

■ Dichte Staubwolken sind bedeutende Sternentstehungsregionen. Viele junge Sterne findet man im Nebel M16. Der Staub wird durch die Sternentstehung aufgebraucht.



# Kosmischer Staub im Nano-Labor

## Ein Blick in die Kinderstube des Sonnensystems

von Frank Brenker, Christian Vollmer und Sylvia Schmitz

Staubwolken sind im Universum die Geburtsstätten neuer Sterne. Dort wiederholen sich Prozesse, die vor 4,56 Milliarden Jahren auch zur Entstehung unseres Sonnensystems geführt haben. Noch heute gibt es Zeugen aus dieser Zeit: Kometenstaub, Sternenstaub und interstellarer Staub. Die »Stardust-Mission« hat sie eingefangen, und Frankfurter Geowissenschaftler haben darin – dank modernster Labor-Analytik – erstaunliche Funde gemacht.

Staub ist nicht nur auf der Erde allgegenwärtig, auch im scheinbar weitgehend leeren Weltall bildet er eine der wichtigsten Komponenten überhaupt. Er ist so häufig, dass man ihn bei sehr guter Sicht auf den Sternenhimmel sogar mit bloßem Auge ausmachen kann. Schaut man ins Zentrum unserer Galaxie, also direkt in Richtung der Milchstraße, bemerkt man dunkle Bänder, die sich wie Schleier zwischen den unzähligen Sternen hindurchziehen. Diese Regionen bestehen aus einem Staub-Gas-Gemisch. Verdichten sich diese Bereiche zu Molekülwolken, werden sie zu den Geburtsstätten neuer Sterne. ■ Auch unser eigenes Sonnensystem ist vor circa 4,56 Milliarden Jahren durch diesen Prozess entstanden. Jahrzehntlang mussten sich Wissenschaftler damit begnügen, die Staub-Gas-Gemische mit

erheblichen Einschränkungen lediglich aus der Ferne zu studieren. Völlig neue und direkte Einblicke in die Bausteine unseres Sonnensystems und die Prozesse während seiner Entstehung eröffneten sich inzwischen durch drei Neuerungen: bahnbrechende technische Fortschritte in der Nano-Analytik, die Funde ursprünglicher (pristiner) Asteroidenbruchstücke auf der Erde und die »Stardust-Mission« der NASA, die Proben des Kometen Wild 2 ■ und des interstellaren Staubstroms einfing und zur Erde brachte.

### Kometenstaub von Wild 2

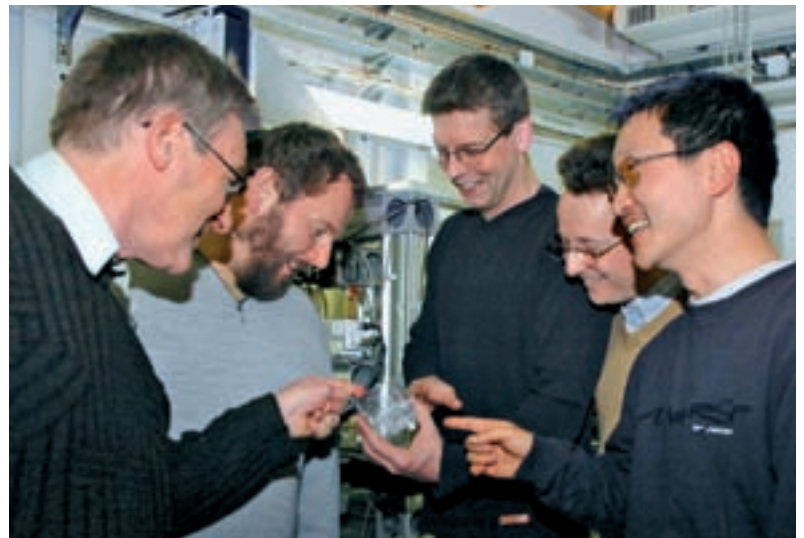
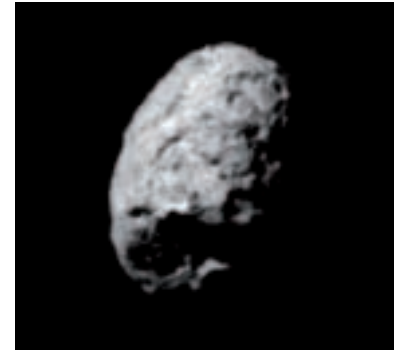
Mit der Stardust-Mission der NASA [siehe »Die Stardust-Mission«, Seite 26] wurde erstmals seit den Mondmissionen wieder Material von einem Himmelskörper

