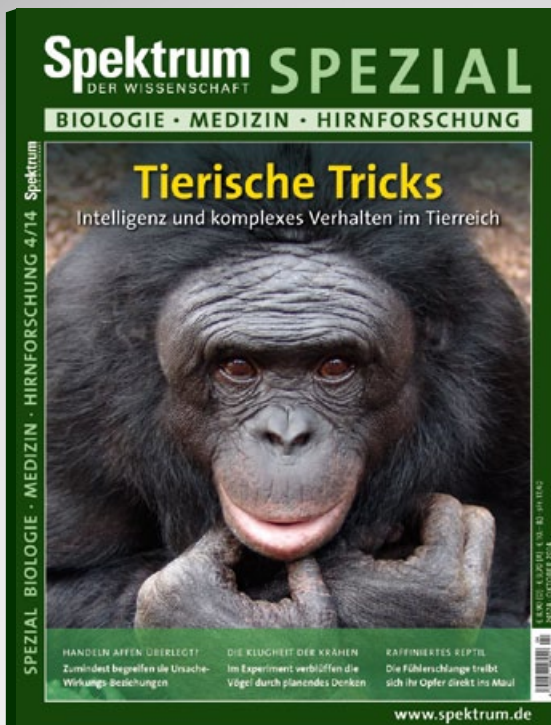
Die Rezensentin ist Germanistin (M.A.) und arbeitet als freie Pressereferentin in München.

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Besprechungen finden Sie unter:
www.spektrum.de/rezensionen

DAS GANZE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT:
UNSERE SPEZIALREIHEN



Alle Hefreihen auch im Handel erhältlich!

JETZT IM
 ABO FÜR NUR
€ 7,40
 PRO HEFT
 BESTELLEN

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

So einfach erreichen Sie uns:
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/spezialabo
 Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.de

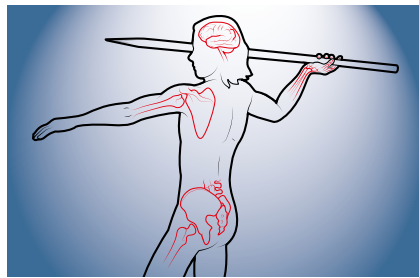
Oder QR-Code
 per Smartphone
 scannen und
 Angebot sichern!



Keine geborenen Jäger

Früher als bisher gedacht erwarben unsere Vorfahren körperliche Eigenschaften, die sie zum Erlegen von Tieren benötigten, schrieb Kate Wong. (»Zum Jagen geboren«, November 2014, S. 26)

Ingo Mehling, Frankfurt: Die Fähigkeit, große Strecken in warmem Klima zurückzulegen, aber nur eine geringe Geschwindigkeit zu erreichen, sowie Hände, die zwar zum Greifen, Puhlen und Graben geeignet sind, aber nur relativ wenig Kraft entwickeln und denen Raubtierklauen fehlen, deuten eher darauf hin, dass unsere Vorfahren Nahrung durch Sammeln statt durch Jagen erworben haben. Die im Artikel geschilderten anatomischen Besonderheiten lassen sich zwanglos anders erklären. Es wurde ja erwähnt, dass die Fähigkeit, Steine zu werfen, für Frühmenschen auch aus anderen Gründen nützlich war, etwa zum Vertreiben von Raubtieren oder bei Revierkämpfen. Die Stellung der Schulter- und Armgelenke ist eher darauf zurückzuführen, dass sie die Bearbeitung von Gegenständen mit beiden Händen gleichzeitig ermöglicht.



BROWNBIRD DESIGN

benannt zu haben (Hoffmann et al. 1998; und Scheid et al. 2003).

Eigenschaften wie Wurfarm und geschickte Hände passen zum Bild eines Jägers.

