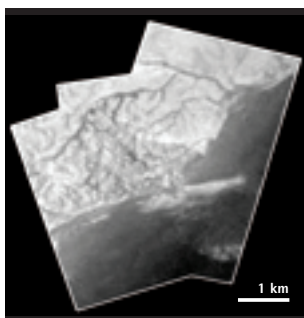
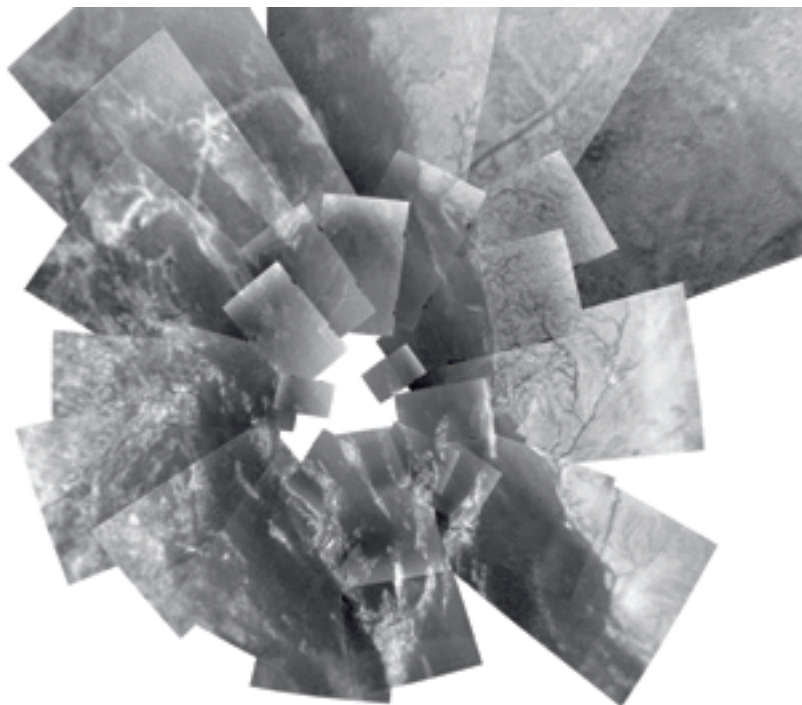




# FORSCHUNG aktuell

FOTOS: ESA/NASA/UNIVERSITY OF ARIZONA

Ein Mosaik der Titanoberfläche (großes Bild) zeigt ein dunkles Überschwemmungsgebiet und Anzeichen fluvialer Erosion (Ausschnitt). Die helleren Gebiete sind offenbar Hügel, die von Niederschlägen abgewaschen wurden.



## SONNENSYSTEMFORSCHUNG

### Titans Schleier gelüftet

Die Anspannung im Kontrollzentrum war groß am Morgen des 14. Januar: Mehr als 22 Jahre nach dem ersten Konzept sollte sich die Mission erfüllen und die europäische Raumsonde *Huygens* auf dem Saturnmond Titan landen. Die Wissenschaftler wurden nicht enttäuscht: Auf den Bildern zeigen sich Felsbrocken und Strukturen, die ausgetrockneten Flussbetten und Seen ähneln – wie man sie eher auf dem Mars oder der Erde vermuten würde. Im Folgenden berichtet Horst Uwe Keller vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung von den ersten Ergebnissen. Das Institut in Katlenburg-Lindau hatte

den CCD-Detektor mit Ausleseelektronik für das Instrument DISR entwickelt.

„Ist das wirklich die Titanoberfläche?“, fragten sich die Forscher, als das Bild (S. 6) auftauchte. Es erinnerte stark an Fotos, welche die Sonde *Pathfinder* im Jahr 1997 von der Marsoberfläche geliefert hatte: Steine verstreut über sandigem, flachem Boden. Die Aufnahme stammte von DISR, dem „Descent Imager/Spectral Radiometer“ – einem Multifunktionsinstrument aus mehreren Spektrometern, Fotometern und Kameras (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2004, S. 46ff.). Das Foto zeigte die Titanoberfläche in einem Bereich, der etwa 30 Zentime-

ter von der Sonde entfernt beginnt und sich bis zum Horizont in einem Kilometer Distanz erstreckt.

Die vielen herumliegenden Brocken sind kleiner als 20 Zentimeter, stark abgerundet und teilweise mit Bodenmaterial überdeckt. Das Material um den (Eis-)Brocken nahe der Bildmitte scheint weggespült zu sein. Dieses Phänomen kann man häufig am Boden fließender Gewässer beobachten. Es wird hervorgerufen durch die höhere Fließgeschwindigkeit um das Hindernis herum. Die weitere Umgebung ist topfeben wie der Boden eines ausgetrockneten Sees.

Natürlich gibt es auf Titan kein flüssiges Wasser. Die Tem-

Eine Landschaft wie auf dem Mars, mit verstreuten Brocken auf sandigem, flachem Boden, enthüllt diese Aufnahme der Huygens-Landestelle.



peratur beträgt minus 180 Grad Celsius. Was also hat die Oberfläche überschwemmt? Sehr wahrscheinlich war es flüssiges Methan, vielleicht mit einer Beimischung von Ethan. Methan spielt in der Titanatmosphäre die Rolle, die Wasser auf der Erde einnimmt. Die Oberflächentemperatur bewegt sich nahe dem Tripelpunkt, wo Methan in fester (Eis) und flüssiger Form sowie als Gas (Dampf) vorkommen kann. Da die Temperatur der Atmosphäre zunächst über die ersten 50 Kilometer abnimmt – also bis zur Tropopause –, kondensiert das Methan und bildet Wolken, die schließlich wieder zu Niederschlag führen.

Die Bilder von DISR zeigen deutliche Anzeichen fluvialer Erosion (S. 5, Ausschnitt). Die helleren Gebiete scheinen Hügel zu sein, die von Niederschlägen abgewaschen wurden; diese sammeln sich in flussähnlich verzweigten Tälern, in die das dunkle Material geschwemmt wird. Die Flusssysteme wiederum ergießen sich in die dunkle Ebene. Die Landschaft in dem Mosaikabschnitt ähnelt der Luftaufnahme eines Küstenabschnitts mit einem Stromdelta. Die Aufnahmen mit dem *High Resolution Imager* entstanden etwa 14 Kilometer über der Titanoberfläche. Der „Fluss“ ist weniger als 10 Kilometer lang. Die Erosionskanäle auf Titan sind im Vergleich zu ihrer Länge sehr breit – ähnlich den breiten, relativ flachen Tälern in ariden Gebieten auf der Erde, die nur gelegentlich für kurze Zeit Wasser führen.