zur Erde gebracht. Eine internationale Arbeitsgruppe **3** unter Leitung von Frank Brenker erhielt den Zuschlag zur Teilnahme an den Untersuchungen dieses exklusiven Materials schon im Rahmen des Voruntersuchungsteams der NASA. Eine von der Arbeitsgruppe entscheidend weiterentwickelte Messtechnik an der European Synchrotron Radiation Facility – ESRF [siehe »Supermikroskop mit Röntgenstrahlen«, Seite 27] – gab den Ausschlag für die Aufnahme ins Team. Später sicherte die enorme Palette an Messverfahren mit hoher Ortsauflösung, die am Institut für Geowissenschaften der Goethe-Universität vorhanden sind, die Zusendung weiterer Kometenstaubproben. **4**

Obwohl die Datenbasis noch relativ klein ist und die Untersuchungen eigentlich gerade erst richtig begonnen haben, konnten wir schon einige bahnbrechende, zum Teil völlig unerwartete und der bisherigen Lehrmeinung konträre Erkenntnisse gewinnen. Bisher war man davon ausgegangen, Kometenstaub enthalte das ursprünglichste, auch während der Bildung unseres eigenen Sonnensystems weitgehend unverändert gebliebene Ausgangsmaterial, die Grundbausteine unseres Sonnensystems: Sie wurden während der Entstehung der Kometen in den kalten äußeren Bereichen des Sonnensystems eingefangen und darin in den letzten 4,56 Milliarden Jahren gewissermaßen auf Eis gelegt. So erwartete man einen hohen Anteil an echtem Sternstaub, der nicht nur einen ungestörten Blick in die Kinderstube unseres Sonnensystems, sondern auch in die Prozesse der Sternentstehung geben sollte. Denn Sterne lieferten den Staub für die Molekülwolken, aus denen letztendlich unser Sonnensystem entstand.

Überraschenderweise ergab aber die Rekonstruktion der chemischen Zusammensetzung des Kometen, an der die Frankfurter Arbeitsgruppe maßgeblich beteiligt war, Werte, die sehr genau der mittleren chemischen Zusammensetzung unseres gesamten Sonnensystems entsprechen. Abgesehen von leicht flüchtigen Elementen hat der Komet eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie die Sonne. Dies wurde bereits als ein erster Hinweis auf eine chemisch gute Durchmischung aller Komponenten in unserem Sonnensystem bis in die Bildungsbereiche des Kometen Wild 2 gewertet. In der Folge bestätigten Detailuntersuchungen diese Vermutung noch weiter. So wurden im Kometenstaub

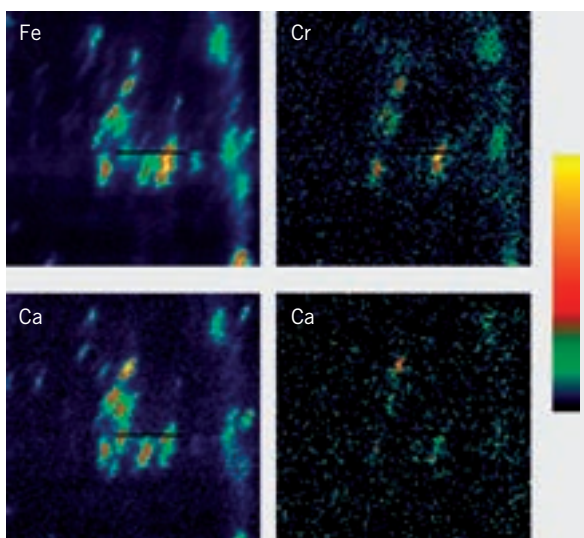
**2** Aufnahme vom Kern des Kometen Wild 2, aufgenommen von der Bordkamera der Raumsonde Stardust bei ihrem Flug durch das Koma des Kometen. Die unruhige Oberfläche des Kometenkerns entsteht größtenteils während der Entgasung in der Nähe der Sonne. Die Bildung einer solchen Vertiefung durch einen Gas-Jet wurde von der Sonde beobachtet. Im Gegensatz hierzu ist die Oberfläche von Asteroiden geprägt durch vielfältige Impaktkrater.