Riesenviren schon früher bekannt

Aus dem sibirischen Eis konnten Forscher sehr große Viren auftauen, die noch infektiös waren. (»Virengiganten aus dem Permafrost«, November 2014, Forschung aktuell, S. 18)

Rolf Michel und Dieter Müller, Melsbach: Mit großem Interesse haben wir den Artikel gelesen. Was wir aber bei der Lektüre vermisst haben, ist die Tatsache, dass derartige Riesenviren bereits wesentlich früher in Deutschland entdeckt und morphologisch ausführlich beschrieben wurden – ohne allerdings damals ihre Identität als Riesenviren

Bestrahlte Gelenke

Drei Experten für nuklearmedizinische Anwendung aus der Schweiz und aus Frankreich stellten neue, spezifisch wirkende Isotope vor. (»Maßgeschneider-te Radionuklide gegen Krebs«, November 2014, S. 32)

Michael Lemb, Bremen: In Ihrem informativen Artikel über nuklearmedizinische Tumorthherapie (sehr dankenswert, dass unsere kleine Spezialdisziplin den Weg in Ihre Seiten gefunden hat) werden die gängigen Tumorthérapien in einer Übersicht aufgeführt. Genau genommen fehlt dabei aber eine verbreitete Therapie: die Radiosynoviorthese (in Deutschland etwa 100 000 Anwendungen pro Jahr). Dies ist zwar keine Krebstherapie im eigentlichen Sinn, vielmehr eine Anwendung in der Rheumatologie. Der Therapie liegt aber eine analoge Überlegung zu Grunde.

Bei rheumatischen Gelenkerkrankungen findet eine Wucherung der In-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

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

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

Redaktion: Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke;

E-Mail: redaktion@spektrum.de

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

Art Direction: Karsten Kramarczik

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

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

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

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistent: Barbara Kuhn

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

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

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

E-Mail: service@spektrum.de

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

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer, Prof. Dr. Klaus Volkert.

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80,

70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366,

E-Mail: spektrum@zenit-presse.de,

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-;

im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten

(gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland:

€ 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement

(Vollpreis): € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.

Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708,

BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und

Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten

SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe

Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick

Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315;

verantwortlich für Anzeigen: Annette Freistühler, Postfach

102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1322

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk:

Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67,

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 35 vom 1.1.2014.

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

KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven

Inchcombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice

President and Associate Publisher, Marketing and Business

Development: Michael Voss



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



nenhaut (Synovia) statt, die durchaus Tumorcharakter hat. Die verdickte Synovia bildet Pseudotumoren (Pannus), die angrenzende Strukturen wie Bänder, Knorpel und Knochen zerstören. Die Injektion von Radiokolloiden, markiert mit Er-169, Re-186 und Y-90, in die Gelenkhöhlen der so befallenen Gelenke führt zu einer Speicherung des jeweiligen Radionuklids im Pannus. Dieser erfährt dann durch Betastrahlen mit Energien um 1 MeV eine hohe (rein lokale) Strahlenbelastung um 100 Gy. Damit kommt es zu einer allmählichen Rückbildung dieser Pseudotumoren.

Die Radiosynoviorthese stellt eine wirksame antientzündliche und lang anhaltende therapeutische Maßnahme dar. Vielen Patienten wurden so Schmerzen genommen und die Gelenkbeweglichkeit zurückgegeben.

Krise der Spekulationsphysik

Die Physiker Joseph Lykken und Maria Spiropulu erörtern, ob die für die Quantenwelt angenommene Supersymmetrie experimentell bestätigt werden wird. (»Supersymmetrie in der Krise«, September 2014, S. 36)

Roland Rosenfelder, Waldshut-Tiengen: Jahrzehntlang habe ich mir in Seminaren die Unzulänglichkeiten des Standardmodells (einer großartigen, unglaublich erfolgreichen Theorie) und die Vorzüge supersymmetrischer Erweiterungen angehört. In der Tat ist das Postulat einer Supersymmetrie in der Teilchenphysik elegant und löst viele (theoretische) Probleme, aber die Verdopplung der Anzahl der fundamentalen Teilchen, das Verschieben der supersymmetrischen Partner zu hohen, bis jetzt nicht beobachteten Energien und die Proliferation der unbekannt Parameter in solchen Modellen hält Occams Rasiermesser nicht stand.

Und am wichtigsten: In einer empirischen Naturwissenschaft wie der Physik gilt – gerade nach den bisherigen LHC-Ergebnissen – immer noch das Diktum von Richard Feynman: »It doesn't matter how beautiful your the-

ory is, it doesn't matter how smart you are. If it doesn't agree with experiment, it's wrong!«

Dasselbe trifft in noch höherem Maß auf die verschiedenen genannten Alternativen (extra Dimensionen, Multiversum) zu. Dass wir (wie im Artikel behauptet) »unser Bild von der Quantenphysik insgesamt auf den Prüfstand stellen müssen«, wenn keine Superpartner gefunden werden, ist eine schwer zu akzeptierende Behauptung der beiden Autoren, die als (Hochenergie-)Teilchenphysiker wohl andere Gebiete, in denen die Quantenphysik in ihrer bisherigen Form eine entscheidende Rolle spielt (wie Niederenergie-teilchenphysik, Kernphysik, Atomphysik, Molekülphysik, Festkörperphysik, Quantenchemie, Informatik), großzügig übersehen. Der Titel dieses Artikels sollte daher eher »Die Krise der Spekulationsphysik« lauten!