Ein großer Teil der für DISR sichtbaren Oberfläche (S. 5, großes Mosaik) wird von dem dunklen Überschwemmungsgebiet bedeckt. In weiteren Aufnahmen kann man deutlich Anzeichen sehen, die auf Erosionen durch fließendes Material hinweisen. Ob flüssiges Methan auf der Oberfläche zu finden ist, lässt sich anhand der Bilder nicht feststellen. Die

Titanoberfläche war erst unterhalb einer Höhe von 20 Kilometern sichtbar. Insgesamt wurde daher nur ein Gebiet mit etwa 30 Kilometer Durchmesser beobachtet.

*Huygens* ist auf der dunklen Ebene weich gelandet. Kurz darauf hat der Gaschromatograf (GCMS) eine erhöhte Konzentration von Methan gemessen, das aufgrund der Erwärmung durch die Raumsonde aus dem Boden freigesetzt wurde. Die vorläufige Auswertung der Beschleunigungsmesser (SSP) zeigt, dass die Oberfläche von einer harten, aber dünnen Schicht (Kruste) bedeckt ist, unter der sich weiches, sandartiges Material verbirgt.

Neben den Anzeichen für Niederschläge zeigen sich auch geologische Strukturen, die auf Aktivität im Inneren Titans hindeuten. Helle, linienförmige Gebilde könnten sich durch hervorquellendes halbflüssiges Wassereis – vielleicht angereichert mit Ammoniak als Gefrierschutz – gebildet haben. Die weit verbreiteten hellen Gebiete könnten Überbleibsel stärkerer vulkanischer Aktivität sein. Auch auf anderen Eismonden der großen Planeten hat man Anzeichen für diesen Kryovulkanismus gefunden. Titan besteht zum Großteil aus Wassereis mit einem Kern aus Silikaten, seine mittlere Dichte ist kleiner als 2000 Kilogramm pro Kubikmeter. Hart gefrorenes

Wassereis auf der Titanoberfläche entspricht Gesteinen auf der Erde.

Titan trägt als einziger Mond im Planetensystem eine Atmosphäre. Daher ist deren Eigenschaft und Wechselbeziehung mit der Oberfläche von besonderem Interesse. Die Wechselwirkung der feuchten Atmosphäre mit der Oberfläche lässt durch Erosion ähnliche geologische Formationen entstehen wie auf der Erde. Die organischen Verbindungen (Tholine), die sich aus dem dissoziierten Methan und dem Stickstoff bilden, geben dem Mond seine gelb-oranger Farbe. Die Moleküle koagulieren in großen Höhen der Atmosphäre und bilden Aerosole. Diese werden immer größer und sinken langsam zur Oberfläche. DISR-Messungen haben gezeigt, dass ihre optische Dichte zwischen 4 und 5 liegt, fast zweimal mehr als zuvor angenommen. Der Smog erstreckt sich bis zur Oberfläche.

Im Lauf von Titans 4,5 Milliarden Jahre währenden Geschichte sollten sich Hydrokarbon- und Nitrilverbindungen in Höhe von mehreren 100 Metern auf der Oberfläche abgelagert haben. Die dunklen Ebenen sind wahrscheinlich mit diesem organischen Material bedeckt. Einen Hinweis darauf sollen die Infrarotspektren von DISR liefern. An deren Auswertung wird fieberhaft gearbeitet. Bisher fand man kein flüssiges Methan und Ethan. Wo ist das Ethan geblieben? Wie wird das verbrauchte Methan ersetzt? *Huygens* hat bestätigt, dass das Argon/Stickstoff (Ar/N<sub>2</sub>)-Verhältnis wesentlich kleiner als ein Prozent ist. Daraus schließt man, dass das heutige N<sub>2</sub> sich aus Ammoniak aufgebaut hat. Zugleich sind größere Mengen des Isotops <sup>40</sup>Ar gefunden worden, das durch radioaktiven Zerfall von Kalium entsteht und aus dem Inneren von Titan ausgegast sein muss – ein weiterer Hinweis auf Kryovulkanismus. ●

FOTO: ESA/NASA/UNIVERSITY OF ARIZONA

NEUROBIOLOGIE

Das Gedächtnis – eine Baustelle

Die Eigenschaft des Nervensystems, seine Struktur und Funktion abzuwandeln, bezeichnen Wissenschaftler als neuronale Plastizität. Offensichtlich gehen Änderungen bei der Informationsübertragung an den Synapsen auch mit sichtbaren morphologischen Veränderungen von Nervenzellen einher, insbesondere der Ausbildung dornenartiger Strukturen. Am Max-Planck-Institut für Neurobiologie in Martinsried ist es Wissenschaftlern gelungen, die Bedingungen zu identifizieren, unter denen Nervenzellen diese Dornen wieder zurückbilden. Dieser Prozess könnte eine Grundlage für das Löschen bestimmter Gedächtnisinhalte sein (NEURON, 2. Dezember 2004).

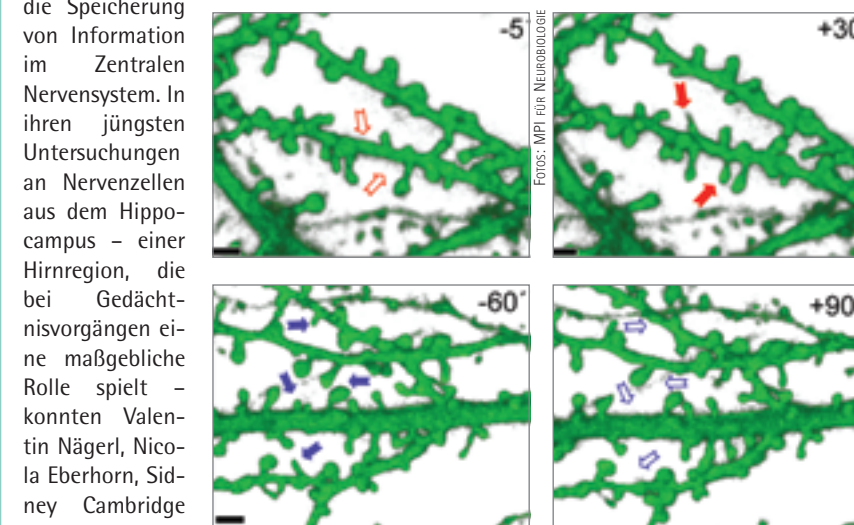
Unser Gehirn ist in seinem Erinnerungsvermögen unübertroffen. Grundlage dafür ist die flexible Vernetzung seiner mehr als 100 Milliarden Nervenzellen. Die Verschaltung dieser Nervenzellen wird an die sich ständig ändernde Umwelt angepasst. Jede Nervenzelle besitzt bis zu 100 000 Dornen – mikroskopisch kleine Auswüchse auf ihren Eingangsstrukturen – und steht so mit anderen Nervenzellen in Kontakt. Diese Kontaktstellen, auch Synapsen genannt, können auf- und abgebaut sowie verstärkt oder abgeschwächt werden.

