

Marsmeteorite

Proben vom roten Nachbarn

Marsmeteorite sind die einzigen Proben unseres roten Nachbarplaneten, die auf der Erde zur Verfügung stehen. Einige dieser seltenen und wertvollen Gesteine sind in den neuen Ausstellungen des Museums für Naturkunde zu bewundern. Sie wurden durch Einschläge von der Oberfläche des Mars herausgeschleudert und enthalten wertvolle Informationen über die Geologie des Mars, seine Klimageschichte und auch über das Vorhandensein möglicher primitiver Lebensformen. Ihre Untersuchung ist daher ein aktueller Forschungsschwerpunkt des Museums für Naturkunde.

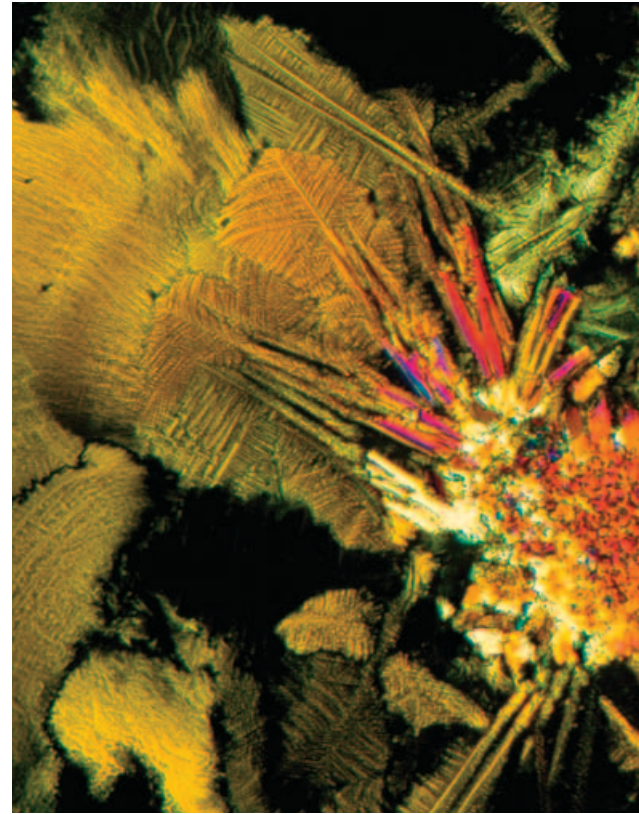
Der Fall ungewöhnlicher Meteorite

Begleitet von kanonenartigem Donner fiel am 3. Oktober 1815 um acht Uhr morgens nahe dem kleinen Ort Chassigny im französischen Departement Haute Marne ein Schauer mehrerer Bruchstücke eines Steinmeteoriten von zusammen ungefähr vier Kilogramm Gewicht auf die Erde. Ihre wissenschaftliche Untersuchung u.a. durch den Direktor des Mineralogischen Museums der Berliner Universität, Gustav Rose, ergab, dass sich der Meteorit in seiner Zusammensetzung und Mineralogie von allen anderen bis dato bekannten Meteoriten unterschied. Es handelte sich um einen Dunit, ein magmatisches Gestein, das in großen Tiefen entsteht und hauptsächlich aus dem grünlichen Mineral Olivin besteht. Auf der Erde wird es gelegentlich durch Vulkanschlote aus dem Erdmantel an die Oberfläche befördert, aber in diesem Fall stammte es aus dem Weltall.

Fast genau 50 Jahre später, im August 1865, fiel erneut ein bemerkenswerter Meteorit, diesmal nahe dem indischen Städtchen Shergotty, auf die Erde. Es war ein Basalt, ebenfalls ein magmatisches Gestein, das aber nicht in großer Tiefe, sondern an der Oberfläche beispielsweise bei einem Vulkanausbruch auskristallisiert. Schließlich schlugen im Juni 1911 nahe dem ägyptischen Ort El Nakhla el Baharia vierzig Steine mit einem Gesamtgewicht von etwa zehn Kilogramm auf den Erdboden. Es wird berichtet, einer von ihnen habe dabei einen Hund getötet. Auch diese Steine waren magmatischen Ursprungs und hatten sich in einem Magmenkörper an oder nur wenig unterhalb einer Planetenoberfläche verfestigt.