Entwicklung von Waffentechnik ist nicht neutral

Der Chemiker Michael Höfer schilderte den Einsatz von Gasen als Kampfmittel. (»Giftgas gegen den Feind«, September 2014, S. 46)

Rainer Fislage, St. Wendel: Die Entwicklung des Giftgaskriegs ist untrennbar mit dem Namen Haber verbunden. Die Darstellung dieses Mannes bleibt jedoch immer seltsam ambivalent. Dabei hat es die Kombination aus Massenmörder und genialem Wissenschaftler in der Geschichte schon öfter gegeben. Neben Fritz Haber ist sicherlich der Fall Wernher von Braun zu nennen.

Menschen, die Waffen entwickeln, sind schuldig; die Menschen, die sie einsetzen, sind schuldig; die Menschen, die ihre Entwicklung zulassen, sind schuldig; die Menschen, die ihren Einsatz zulassen, sind schuldig. Dazu gehört auch, Leute wie Fritz Haber als das zu bezeichnen, was sie sind: skrupellose Mörder. Was mögen die Nachfahren der französischen Gastoten eigentlich davon halten, dass ein deutsches Forschungsinstitut heute noch nach dem Mörder ihrer Verwandten benannt ist?

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

Errata

»Moleküle in Platznot«, Chemische Unterhaltungen, Oktober 2014, S. 74

Die Raumerfüllung dichtester Kugelpackungen beträgt 74 statt 70,4 Prozent. Magnus Buhlert aus Bremen wies uns auf den Druckfehler hin (S. 76, dritte Spalte).

»Das Geheimnis des blauen Schattens«, Oktober 2014, S. 52

Auf S. 53 in der dritten Spalte muss es im dritten Satz heißen: »Der Trabant hat das Maximum seiner Vollmondphase also streng genommen noch nicht erreicht – auch wenn wir ihn bereits als Vollmond wahrnehmen ...«

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

oder per E-Mail: leserbriefe@spektrum.de

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

»SEI NÜTZLICH!«

VON ERICA L. SATIFKA

Kaum ist mein Bruder halbwegs erwachsen, beschließt er, ein Fundament zu werden. Und zwar das Fundament für den Neubau des Rathauses in Austin, Texas.

»Du warst noch nie in Texas«, sage ich. »Es war der beste Einstiegsjob, den sie hatten«, erwidert er mit einem kleinen, traurigen Achselzucken. »Und man bekommt das Wochenende frei.«

Ich arbeite noch immer bei Jiffy Mart an der Kasse; mit dieser sinnlosen Tätigkeit, um die mich niemand gebeten hat, schiebe ich das Unvermeidliche hinaus. Meine Freunde sind alle fortgezogen, um Hydrant zu werden oder Bankautomat oder Presslufthammer oder eine fünfteilige Essecke.

»Undifferenziert«, so nennen die Schöpfer solche wie mich. Ich höre ihr Flüstern durch die Gedankenstrahlen, die sie von ihren mit Menschenkraft angetriebenen Satelliten aussenden: *Wähle. Entscheide dich. Sei nützlich.*

Und ich antworte: »Noch nicht.«

Die Türglocke bimmelt, und ich sehe auf. Eine halb verwandelte Frau platzt in den Laden. Wahrscheinlich hat sie soeben ihre Injektion bekommen, nach einem geruhsamen Wochenende. Sie ist halb Mensch, halb Vespa, und ihr Fahrgestell kratzt den Anstrich vom Türrahmen.

»Können Sie mir helfen?«

Ich seufze und bugsiere sie herein. Ich hätte ihr die Einkäufe hinaus zum

Parkplatz gebracht, wenn sie mich darum gebeten hätte. »Was brauchen Sie?«

»Motoröl. Schokokekse.«

Ich verstae die Waren in den Satteltaschen. Natürlich gibt sie kein Trinkgeld. Als ich hinter ihr die Tür schließe, rülpst sie mir stattdessen eine Auspuffwolke ins Gesicht. Die Vespa wirft einen Keks in ihren Mund und rast davon, die gezackten Zähne bedeckt mit Schokoladekrümeln. Nach vollendeter Verwandlung wird sie an einer Ecke im Leerlauf warten, bis ein Schöpfer aufspringt.