Im Jahr 1999 haben Tobias Bonhoeffer und sein Team am Max-Planck-Institut für Neurobiologie erstmals beobachtet, wie Nervenzellen nach starker, das heißt hoch frequenter elektrischer Reizung, die im Experiment eine erhöhte Aktivität der Nervenzellen simuliert, ihre Gestalt verändern und dabei dornenartige Strukturen (*spines*) bilden. Die Wissenschaftler nehmen an, dass

diese Dornen am Aufbau weiterer Synapsen zu den benachbarten Nervenzellen beteiligt sind. Bei hoher Reizfrequenz wird die „Datenautobahn“ zwischen Nervenzellen ausgebaut: Auf der Senderseite werden vermehrt Botenstoffe ausgeschüttet, auf der Empfängerseite verstärkt die entsprechenden Rezeptoren – also Empfangsantennen – eingebaut.

Ein solcher Transferweg kann über mehrere Stunden, Tage oder Wochen bestehen. In der Fachsprache heißt das „Langzeitpotenzierung“. Sie gilt als eine der Voraussetzungen für

die Speicherung von Information im Zentralen Nervensystem. In ihren jüngsten Untersuchungen an Nervenzellen aus dem Hippocampus – einer Hirnregion, die bei Gedächtnisvorgängen eine maßgebliche Rolle spielt – konnten Valentin Nägerl, Nicola Eberhorn, Sidney Cambridge und Tobias Bonhoeffer nun auch die Rückbildung der Dornen bei Stimulation mit niedriger Reizfrequenz beobachten. Diese „Langzeitdepression“ führt gleichsam zu einer Verengung der Datenautobahn. Das Ergebnis einer zweiten Studie aus der Arbeitsgruppe Bonhoeffer: Synapsen, die durch Reizung verstärkt werden, treten miteinander in einen Wettstreit um intrazelluläre Botenstoffe. Das Team aus Martinsried hat zusammen mit seinem schottischen Kollegen Richard Morris vom Centre for Neuroscience der Universität Edinburgh gezeigt, dass die Konkurrenz um diese Botenstof-



Werden Nervenzellen (grün) intensiv stimuliert, bilden sich an bestimmten Stellen (offene rote Pfeile, links oben) dornenartige Ausstülpungen (rote Pfeile, rechts oben). Die blauen Pfeile im Bild links unten zeigen auf Dornen vor der Stimulation mit niedriger Reizfrequenz; danach sind die Dornen verschwunden (offene blaue Pfeile, rechts unten).

Weitere Informationen erhalten Sie von:  
 PROF. DR. TOBIAS BONHOEFFER  
 Max-Planck-Institut für Neurobiologie, Martinsried  
 Tel.: +49 89 8578-3751  
 Fax: +49 89 89950-050  
 E-Mail: marget@neuro.mpg.de

● Weitere Informationen erhalten Sie von:  
 DR. HORST UWE KELLER  
 Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung,  
 Katlenburg-Lindau  
 Tel.: 05556 979-419  
 Fax: 05556 979-141  
 E-Mail: keller@linmpi.mpg.de

BIOCHEMIE

## Böden heizen dem Klima ein

Wie der Erdboden weltweit auf eine weitere Klimaerwärmung reagieren würde, hat ein internationales Wissenschaftlerteam gezeigt. Die Ergebnisse lassen eine noch schnellere Erwärmung des globalen Klimas erwarten als bisher angenommen. Denn Mikroorganismen würden organisches Material in den Böden schneller zersetzen, dadurch zusätzliches Kohlendioxid abgeben und den Klimawandel beschleunigen. Im Team waren Forscher des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie in Jena, der Universität Bristol (England) und des Nationalen Zentrums für Atmosphärenforschung in Boulder, USA (NATURE, 20. Januar 2005).

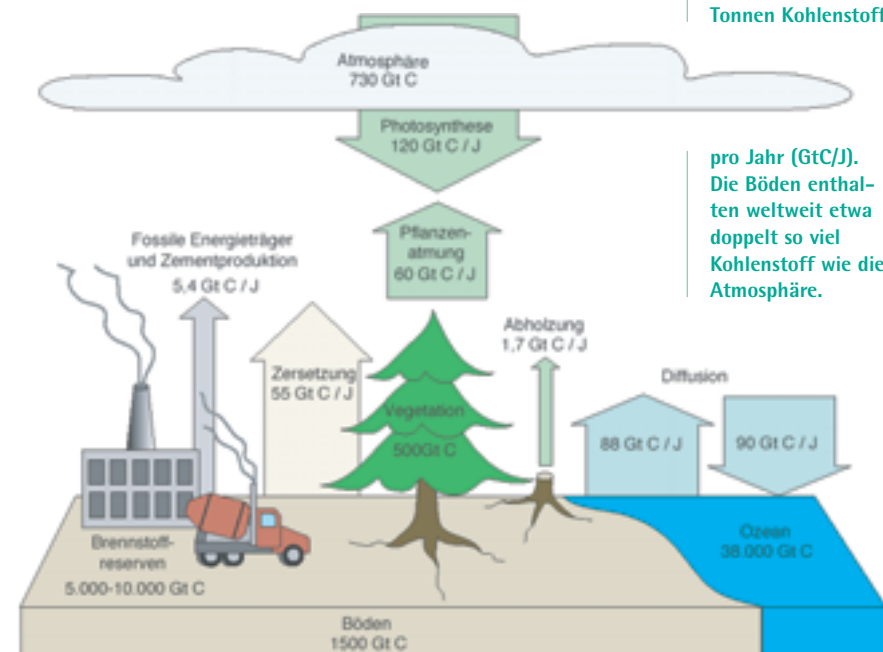
Bisher gingen einige Wissenschaftler davon aus, dass sich die für die Kohlenstoffzersetzung im Boden verantwortlichen Mikroorganismen an höhere Temperaturen anpassen. Dabei sollten sich ihre Abbauraten nicht erhöhen, sondern ungefähr konstant bleiben. Solche Annahmen widersprechen jedoch einfachen Gesetzen der physikalischen Chemie, nach denen zusätzliche Wärme die Abbaurate chemischer Prozesse beschleunigt.

Eine neue Interpretation von Untersuchungen an Bodenproben durch das Team um Wolfgang Knorr vom Max-Planck-Institut für Biogeochemie deutet nun darauf hin, dass im Boden bei wärmeren Temperaturen auch tatsächlich mehr Kohlenstoff zersetzt wird. „Die Mikroorganismen scheinen sich eben nicht an die wärmeren Bedingungen auf der Erde zu gewöhnen. Ihre Abbaurate von Kohlenstoff erhöht sich dabei wie erwartet bei höheren Temperaturen. Sie produzieren mehr klimarelevantes Kohlendioxid“, sagt Claudia Hillinger,

Forschungskordinatorin am Institut. „Wir fanden heraus, dass sich der erhöhte Kohlenstoffabbau bei Erwärmung auf alle chemischen Anteile des organischen Bodenkohlenstoffs auswirkt“, ergänzt Wolfgang Knorr. „Diese Anteile reichen von stärkehaltigen labilen Verbindungen bis zu stabilen Komplexen, die für Mikroorganismen schwerer abbaubar sind.“

in der chemisch stabilen Variante vorliegen.