**3** Arbeitsgruppe an der European Synchrotron Radiation Facility: von links Christian Riekel, Manfred Burghammer (ESRF, Grenoble, Frankreich), Frank Brenker (Goethe-Universität, Frankfurt), Laszlo Vincze und Bart Vekemans (Ghent University, Belgien)

viele Hinweise darauf gefunden, dass die Komponenten bei hohen Temperaturen (zum Teil weit über 1000°C) entstanden wären. Den Höhepunkt stellte der Fund von sogenannten kalzium- und aluminiumreichen Einschlüssen dar. Diese Mineralgemenge kennt man bereits aus den Untersuchungen von Meteoriten, die überwiegend Bruchstücke von Asteroiden sind. Asteroiden bilden einen Gürtel aus Kilometer großen Objekten, welche die Sonne umkreisen. Die Kalzium- und Aluminium-reichen Einschlüsse entstehen durch Kondensation in der Nähe unserer Sonne bei Temperaturen weit über 1000°C. Sie stellen das älteste bekannte Material unseres Sonnensystems dar.

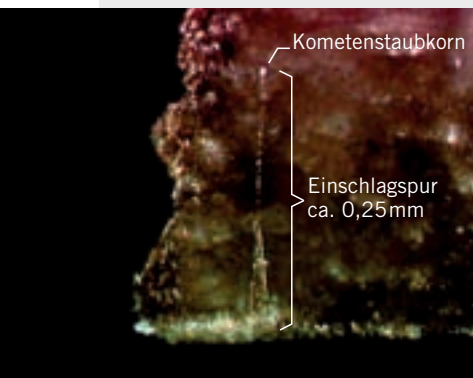
Was können wir daraus schließen, wenn Kometen, die am Rand des Sonnensystems entstanden sind, Komponenten enthalten, die sich etwa zeitgleich bei sehr hohen Temperaturen weiter im Zentrum des Sonnensystems bildeten? Erklären lässt sich das nur durch



**4** Elementverteilungsbilder der Konzentration einzelner chemischer Elemente. Das Bild zeigt den Ausschnitt aus einem Bereich entlang der Einschlagsspur (hohe Konzentrationen gelb, niedrige Konzentrationen dunkelblau). Die Elemente weisen deutlich unterschiedliche Verteilungsmuster auf, was auf eine Vielfalt verschiedener Mineralphasen schließen lässt. Die Konzentrationen können quantitativ erfasst werden und erlauben die Rekonstruktion der chemischen Zusammensetzung der eingefangenen Kometenpartikel und damit des Kometen selbst.



## Die Stardust-Mission



Die Stardust-Sonde führt eine tennisschlägerförmige Auffangvorrichtung mit sich, die die mit sehr hoher Geschwindigkeit (>20000 km/h) auftreffenden Kometenstaubpartikel auffängt. Das sanfte Abbremsen der Staubkörner erfolgt in einer eigens hierfür entwickelten Hightech-Substanz, dem sogenannten Aerogel, einem Si-Oxid-Glasschaum, der die einzelnen Felder ausfüllt.

Einschlagspur eines typischen Kometenkornes im Aerogel. Die Einschlagrichtung war vom unteren Bildrand. Am Ende der Spur bleibt ein sogenanntes Endkorn liegen, allerdings wird entlang der Spur bereits ein hoher Anteil (bis über 50 Volumen Prozent) des ursprünglichen Kometenstaubes abgerieben.