Für die Schöpfer gibt es keinen Unterschied zwischen »Lebewesen« und »Objekt«, sie sind lebendig, aber nicht biologisch. Sie können kaum glauben, dass uns Menschen eine derart mickrige Sache wie der eigene Körper etwas bedeutet. Für einen Schöpfer ist ein Job einfach nur ein Job, und alle spielen brav ihre Rolle. Bloß von uns bleiben manche selbstsüchtig ganz undifferenziert.

Wähle, sagen die Stimmen in meinem Kopf. *Entscheide dich.*

»Noch nicht«, sage ich. »Verpiss euch.« Das verschlägt ihnen die Sprache, wenigstens vorübergehend.

Die Heimatwelt der Schöpfer ist so künstlich wie sie selbst – eine kugelförmige Fabrik, die um eine ferne blaue Sonne kreist. Keine Natur, nur Industrie. Auf ihrer Reise durch den Kosmos dienen ihnen die Körper der zuletzt eroberten intelligenten Lebensform als Raumschiffe. Der Kontakt mit unserer

Atmosphäre bedeutete zwar deren Tod, doch sie starben fröhlich. So erzählten es uns die Schöpfer. Sie starben wohlgehumt, weil sie zu etwas nützlich gewesen waren.

Da bin ich mir nicht so sicher.

Es war eine langsame Invasion, die sich als Kur zur Selbstverbesserung tarnte. Natürlich, keiner meiner Freunde hatte einen Job. Wir lebten alle auf Pump, besuchten nutzlose Fortbildungskurse, um unsere Krankenversicherung zu behalten, während wir so taten, als wäre der Keller unserer Eltern eine fabelhafte Einzimmerwohnung. Die Schlange vor den Arbeitsämtern der Schöpfer zog sich über die Gehsteige wie eine Ameisenstraße.

Immerhin mochte ich den Kurs in Kunstgeschichte, den ich damals besuchte. Es machte mir nichts aus, zu Hause zu wohnen. Außerdem tun die Injektionen weh. Injektionen tun immer weh.

Die Schöpfer hegen ihre menschlichen Maschinen wie sorgsame Gärtner. Auf ihren krummen insektenähnlichen Beinen staksen sie die von Menschen gesäumten Straßen entlang. Und jeden Tag spüre ich, wie ihr Hass gegen solche wie mich stärker pulsiert.

Als meine Eltern noch Vollzeitmenschen waren, machten sie Telearbeit; also war es für sie sinnvoll, ein Haus zu werden. Das erweist sich jetzt einerseits als gut, denn ich muss nicht in der Ach-

selhöhle eines Fremden schlafen. Andererseits ist es schlecht, denn es gibt keine Privatsphäre. In einem aus den Knochen deiner Eltern erbauten Haus ist Sex undenkbar. Ich vermüte, das ist der Grund, warum mein Bruder so weit fortzieht.

»Du wirst mir fehlen«, sage ich, während ich ihm beim Packen zusehe.

Er hat schon die ersten Injektionen bekommen, und seine Stimme rasselt heiser. Er wird immer mehr zum Mann aus Stein. »Du könntest mitkommen.«

»Ich kenne keinen dort unten«, sage ich. Ich verschweige, dass ich hier auch niemanden mehr kenne. Die Verwandten tragen keine Namensschilder oder so etwas, darum erkennt man seine Freunde nur, wenn sie sich in ihrer Freizeit teilweise zurückverwandeln. Und nützliche Objekte wollen nicht mit undifferenzierten Faulenzern wie mir herumhängen. »Ich werde dir schreiben. Du wirst noch lesen können, oder?«

»Natürlich werde ich lesen können. Ich kann alles tun, was du kannst – außer mich bewegen.«

»Aber die Wochenenden kriegst du doch frei.«

»Die Wochenenden«, sagt er, »und jeden zweiten Mittwoch.«

Ich fahre nicht mehr mit öffentlichen Verkehrsmitteln, und ich wage nicht in ein Taxi zu steigen, denn es könnte mein verhasster Lehrer aus der fünften Klasse sein. Zum Glück wohne

ich nur zehn Kilometer vom Meer entfernt. Ich schwinge mich auf mein treues Fahrrad, das nie lebendig war, und stramble die Straße zur Küste hinunter.