Weltweit befindet sich so viel Kohlenstoff in den Böden, dass sich bei einer plötzlichen Freisetzung der Gehalt an Kohlendioxid in der Atmosphäre verdrei- oder sogar vervierfachen würde. Auch wenn ein solch abruptes Szenario extrem unwahrscheinlich ist, würde schon eine sich allmählich beschleunigende Zersetzung in Folge der globalen Klimaerwärmung zusätzliche Mengen an Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen und das Klima weiter aufheizen.



Die extreme Mischung ganz unterschiedlich stabiler Verbindungen hatte bisher die Interpretation der Laborergebnisse erschwert.

Der nächste Schritt besteht nun darin, die neuen Erkenntnisse in komplexe globale Klimamodelle einzubringen und die Auswirkungen eines beschleunigten Abbaus des Bodenkohlenstoffs auf die Klimaerwärmung neu zu berechnen. Denn bisher berücksichtigen die Klimasimulationen nur die leichter messbaren Eigenschaften der labilen Bestandteile des Bodenkohlenstoffs. Doch die Forscher schätzen, dass etwa 90 Prozent des global in den Böden enthaltenen Kohlenstoffs

nigende Zersetzung in Folge der globalen Klimaerwärmung zusätzliche Mengen an Kohlendioxid in die Atmosphäre entlassen und das Klima weiter aufheizen.

Die Ergebnisse der Forschergruppe sagen nun vorher, dass diese stabilen Anteile des Kohlenstoffs noch sensibler auf die Klimaerwärmung reagieren als die bisher betrachteten etwa zehn Prozent der labilen Verbindungen.

Das Resultat: Bei einer globalen Erwärmung gelangt mehr zusätzliches Kohlendioxid in die Atmosphäre als bisher angenommen – und die Klimaerwärmung beschleunigt sich weiter.

Der globale Kohlenstoffkreislauf: Die Zahlen stehen für Reservoirgrößen in Milliarden Tonnen Kohlenstoff (GtC) und für Transferarten in Milliarden Tonnen Kohlenstoff

pro Jahr (GtC/J). Die Böden enthalten weltweit etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre.

④ Weitere Informationen erhalten Sie von: DR. CLAUDIA HILLINGER Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena Tel.: +49 3641 57-6800 Fax: +49 3641 57-7860 E-Mail: claudia.hillinger@bgc-jena.mpg.de

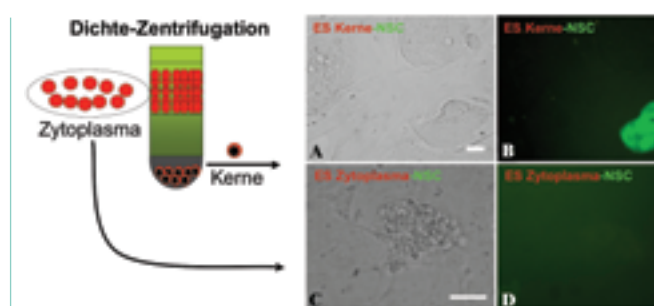
FOTO: LAMONT-DOHERTY EARTH OBSERVATORY/KEVIN L. GRIFFIN

BIOMEDIZIN

## Die Schlüssel stecken im Kern

Die Forschung an Stammzellen hat nahezu weltweit eine kontroverse Debatte ausgelöst und zu nicht unerheblichen Regulierungen in der Wissenschaft geführt. Die ethisch umstrittene Erzeugung eines Embryos zur Gewinnung embryonaler Stammzellen ließe sich umgehen, wenn es gelänge, ausgereifte (adulte) Zellen in pluripotente Stammzellen umzuprogrammieren. Dazu muss man allerdings die beteiligten Faktoren genauer kennen. Forscher des Max-Planck-Instituts für molekulare Biomedizin in Münster haben zumindest gezeigt, dass diese Faktoren im Kern embryonaler Stammzellen wirken (STEM CELLS, November 2004).

Pluripotente Stammzellen besitzen die Fähigkeit, sich in jeden nur erdenklichen Zelltyp – ob Muskelzelle, Nervenzelle oder Blutzelle – zu differenzieren, und lassen sich beliebig vermehren. Darin liegt ihr großes medizinisches Potenzial. Viele Forscher hoffen, dass es in Zukunft gelingen könnte, beschädigte Gewebe und Organe mithilfe von Stammzellen funktionell wiederherzustellen. Derzeit ist man davon allerdings noch weit entfernt. Die Wissenschaftler müssen zunächst einmal herausfinden, was sich



tatsächlich im Verlauf einer solchen Umprogrammierung abspielt. Bis jetzt kennt man die Faktoren nicht, die bei diesem Prozess eine Rolle spielen.

Offensichtlich sind die magischen Schlüsselsubstanzen aber nicht im Zytosol embryonaler Stammzellen enthalten. Das zumindest legen Ergebnisse der Arbeitsgruppe um Hans Schöler nahe, Direktor am Max-Planck-Institut für Biomedizin in Münster. Die Wissenschaftler beobachteten zunächst, dass embryonale Stammzellen in Kultur mit ausgereiften Zellen fusionieren. Diese schalteten dann umgehend jene Gene an, die der Schlüssel zum Differenzierungspotenzial embryonaler Stammzellen sind.

Als unverzichtbar erschien dabei der Transkriptionsfaktor Oct4, der in den Experimenten als Marker diente: Um seine Aktivierung in der Zelle nachweisen zu können, erzeugten die Forscher ein Oct4-GFP-

Transgen; das entsprechende Protein fluoresziert dann in der Zelle grün. Um die Quelle der Umprogrammierung herauszufinden, fusionierten die Wissenschaftler neuronale Zellen der Maus zum einen mit dem Zytosol embryonaler Stammzellen.

Das Zytosol schien keinerlei Effekt zu haben, wohingegen die neuronalen Zellen, die mit Zellkernen fusioniert worden waren, das Pluripotenzgen Oct4 anschalteten – erkennbar an der grünen Fluoreszenz – und stammzellähnliche Kolonien formten. Auch konnten die Max-Planck-Forscher nachweisen, dass die Umprogrammierung unabhängig von der Verdopplung der DNA und der Zellteilung ist.

„Unsere Experimente haben erwartungsgemäß gezeigt, dass Merkmale pluripotenter Zellen auf Körperzellen durch die Fusion mit intakten embryonalen Stammzellen übertragen werden können, und sie haben uns auf die Spur der Faktoren geführt, die sich im Kern – oder zumindest daran anhaftend – befinden“, sagt Hans Schöler über seine Ergebnisse.