Direkt durch den Partikel-Schweif des Kometen Wild 2 flog die Sonde der Stardust-Mission. Es war die erste Mission der NASA nach dem Ende des Apolloprogramms zum Mond, die Material von einem anderen Himmelskörper sicher zur Erde brachte. Die Sonde sammelte nicht nur Proben des Kometenstaubs, sondern auch des interstellaren Materiestroms, der durch unser Sonnensystem zieht. Nach einem sieben Jahre dauernden Flug landete die Sonde mit ihrem kostbaren Inhalt am 16. Januar 2006 sicher in der Wüste von Utah. Eingefangen wurden die mit sehr hoher Geschwindigkeit durch das Weltall fliegenden Partikel in einem Aerogel. Das ist extrem poröser »Glasschaum« aus reinem Siliziumoxid, der zu 99,8 Prozent aus Luft besteht. Die Staubpartikel durchschlagen darin Tausende von Nanoglaswänden und werden so relativ schonend auf einer sehr kurzen Distanz (kleiner als ein Millimeter) abgebremst. Die Einfanggeschwindigkeit lag bei 6 Kilometern pro Sekunde (entsprechend 21 600 km/h) im Falle des Kometenstaubs und bei circa 14 Kilometern pro Sekunde (entsprechend 50 000 km/h) im Falle der interstellaren Partikel.

eine unerwartet hohe Dynamik: Es muss einen Materiefluss aus sonnennahen Bereichen bis in die äußeren kalten Zonen unseres Sonnensystems gegeben haben. In Modellen lassen sich diese Bedingungen bisher nur annähernd nachvollziehen, beispielsweise im X-Wind-Modell. Demnach hätten magnetische Winde in der Nähe der Sonne Material weit bis in die Außenbereiche des Sonnensystems transportieren können. Die immense Dynamik sorgte aber gleichzeitig dafür, dass die ursprünglichen Komponenten des Sonnensystems an jedem Ort in gleicher oder zumindest ähnlicher Weise zur Verfügung standen. Dieses Modell nährt Vermutungen zur Entstehung des Lebens, bedenkt man, dass damit die Grundbausteine hierfür an fast jeder Stelle vorhanden waren und zum Beispiel auf dem Mars recht ähnliche Startbedingungen vorlagen wie auf der Erde.

Auf der anderen Seite sind »echte« Sternenstaubkörner eher ein sehr seltener Fund im Kometenstaub. Während der Voruntersuchungen konnte lediglich ein einziges, winziges Sternenstaubkorn entdeckt werden. Möchte man also tatsächlich in Sternentstehungsprozesse schauen, muss man an anderer Stelle suchen. Ursprüngliches (pristines), das heißt seit seiner Bildung vor 4,56 Milliarden Jahren unverändertes Material wird in manchen Meteoriten gefunden.

### Sternenstaub

Neben der Rekonstruktion der Urbausteine unseres eigenen Sonnensystems im Rahmen der Stardust-Mission der NASA interessiert sich unsere Arbeitsgruppe vor allem für Körner, die noch älter sind als unsere Sonne. Diese sogenannten »präsolaren Körner« stellen echten Sternenstaub dar, der den Mischungs- und Aufheizungsprozessen während der gesamten über 4,5 Milliarden Jahre dauernden Geschichte unseres Sonnensystems wie durch ein Wunder entkam.

Der mit Abstand höchste Anteil präsolare Körner in einem Meteoriten wurde in dem Stein »Acer094« entdeckt. Bei der Untersuchung dieses exklusiven Materials kooperiert das Institut für Geowissenschaften der Goethe-Universität unter anderem mit dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz und dem Institut für Funktionswerkstoffe der Universität Saarbrücken.

Das extrem feine räumliche Auflösungsvermögen der verwendeten Techniken ist dabei ebenso entscheidend wie bei der Analyse von Kometenstaub, denn die Sternenstaubkörner in den kosmischen Proben sind zumeist kleiner als ein tausendstel Millimeter. Um die winzigen präsolaren Körner in den Meteoriten und Kometensplittern aufspüren zu können, benötigt man ein räumlich hochauflösendes Sekundärionen-Massenspektrometer, das »NanoSIMS«. Ein feiner Ionenstrahl aus Cäsium (mit einem Durchmesser von einem zehntel Mikrometer) rastert dabei die Probe ab und misst auf jedem analysierten Punkt die isotopische Zusammensetzung. Die Isotope eines Elements haben gleiche chemische Eigenschaften, aber unterschiedliche Massenzahlen (entsprechend der Anzahl der Neutronen im Atomkern). Die Häufigkeit, mit der die Isotope eines Elements in der Natur auftreten, gibt Auskunft über ihre Herkunft. Sternenstaub erkennt man anhand der isotopischen Anomalien in Elementen wie Sauerstoff und Kohlenstoff. Ihre Zusammensetzung unterscheidet sich grundlegend von derjenigen der anderen Materie unseres Sonnensystems. Das lässt sich nur durch Fusionsprozesse im Inneren von Sternen erklären.