Wähle, sagen die Stimmen. *Wirke mit. Sei nützlich.*

Ich stramble schneller.

Im November ist die Küste menschenleer. Ich ziehe meine Schuhe aus, rolle die Hosenbeine auf und wate ins brackige Wasser.

Ich wähle, dass ich die Luft bin, denke ich. Ich entscheide mich, der Regen auf meinem Gesicht zu sein und die Steine unter meinen Füßen, die Wellen, die sich an den Steinen brechen, und das Sonnenlicht, das auf die Wellen fällt. Ich wünsche mir, in der Natur zu verschwinden, in die Erde zu sinken. Das ist etwas, was uns die Schöpfer nicht geben können, denn all das hat keine Funktion. Es ist nutzlos.

Ich stehe im Meer, bis der prasselnde Regen unerträglich wird. Meine Zähne klappern. Aber ich mag einfach nicht fortgehen. Der Regen ertränkt die Stimmen, die Dunkelheit verbirgt die Boote in der Ferne, und ich muss mich nicht fragen, wer sie sind, wenn sie überhaupt jemand sind.

Ich weiß, eines Tages werde ich wählen müssen. Ich kann nicht ewig undifferenziert bleiben.

Aber jetzt noch nicht, noch ist es nicht so weit. Ich bin noch längst nicht bereit. 🌌

DIE AUTORIN

Erica L. Satifka schreibt Geschichten, die unter anderem in den Online-magazinen »Clarkesworld« und »Daily Science-Fiction« erschienen sind. Sie lebt in Portland (US-Bundesstaat Oregon).

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

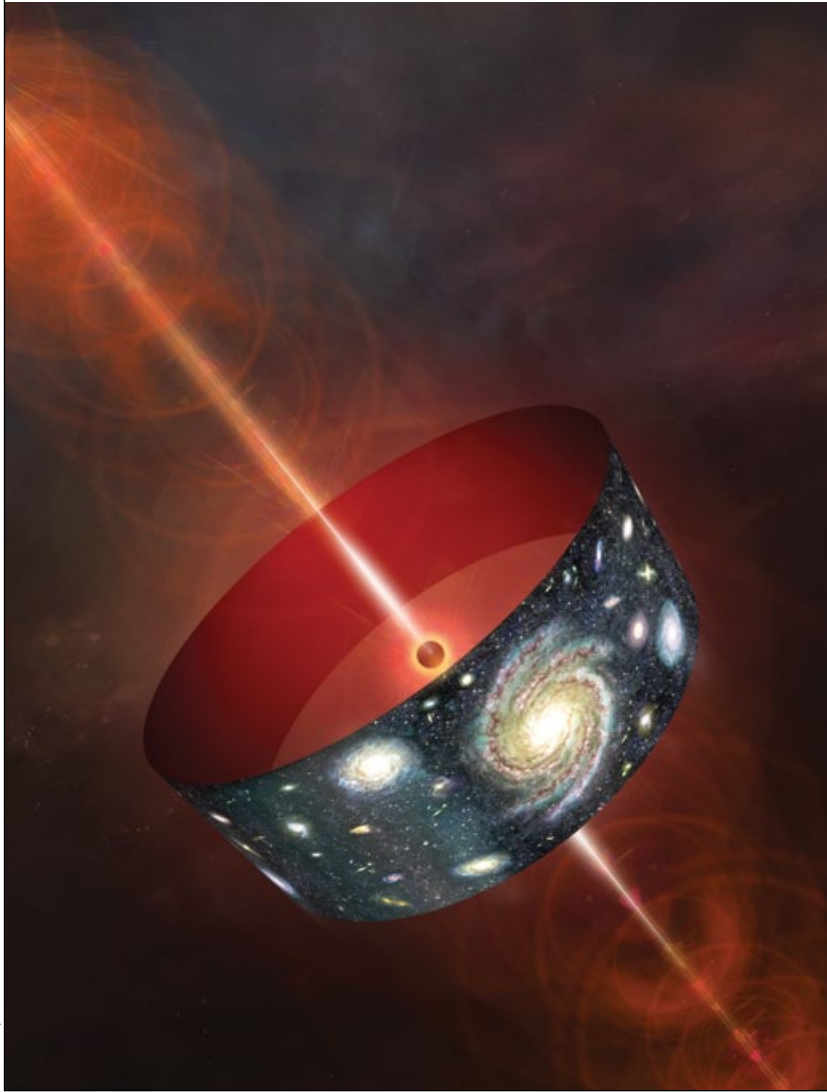
© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 514, S. 266, 9. Oktober 2014

Der Urknall – ein Schwarzes Loch?