### DAS STAMMZELLENGESETZ

Die Forschung an embryonalen Stammzellen in Deutschland ist reglementiert durch das „Gesetz zur Sicherstellung des Embryonenschutzes im Zusammenhang mit Einfuhr und Verwendung menschlicher embryonaler Stammzellen“. Die Bestimmung wurde am 25. April 2002 vom Bundestag beschlossen. Sie verbietet die Gewinnung embryonaler Stammzellen in der Bundesrepublik, erlaubt aber die Einfuhr unter bestimmten Bedingungen: Die Zelllinien müssen schon vor dem 1. Januar 2002 bestanden haben (Stichtagsregelung); sie dürfen nur Forschungszwecken dienen, die hochrangig und auf anderem Wege voraussichtlich nicht zu erreichen sind; die Ei- und Samenspenden dürfen für das Überlassen der Keimbläschen in keiner Weise einen geldwerten Vorteil erlangt haben; und schließlich muss jede Einfuhr vom Robert-Koch-Institut genehmigt werden.

④ Weitere Informationen erhalten Sie von: PROF. HANS R. SCHÖLER Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin, Münster Tel.: +49 251 980-2866 Fax: +49 251 980-2992 E-Mail: schoeler@mpi-muenster.mpg.de

Nur die Fusion von Kernen embryonaler Stammzellen (A) mit Nervenzellen führt zu einer Aktivierung des Pluripotenz-Gens Oct4 und liefert damit ein grün-fluoreszierendes Signal (B). Das Zytosol (C) löst dagegen keine Reprogrammierung und somit auch keine Fluoreszenz aus (D).

BILD: MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MOLEKULARE BIOMEDIZIN

KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG

# Knochen auf den Zahn geföhlt

Zähne, Knochen, Sehnen, Bänder und Knorpel bestehen sämtlich aus dem gleichen biologischen Grundbaustoff: aus Kollagen. Die fadenartigen Moleküle dieses Proteins sind für sich allein weich und elastisch, können aber mineralische Partikel einlagern und sich so zu ungemein festen, knochenharten Gefügen verbinden. Die mechanischen Eigenschaften von Knochen beruhen wesentlich auch auf einer besonderen, hierarchisch gegliederten Struktur. Diese funktionelle Architektur ergründen Wissenschaftler des Potsdamer Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung mit Partnern in Wien, Triest und Grenoble. Dabei ziehen sie unter anderem mineralisierte Beinsehnen von Truthähnen in die Länge – und leuchten mittels Synchrotron-Strahlung den Feinbau dieser „eindimensionalen Modellknochen“ aus. (PHYSICAL REVIEW LETTERS, 8. Oktober und 26. November 2004)

An Knochen, kann man sagen, haben Materialforscher viel zu kauen. Zwar ist schon seit über einem Jahrhundert bekannt, dass Knochen in ihrer Struktur jeweils optimal an örtlich verschiedene mechanische Belastungen angepasst sind. Doch wie die Natur – mit nur zwei Grundmaterialien – zu derart anpassungsfähigen Konstruk-

tionen gelangt, ist bislang erst in Ansätzen aufgeklärt.

Hier tiefer vorzustoßen, und das mit allen Mitteln moderner Strukturforschung, ist Ziel der Abteilung Biomaterialien am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam. Ihr Leiter Peter Fratzl und seine Mitarbeiter kooperieren dabei eng mit Medizinern am Ludwig-Boltzmann-Institut für Osteologie in Wien, mit Materialforschern am Synchrotron ELETTRA in Triest sowie an der Universität Grenoble.

Der Stoff, um den es in Sachen Knochen geht, ist fachlich gesprochen ein Nanokomposit: ein Verbundmaterial aus zwei molekularen Komponenten. Die eine Komponente, Kollagen, besteht aus drei schraubenförmig umeinander gewundenen Eiweißketten, die einen Faden von 300 Nanometern (millionstel Millimeter) Länge und 1,5 Nanometern Dicke bilden. Diese weichen und dehnbaren Molekülfäden lagern sich parallel zu Fibrillen aneinander – und zwischen diese Fibrillen wird als zweite Komponente mineralisches Kalziumphosphat in Gestalt winziger, etwa 2 bis 4 Nanometer dicker kristalliner Plättchen eingebunden. Je nach dem Grad dieser Mineralisation wird dadurch das flexible Grundgerüst aus Kollagen mechanisch verstärkt und zudem gehärtet.

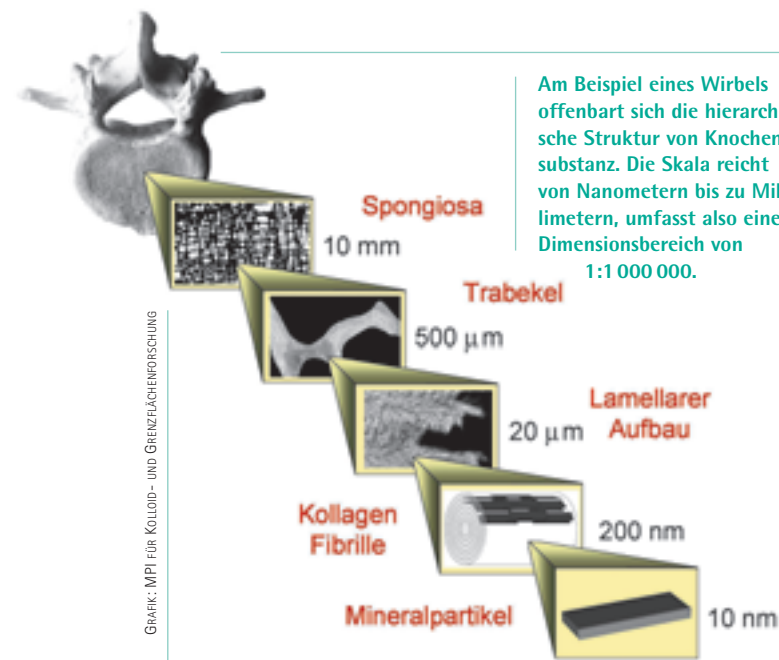
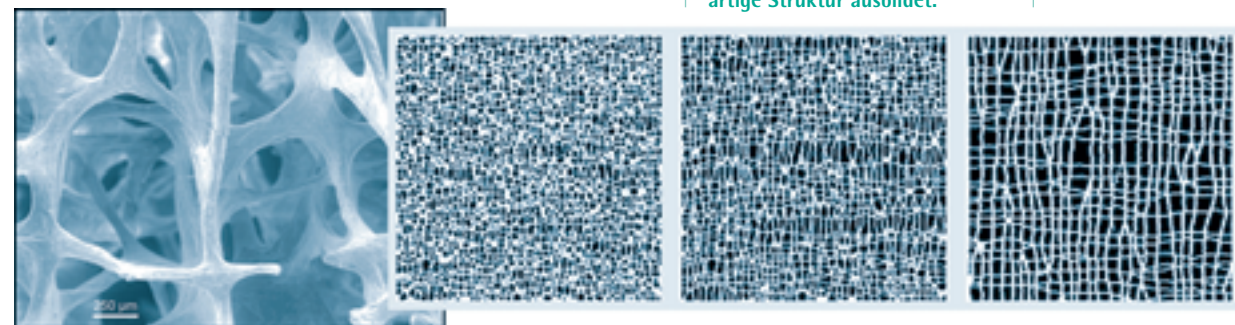
Die mineralisierten Kollagen-Fibrillen lagern sich weiter parallel zu stärkeren Bündeln