Ist der Sternenstaub durch seine isotopischen Besonderheiten im Meteoriten lokalisiert, muss er für die Analyse im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) herausgeschnitten werden. Denn die Proben dürfen nicht wesentlich dicker sein als etwa 100 Nanometer, damit sie für Elektronen durchstrahlbar sind. Dieser Schritt



ist der heikelste. Mit einem »fokussierten Ionenstrahl« aus Gallium wird das präsolare Korn punktgenau aus der Probe herausgeschnitten. Im Elektronenmikroskop durchstrahlen dann hochenergetische Elektronen (mit einer Beschleunigungsspannung von 200 000 Volt) die Probe. Das Vergrößerungsvermögen dieses Instrumentes ist so hoch, dass sogar einzelne Atomlagen im Kristallgitter abgebildet werden können. Die Untersuchungen erlauben Rückschlüsse auf die Struktur, aber auch die Chemie der untersuchten Körner.

Die isotopischen, chemischen und strukturellen Untersuchungen des Sternstaubkorns ermöglichen es nun, seine Entstehungsgeschichte zu rekonstruieren. In den Winden welches Sternes ist es vor Urzeiten kondensiert und wie? Durch welche Prozesse ist das Korn während seiner Reise durch das interstellare Medium verändert worden? Welche stellaren Umgebungen haben Staub in das Sonnensystem geliefert? Eine unerwartete Entdeckung gelang dabei in Frankfurt: Eines der präsolaren Körner, das nachweislich in den Winden eines Roten Riesensterns kondensiert ist, hat die Kristallstruktur eines Hochdruckminerals, das den größten Teil des unteren Erdmantels ausmacht: Magnesiumperowskit. Aber wie kann diese Mineralmodifikation unter den extrem niedrigen Drücken der Sternatmosphären entstehen? Die plausibelste Erklärung hierfür ist wohl die Umwandlung des Korns in

einer Supernovaschockwelle – einer gewaltigen Explosion, bei der sich der Sternstaub schlagartig verdichtete. Diese Entdeckung ist deshalb so unerwartet, weil man davon ausgegangen war, dass Körner in diesen Schockwellen größtenteils zerstört werden. Der Fund belegt das Gegenteil und zeigt, wie wichtig kombinierte spektrometrische und elektronenmikroskopische Untersuchungen an präsolaren Mineralen sind. Die Ironie dieses Fundes: Man sucht nach Staubkörnern, die lange vor der Entstehung des Sonnensystems in fernen Sternen kondensiert sind und heute noch im interstellaren Raum zu finden sind – und entdeckt stattdessen das häufigste Mineral unseres Planeten Erde!

### Interstellarer Staub

Auch in Zukunft sind am Geowissenschaftlichen Institut der Goethe-Universität spektakuläre Funde zu erwarten. Gerade erst hat die Untersuchung der Staubkörner des interstellaren Materiestroms begonnen, die ebenfalls während der Stardust-Mission aufgesammelt wurden. Über die Beschaffenheit (Struktur und Chemie) der Körner, die die einzige Verbindung unseres Sonnensystems mit dem Rest der Galaxie darstellen, hat man bislang nur eine recht grobe Vorstellung. Man geht davon aus, dass während der Mission nur etwa 100 solcher Körner eingesammelt wurden. Bevor sie untersucht werden können, müssen sie erst einmal



Die European Synchrotron Radiation Facility – ESRF – ist eine Europäische Großforschungseinrichtung, an der über 3000 Arbeitsgruppen pro Jahr messen können. Die Synchrotronstrahlung (eine hochenergetische Röntgenstrahlung) wurde einst am großen Bruder CERN entdeckt. Da sich diese Art der Strahlung als äußerst nützlich erwies, wurden hierfür optimierte Messanlagen wie das ESRF entwickelt.