Gemäß dem kosmologischen Standardmodell begann das Weltall mit der »Singularität« des Urknalls – mit einem Zustand, bei dem alle physikalischen Beschreibungen versagen. Eine neue Hypothese postuliert stattdessen als Ursprung des Alls ein Schwarzes Loch, das durch den Kollaps eines Sterns in einem höherdimensionalen Universum entstand.



KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

Gentherapie 2.0

Das Einschleusen von Erbgut in Körperzellen erschien einst als verheißungsvolle Therapie gegen schwer zu behandelnde Leiden wie etwa Erbkrankheiten. Tragische Fehlschläge warfen die Forschung allerdings weit zurück. Mittlerweile jedoch scheint die Gentherapie für den klinischen Einsatz bereit zu sein.

Fossiliensuche per Satellit

Bisher gehörte zum Auffinden bedeutender Fossilagerstätten eine gute Portion Glück. Doch neue Computermodelle gewinnen aus spektroskopischen Messungen von Satelliten Informationen über die Bodenbeschaffenheit, mit deren Hilfe sich am Bildschirm aussichtsreiche Gebiete aufspüren lassen.



GOKO / PUBLIC DOMAIN

Wer regierte Teotihuacan?

Die gewaltigen Tempelpyramiden von Teotihuacan geben den Archäologen Rätsel auf – und spalten sie in zwei Lager. Während die einen eine Monarchie an der Spitze des mittelamerikanischen Reichs sehen, halten andere eine gut organisierte Oligarchie für wahrscheinlicher.



ANDRÉ KUTSCHERAUER

Simulation eines kompletten Organismus

Ein ganzer Lebenszyklus eines Bakteriums, von einer Zellteilung bis zur nächsten, ist im Computer nachgebildet worden – von der Aktivität jedes einzelnen Gens über die Proteinsynthese bis hin zur Einschnürung des Zellkörpers.

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.de/newsletter

JETZT BESTELLEN:
DAS SPEKTRUM-DER-WISSENSCHAFT-ABO
mit exklusiven Extras



VERPASSEN SIE
KEINE AUSGABE
DES MAGAZINS!

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK!



- 1. Das Buch »So geht das!«**
500 Dinge und wie man sie macht.
Wie topft man eine Pflanze um?
Wie bindet man eine Krawatte?
Wie steigt man auf ein Kamel? ...
Einfach und anschaulich erklärt,
mit wenig Text und vielen Piktogrammen.

JAHRES- ODER GESCHENKABO

- + ERSPARNIS:**
12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 13% günstiger. Weitere Vergünstigungen unter: www.spektrum.de/aboplus
- + WUNSCHGESCHENK:**
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Auch wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten Sie das Präsent.
- + PÜNKTLICHE LIEFERUNG:**
Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.
- + KEINE MINDESTLAUFZEIT:**
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen.



- 2. Füllhalter »pur« von Lamy:**
Der elegante Füllhalter »pur« aus dem Hause Lamy mit Stahlfeder und Etui ist garantiert auch auf Ihrem Schreibtisch ein Blickfang.

So einfach erreichen Sie uns:

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

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Ein Arbeitsmodell mit Zukunft +++ Mensch und Maschine
gemeinsam +++ An einem Band +++ Mit Robotern +++
Die körperliche Belastung minimieren +++ Und so die
Gesundheit fördern +++ Die BMW Group +++ Vorreiter
bei der Produktion 4.0

Mehr erfahren im Film unter:

BMWGROUP.COM/WHATSNEXT

WARUM WIR MIT ROBOTERN IM TEAM ARBEITEN? WEIL ES KEINE FOLGEN HAT.

**INNOVATIVE PRODUKTION OHNE KÖRPERLICHE BELASTUNG.
FÜR UNS DER NÄCHSTE SCHRITT.**

**BMW
GROUP**



Rolls-Royce
Motor Cars Limited