oder Schichten zusammen, zu so genannten Lamellen, deren typische Abmessungen bei einigen zehn Mikrometern liegen. Und diese Lamellen wiederum fügen sich zu Trabekeln: zu Bälkchen und Streben, einige zehntel Millimeter dick, die schließlich ein schaumartiges, dreidimensionales Stütz- und Tragegerüst (die Spongiosa) im Innern von Knochen aufbauen.

Der Sinn und Zweck dieser hierarchischen Struktur liegt darin, die Kräfte, die auf Knochen einwirken, möglichst stetig – ohne lokale Überlastungen – von größeren auf immer feinere Strukturen zu verteilen. Am Ende müssen dann die mineralisierten Kollagenfasern erhalten: Sie nehmen die Kräfte als Zugspannungen auf und federn sie durch elastische Dehnung ab.

Wie sie solche Kraftakte meistern, konnten die Potsdamer Forscher vor kurzem im Detail verfolgen. Dabei dienten die großen Beinsehnen von Truthähnen als „eindimensionale“ Modellknochen. Denn die Kollagenfasern dieser Sehnen sind zum Teil stark mineralisiert und gleichen so denen in Knochen. Zugleich sind sie gemäß der Zugrichtung der Sehne streng parallel und quasi eindimensional ausgerichtet – in na-

Das Elektronenmikroskop enthüllt die poröse Spongiosa eines Knochens (links). Die drei Bilder rechts zeigen, wie ein simulierter Knochen im Computer unter Belastung die gleiche schwammartige Struktur ausbildet.



GRAFIK: MPI FÜR KOLLOID- UND GRENZFLÄCHENFORSCHUNG

hezu kristallinem und somit für Röntgenbeugungsanalysen geeignetem Regellaß.

Und das nutzten Fratzl und seine Mitarbeiter: Am Synchrotron ELETTRA in Triest unterwarfen sie Truthahnsehnen der sehr kurzwelligen Strahlung dieser „Röntgenlampe“ und konnten so verfolgen, wie sich die Kollagenfasern unter wachsender Dehnung verhalten.

Diese Messungen zeigen, dass die Truthahnsehnen aus Bündeln jeweils unterschiedlich stark mineralisierter Kollagenfasern bestehen – also zum einen aus sehr weichen und entsprechend dehnbaren Fasern, zum anderen aus hoch mineralisierten und deshalb wenig elastischen Fasern. Letztere sorgen bei geringen Dehnungen der Sehne für deren Festigkeit, reißen aber bei sehr starker Dehnung und kontrahieren in einen unbelasteten Zustand: Dann geht die gesamte Last auf die weicheren, sehr dehnbaren Fasern über – die damit den strukturellen Zusammenhalt der Sehne gewährleisten und deren vollständigen Riss verhindern. Eine derart überdehnte Sehne erweist sich mangels der Mitwirkung der hoch mineralisierten Fasern unter neuerlicher Belastung schon bei geringer Dehnung als weich und elastisch.

Wie Knochen als biologisches Material in seine Funktion hineinwächst, wie seine optimale Struktur dann ein Leben lang erhalten bleibt und auch jeweils wechselnden Erfordernissen angepasst wird, gehört zu den weiteren Themen der Potsdamer Wissenschaftler. Dabei geht es um Auf- und Abbauprozesse innerhalb von Knochen, die gezielt und deshalb kontrolliert erfolgen müssen. So gilt als sicher, dass spezielle Zellen innerhalb des Knochens als mechanische Sensoren fungieren und einen Regelkreis anstoßen, der den Abbau alter oder schadhafter Knochensubstanz und deren Ersatz durch neues Material steuert.

Basierend auf dieser Vorstellung wurde ein Computermodell entwickelt, das den Knochenbau in einem simulierten menschlichen Wirbelknochen unter vertikaler Belastung durchspielt. Dieses Modell lieferte, selbst wenn es von der unrealistischen Annahme eines vollständig dichten Wirbelknochens startete, am Ende stets die natürliche Struktur: eine schaumartige Spongiosa, umhüllt von einer vergleichsweise dünnen Schale aus dichtem Knochen. Interessanterweise lieferten sämtliche dieser Simulationen mit der Zeit einen

konstanten Wert für die Knochenmasse – während der Umbau innerhalb der Spongiosa zu immer größeren Strukturen führte, das heißt zu weniger, dafür aber dickeren Trabekeln: Genau das geschieht auch im Zug der physiologischen Alterung von Knochen.

Wurde jedoch im Computermodell zugleich die Empfindlichkeit jener Knochenzellen vermindert, die als Sensoren arbeiten, kam zu der größeren Spongiosa noch ein Schwund an Knochenmasse: ein Bild, kennzeichnend für die Osteoporose, eine der häufigsten degenerativen Erkrankungen des Knochens. Demnach ist dieses Leiden nicht einfach altersbedingt, sondern auf eine Störung innerhalb des Regelkreises zurückzuführen, dem der Auf- und Abbau von Knochensubstanz unterliegt. Aus diesem Befund könnten sich neue Ansätze zur Therapie der Osteoporose ergeben.

Doch auch anderen Krankheiten, die mit einer verminderten Quantität oder Qualität der Knochensubstanz einhergehen, hoffen die Potsdamer Forscher mit ihrem breiten materialtechnischen Instrumentarium beizukommen. Es gilt dabei zunächst herauszufinden, auf welcher Ebene innerhalb der strukturellen Hierarchie des Knochens der betreffende Defekt vorliegt, um davon weiter zu den genauen Ursachen und schließlich zu einer gezielten Therapie zu gelangen.