### Supermikroskop mit Röntgenstrahlen

Welche Struktur hat der Kometenstaub, und wie ist seine chemische Zusammensetzung? Um diese Fragen beantworten zu können, ohne die Proben zu zerstören, so dass sie anderen Wissenschaftlern für weitere Untersuchungen zur Verfügung stehen, bediente sich unsere Arbeitsgruppe der erstaunlichen Möglichkeiten an der European Synchrotron Radiation Facility – ESRF – in Grenoble. Dieses europäische Großprojekt stellt eine Art Röntgensupermikroskop bereit. Auf einer fast ein Kilometer langen Kreisbahn werden Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Lenkt man die Elektronen von einer geraden Bahn ab, senden sie eine brillante, hochenergetische Röntgenstrahlung aus, die sogenannte

Synchrotronstrahlung. Ähnlich wie bei einer Röntgenaufnahme des menschlichen Knochengewebes kann man auf diese Weise den Kometenstaub durchleuchten. Die von uns angewandten Methoden erlauben die dreidimensionale Messung der chemischen Zusammensetzung (Röntgenstrahlfluoreszenzanalyse) und des strukturellen Aufbaus (Röntgenstrahlbeugung) des Kometenstaubes.

Den Weltrekord in Präzision hält die Beamline-Nummer ID13 des ESRF: Erst kürzlich erreichte man hier eine Punktauflösung von nur fünf Nanometern. Im Routinemessbetrieb ergibt sich hierdurch immerhin noch eine Fokusbreite von nur 100 Nanometern (1/10000stel eines Millimeters). Zum Vergleich: Ein menschliches Haar ist etwa 1000-mal dicker. Die Messbedingungen lassen sich im Idealfall über

mehrere Tage stabil halten. Die nutzbare Ortsauflösung ist damit um etwa eine Größenordnung besser als bei den Strahlungsquellen in den USA (Argonne National Laboratory) und in Japan (Spring 8).



Messtation ID13 an der European Synchrotron Radiation Facility. Neben der Struktur des Kometenstaubes mittels Röntgenbeugung lässt sich vor allem die chemische Zusammensetzung der Partikel dreidimensional mit einer Ortsauflösung von weniger als 100 Nanometern (ein 10000stel Millimeter) ermitteln.



## Kometen und die Entstehung unseres Sonnensystems



Der Komet West, erstmals gesichtet im August 1975, ging wegen seines spektakulären Schweifs in die Geschichte ein.

Vor etwa 4,5 Milliarden Jahren entstand unser Sonnensystem, indem ein Staub-Gas-Gemisch sich zu einer Molekülwolke verdichtete. Zunächst bildeten sich größere Staubkörner, die dann zu noch größeren verklumpten. Beim Zusammenstoß der Klumpen entstanden sogenannte Planetesimale, die in der Nähe der Sonne zu Asteroiden, Kleinstplaneten und Planeten anwuchsen. An den kalten Rändern

des Sonnensystems entstanden zur gleichen Zeit die Kometen. In ihnen wurde das Gas-Staub-Gemisch in einem sehr ursprünglichen Zustand eingefroren. Sie sind daher als Botschafter vergangener Zeiten ein begehrtes Forschungsobjekt. Auch der Asteroidengürtel, der sich zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter befindet, sowie der Kuipergürtel zeugen bis heute von der Entstehung unseres Sonnensystems aus einer Staubwolke. Und auch außerhalb unseres Sonnensystems verdichteten sich Gas-Staub-Gemische an vielen Orten des Universums auch heute noch zu Molekülwolken. Sie sind die Geburtsstätten neuer Sterne.

in den Proben aufgespürt werden. Weltweit suchen zurzeit über 30 000 Laien und Wissenschaftler, die sogenannten »Stardusters«, nach diesen Körnern. Am Bildschirm durchsuchen viele Freiwillige mit großem

Engagement Bilder einzelner Probenausschnitte. Auch für dieses Projekt wurde von der NASA ein relativ kleines Voruntersuchungsteam zusammengestellt, das in den nächsten drei Jahren das kostbare Material untersuchen wird. Zurzeit werden lediglich Untersuchungsmethoden akzeptiert, die vollkommen zerstörungsfrei arbeiten.