Und sogar dort, wo das nicht gelingt, wird das Know-how der Materialforscher hilfreich werden. Denn je feiner sie Architektur und Mechanik von Knochensubstanz auf jeder ihrer Ebenen durchschauen, um so naturgetreuer kann man diesen natürlichen Stoff auch technisch nachbilden – und so zu biomimetischen Materialien gelangen, die als Implantate dem gewachsenen Knochen in möglichst vielen seiner Eigenschaften gleichkommen und ihn somit ersetzen können. ●



② Weitere Informationen erhalten Sie von: PROF. DR. PETER FRATZL Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, Potsdam Tel.: +49 331 567-9401 Fax: +49 331 567-9402 E-Mail: fratzl@mpikg.mpg.de

GRAVITATIONSPHYSIK

## Galileo in der Quantenwelt

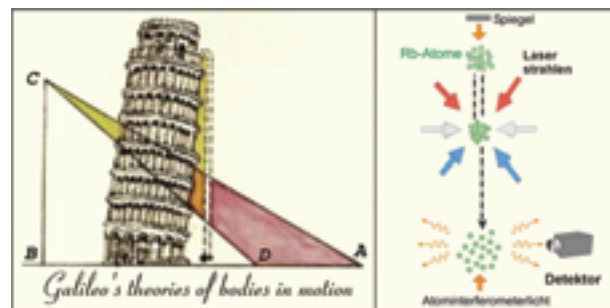
Gelten für Teilchen im atomaren Maßstab dieselben Fallgesetze wie für handfeste Gegenstände unter Einwirkung der Schwerkraft? Dieser Frage sind Physiker vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und vom Physikalischen Institut der Universität Tübingen nachgegangen. In einem Experiment mit einer Art atomarem Springbrunnen wiederholten sie die Fallversuche Galileo Galileis und bestätigten, dass sich Rubidiumatome tatsächlich so verhalten wie größere mechanische Körper (PHYSICAL REVIEW LETTERS, 10. Dezember 2004).

Vor etwa 400 Jahren hat Galileo Galilei festgestellt, dass Gegenstände aus Blei, Holz oder Gold alle gleich schnell zu Boden fallen. Die Bewegung eines Körpers unter Einwirkung der Schwerkraft ist also unabhängig von seiner Masse oder seiner Zusammensetzung. Daraus hat Albert Einstein den in der Physik als Äquivalenzprinzip bekannten Grundsatz formuliert. Er besagt, dass Gravitationskräfte äquivalent zu Trägheitskräften sind. Einstein verwendete dieses Prinzip als wichtigen Ausgangspunkt für seine Überlegungen zur Gravitationstheorie.

Um das Äquivalenzprinzip einer möglichst genauen Überprüfung zu unterziehen, muss man einen großen experimentellen Aufwand treiben. Die Ergebnisse könnten aber wertvolle Antworten auf eine der ungelösten Fragen liefern, wie sich die beiden grundlegenden Theorien der Physik – die Quanten- und die Gravitationstheorie – in einheitlicher Weise beschreiben lassen.

Ob die Gesetze des freien Falls, wie sie Galileo Galilei entdeckt hat, auch für Quantenobjekte auf atomarer Ebene zutreffen, haben die Physiker Martin Weitz, Sebastian Fray und Theodor Hänsch jetzt in einer modernen Variante des Galileischen Versuchs mit einem Atominterferometer überprüft. Dazu nahmen die Wissenschaftler die Falleigenschaften zweier unterschiedlich schwerer Rubidiumatome unter die Lupe: In einer magneto-optischen Falle fingen sie etwa eine Milliarde Rubidiumatome und beschleunigten sie mittels Lichtkräften in vertikaler Richtung, entgegen der Schwerkraft, auf eine freie, nach oben gerichtete Flugbahn – ähnlich wie die Wasserstrahlen eines Springbrunnens: Nachdem die Atome ihren höchsten Punkt erreicht hatten, fielen sie aufgrund der Schwerkraft wieder nach unten. Für die Bestimmung der zurückgelegten Strecke nutzten die Physiker die quantenmechanische Wellennatur der Atome aus.

Mit Lichtpulsen spalteten die Wissenschaftler die Atomwellen in verschiedene Teilstrahlen auf und fügten sie bald darauf wieder zusammen. Durch die Welleneigenschaften der untersuchten Rubidiumatome ent-



Selbes Prinzip, unterschiedliche Technik: Während Galileo Galilei zwei unterschiedlich schwere Bleikugeln vom Schiefen Turm von Pisa fallen ließ, hantieren Forscher heute mit einem atomarem Springbrunnen. In einer Vakuumkammer kühlen und fangen sie Rubidiumatome und beschleunigen sie dann nach oben. Während des folgenden freien Falls wird die zurückgelegte Strecke mit der Methode der Atominterferometrie genau vermessen.

Foto: MPI für Quantenoptik/NASA

stand hierbei ein Interferenzmuster. Das Team beobachtete das Auslöschchen und Verstärken solcher Wellen der frei fallenden Atome. Auf diese Weise ließ sich die Erdbeschleunigung anhand des Wechsels von „hellen“ und „dunklen“ Perioden, die durch die Ansammlung der Atome auf ihrer Flugbahn entstanden, bestimmen. Der Abstand zwischen einem hellen und einem dunklen Bereich einer zurückgelegten Entfernung entspricht etwa einem halben millionstel Meter. Mit einem Atominterferometer haben die Forscher damit ein sehr genaues Lineal zur Vermessung der atomaren Bewegung zur Hand.

Die Physiker verglichen nun die Flugbahn der beiden unterschiedlich schweren Rubidiumisotope  $^{85}\text{Rb}$  und  $^{87}\text{Rb}$  und stellten fest, dass deren Beschleunigung wegen der Erdanziehung innerhalb einer relativen Genauigkeit von  $1,7 \times 10^{-7}$  übereinstimmt. Durch dieses Experiment konnten die Forscher das Äquivalenzprinzip also auch auf atomarer Ebene bestätigen. Sie erwarten, dass zukünftige technische Verbesserungen eine noch genauere Überprüfung des Äquivalenzprinzips für quantenmechanische Probeteilchen erlauben werden.

**@ Weitere Informationen erhalten Sie von:**  
**DR. SEBASTIAN FRAY**  
 Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching  
 Tel.: +49 89 2180-2046  
 Fax: +49 89 285192  
 E-Mail: S.Fray@mpq.mpg.de

**PROF. THEODOR W. HÄNSCH**  
 Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching  
 Tel.: +49 89 32905-712  
 Fax: +49 89 32905-200  
 E-Mail: t.w.haensch@mpq.mpg.de

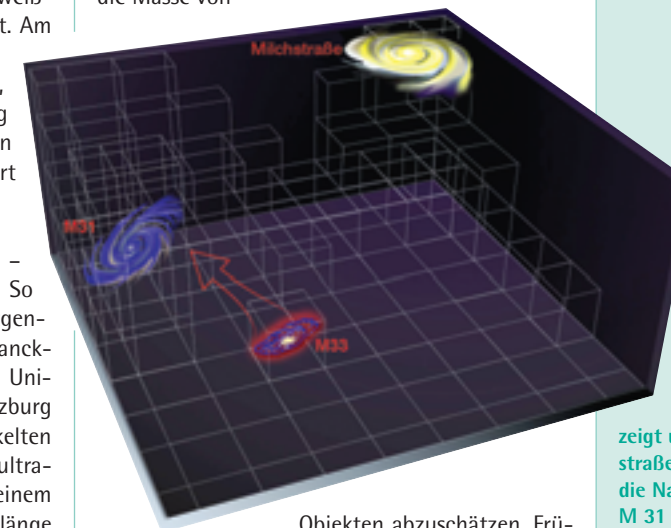
# Panorama

Molekularen Müll loszuwerden ist für Zellen lebenswichtig: Ihr Stoffwechsel würde ansonsten durch ausgediente oder unbrauchbare Proteine behindert und über kurz oder lang lahm gelegt. Dementsprechend verfügen Zellen über einen besonderen Mechanismus, über den diese Entsorgung schrittweise und kontrolliert abläuft. Dabei spielt ein kleines Eiweiß, Ubiquitin, eine wichtige Rolle als „molekularer Laufzettel“ für überflüssige Proteine: Ein mit Ubiquitin markiertes und damit als Müll gekennzeichnetes Protein wird innerhalb der Zelle zunächst isoliert, dingfest gemacht, und dann weiter zum Proteasom befördert – einer Art Schredder, der Eiweißmoleküle in ihre einzelnen Bausteine zerlegt. Am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried haben Forscher jetzt aufgedeckt, dass und wie Proteine auf ihrem letzten Weg von einem speziellen Transportprotein geführt und gezielt zum Proteasom eskortiert werden.

Ein Millionstel einer milliardstel Sekunde – und davon noch einmal den zehnten Teil: So lang dauern die Pulse laserähnlichen Röntgenlichts, die Physiker des Garchinger Max-Planck-Instituts für Quantenoptik, der Technischen Universität Wien sowie der Universitäten Würzburg und München mittels eines neu entwickelten Geräts erzeugen. Dazu kommt, dass diese ultrakurzen Pulse aus Röntgenlicht mit nur einem Nanometer (millionstel Millimeter) Wellenlänge bestehen und damit etwa um einen Faktor 10 unter dem liegen, was sich aus technisch ähnlichen Strahlungsquellen bislang herausholen ließ. Es geht jetzt darum, die noch schwache Leistung des Röntgenblitzgeräts zu steigern: Dann lässt sich damit in Nanostrukturen hineinleuchten und lassen sich etwa Biomoleküle in ihrem Umfeld in höchster Auflösung erfassen. Zugleich wird im Vergleich zu herkömmlichen Röntgenquellen auch die Strahlendosis während der Bildgewinnung erheblich reduziert – und das macht das neue Gerät auch für medizinisch-diagnostische Anwendungen interessant.

Mit 190 Kilometern pro Sekunde bewegt sich die Spiralgalaxie M 33 – die zur so genannten Lokalen Gruppe gehört – um unsere Milchstraße und in Richtung des Andromedanebels: Die erste direkte Messung dieser Geschwindigkeit gelang einem Team der International Max Planck Research School for Radio and Infrared Astronomy in Bonn. Um diesen Wert zu bestimmen, wurden mehrere Radioteleskope im Abstand von tausenden Kilometern zu einem einzigen Riesenteleskop zusammengeschaltet und über drei Jahre hinweg die Strahlung von Wasserdampf-Regionen innerhalb von M 33 aufzufangen. Damit ließ sich die Bewegung der Galaxie mit einer Genauigkeit von

5 Mikrobogensekunden pro Jahr ermitteln – entsprechend einer Verschiebung von 0,01 Millimeter pro Jahr, gemessen aus 500 Kilometern Abstand. Zugleich mit dem Tanz konnte erstmals auch die genaue Entfernung von M 33 auf rein geometrischem Weg bestimmt werden: Sie beträgt 2,4 Millionen Lichtjahre. Diese Daten bedeuten für die Astronomen im wahrsten Sinn des Wortes neue Maßstäbe – als Eichgrößen für die weitere exakte Vermessung unserer kosmischen Nachbarschaft. Und die Forschungsergebnisse versprechen noch einen zusätzlichen Gewinn, denn exakte Entfernungen und Bewegungen lassen sich nutzen, um die Masse von



Dreigestirn in drei Dimensionen: Die Abbildung zeigt unser Milchstraßensystem sowie die Nachbargalaxien M 31 (Andromedanebel) und M 33, letztere mit dem gemessenen Geschwindigkeitsvektor (Pfeil).

Objekten abzuschätzen. Frühere Beobachtungen haben gezeigt, dass der größte Teil des Weltalls in der mysteriösen Dunklen Materie steckt. Nun wollen die Wissenschaftler mit detaillierten Beobachtungen von Galaxienbewegungen unsere Milchstraße und ihre Nachbargalaxien genau wiegen und dabei herausfinden, wie viel dieser Dunklen Materie es im lokalen Universum tatsächlich gibt.

Drei Muskelstränge bilden das Zellskelett von *Spiroplasma melliferum*, eines Vertreters der Mykobakterien, die zu den kleinsten bekannten Lebewesen zählen. Mittels Kryoelektronentomografie haben Forscher des Martinsrieder Max-Planck-Instituts für Biochemie sowie des EMBL in Heidelberg jetzt Einblick in das Innenleben dieses Winzlings gewonnen und dessen Zellskelett enthüllt: Es besteht aus zwei Eiweißsträngen – gebildet aus je fünf dicken molekularen Fäden –, zwischen denen ein drittes Band aus neun dünnen Filamenten liegt. Diese drei Stränge verlaufen parallel zueinander längs der Körperachse des stabförmigen Bakteriums – und arbeiten ähnlich wie Muskelfasern zusammen: Indem die zwei äußeren Bänder ihre Länge jeweils koordiniert gegenüber dem dritten, inneren Strang verändern, verwenden sie den Körper des Bakteriums – der sich dadurch schraubenartig vorwärts bewegt.

**www**  
 Mehr zu diesen Themen finden Sie unter [www.maxplanck.de](http://www.maxplanck.de)

Foto: Bill Saxton, NRAO/JAUI/NSF

### IHRE MEINUNG IST GEFRAGT

Nichts ist so gut, als dass man es nicht noch besser machen könnte. Das gilt natürlich auch für ein Wissenschaftsmagazin, das sich mit jeder Ausgabe der Öffentlichkeit aufs Neue stellt. Daher bitten wir Sie, liebe Leserinnen und Leser, uns Ihre Meinung zu sagen – über das Magazin, aber auch zu wissenschaftlichen Themen oder zur Forschungspolitik.

Ihre Zuschriften unter dem Stichwort „Leserbriefe“ erreichen uns

- ▶ via E-Mail: [mpf@gv.mpg.de](mailto:mpf@gv.mpg.de)
- ▶ per Fax: 089 2108-1405
- ▶ oder auf dem Postweg: MAXPLANCKFORSCHUNG, Hofgartenstraße 8, 80539 München