Anfang 2008 wurde am Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena die erste Probe aus dem Aufnahmehälter der Mission herausgeschnitten und auf direktem Weg zu unserer Messung in Grenoble geschickt. Inzwischen liegen die ersten Ergebnisse vor, aber ein definitiver Nachweis der interstellaren Materie ist noch nicht gelungen. Da die Präparation der Körner inzwischen im Routinebetrieb ohne Verluste möglich ist, wagen wir uns nun auch an die besseren Kandidaten für Material aus dem interstellaren Materiestrom heran. Zweifelsfrei identifiziert wurden bereits sogenannte Sekundärpartikel, die durch den Einschlag von kosmischen Staubpartikeln auf die Sonnensegel entstanden. Diese Staubpartikel enthalten auch Reste vom ursprünglich eingeschlagenen Partikel, und das könnte sich als interstellares Korn erweisen. Hierzu sind aber NanoSIMS-Messungen nötig, die erst in einem weiteren Schritt erfolgen sollen, da diese Untersuchung nicht zerstörungsfrei ist.

Darüber hinaus warten wir gespannt auf den Rücktransport der Proben des Asteroiden Itokawa von der Hayabusa-Mission der japanischen Weltraumorganisation Jaxa. Sie müssten 2010 auf der Erde eintreffen und sollen bereits ein Jahr später an Wissenschaftler in der ganzen Welt gehen. In absehbarer Zukunft wird es erneut Probenrücktransporte von unseren Satelliten vom Mond und später auch von den kommenden Marsmissionen geben. ♦

## Die Autoren



**Prof. Dr. Frank Brenker**, 42, studierte Geologie und Paläontologie an der Technischen Universität Darmstadt und der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Nach seiner Doktorarbeit, die er an der Goethe-Universität und der University of Liverpool durchführte, war er Assistent in der Arbeitsgruppe Kosmochemie der Universität Köln. Er ist Mitglied im »preliminary examination«-Team der Stardust-Mission der NASA.

Während mehrerer durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und die NASA unterstützter Forschungsaufenthalte in den USA konnte er sein Wissen auf dem Gebiet der extraterrestrischen Forschung erweitern. Anfang 2007 erhielt er die erste Heisenberg-Proffessur der DFG für Naturwissenschaften.



**Diplom-Geologe Christian Vollmer**, 31, hatte es bereits während seiner Diplomarbeit an der Universität Köln mit winzigen Proben zu tun, die kleiner sind als 0,1 Millimeter. Damals waren es Einschlüsse in Diamanten, die ihn fesselten. Der Sternenstaub, den er seit Oktober 2005 als Doktorand an

der Goethe-Universität und dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz untersucht, ist allerdings noch mehrere Größenordnungen kleiner. Sternenforschung begeisterte ihn schon seit seiner Kindheit. Mit dem Studium der Geologie hat sich einer seiner Kindheitsträume erfüllt.



**Diplom-Mineralogin Sylvia Schmitz**, 28, nahm nach ihrem Abitur 2000 ein geowissenschaftliches Studium an der Universität Potsdam auf, das sie Mitte 2006 mit einem Abschluss in Mineralogie beendete. In der Frankfurter Nano Science-Gruppe arbeitet sie seit zwei Jahren an Material des Kometen Wild 2 aus der NASA-Stardust-Mission.

Sie untersucht es mit dem Transmissions-elektronenmikroskop in Frankfurt und mit von Synchrotronstrahlung induzierter Röntgenfluoreszenzstrahlung am ESRF in Grenoble, Frankreich.

[f.brenker@em.uni-frankfurt.de](mailto:f.brenker@em.uni-frankfurt.de)  
[cvollmer@mpch-mainz.mpg.de](mailto:cvollmer@mpch-mainz.mpg.de)  
[schmitz@em.uni-frankfurt.de](mailto:schmitz@em.uni-frankfurt.de)  
<http://www.mineralogie.uni-frankfurt.de/nanogeoscience/index.html>