Das Rätsel ihrer Herkunft

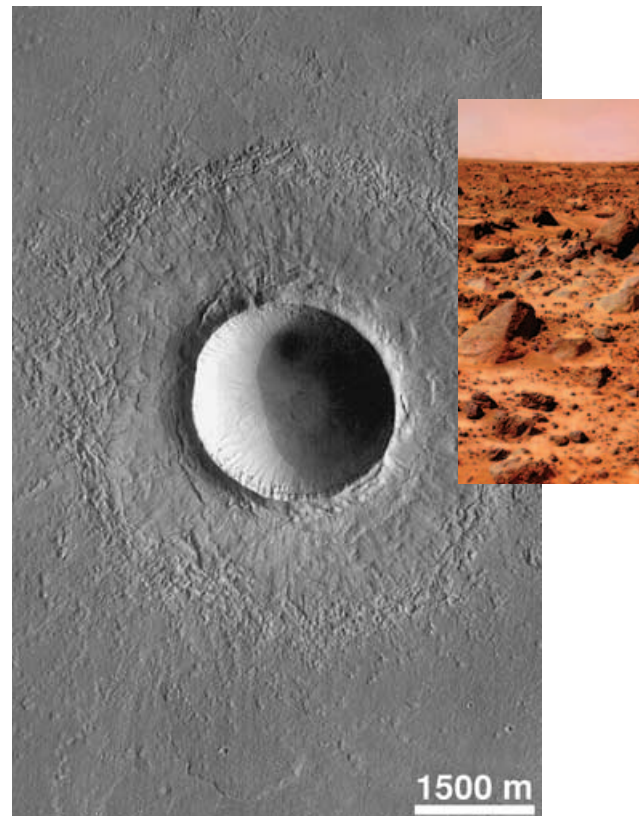
Lange gaben diese speziellen Meteorite, die nach den oben genannten Fällen und einem später gefundenen Orthopyroxeniten auch als SNCO-Meteorite bezeichnet werden, den Wissenschaftlern große Rätsel auf und ihre Herkunft lag im Unklaren. Heute ist man sich recht sicher, dass sie und weitere 35 Steinmeteorite von unserem Nachbarplaneten, dem Mars, stammen. Entscheidende Hinweise auf ihre Herkunft ergaben die Analyse kleiner Schmelzeinschlüsse in einigen dieser Gesteine. Als die Marsmeteorite von der Oberfläche des Planeten durch Asteroideneinschläge weggeschleudert wurden, waren sie kurzfristig enorm hohen

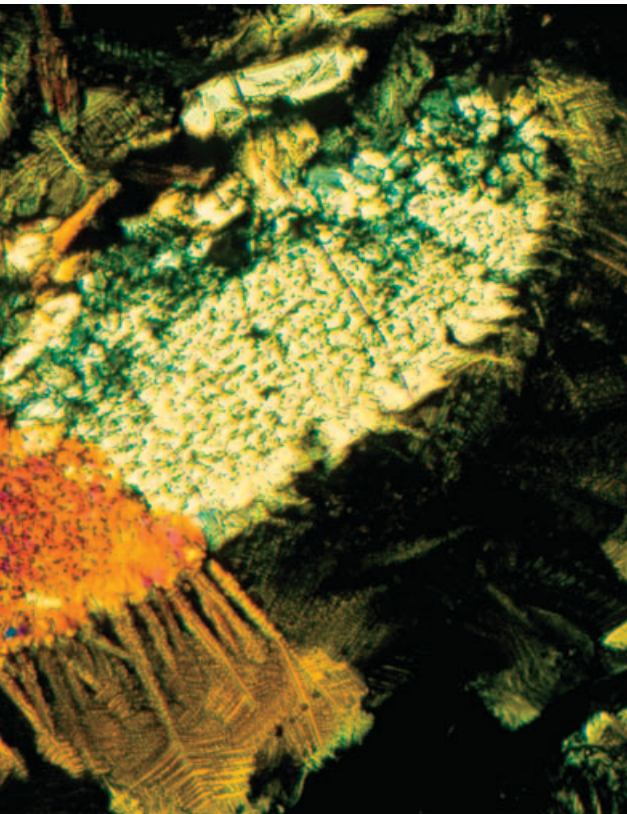


Drücken und Temperaturen ausgesetzt, wodurch einzelne Bereiche aufschmolzen. In der zu Glas erstarrten Schmelze fanden Wissenschaftler kleine mit Gas gefüllte Blasen. Die Zusammensetzung dieses Gases entspricht derjenigen der Marsatmosphäre, die man z. B. aus Messungen der Viking-Landesonden kennt. Ein weiteres Argument für die Herkunft vom Mars ergab sich aus den relativ jungen Altern der Marsmeteorite: einige sind nur etwa 160 bis 200 Millionen Jahre alt,

Abb. 2

*Dieser Meteoriteneinschlagkrater liegt im nördlichen Teil der Elysium Planitia des Planeten Mars und durchmisst etwa 2,5 km. Bereits bei solch relativ kleinen Einschlagereignissen können Gesteine vom Mars weggeschleudert werden, die später als Meteorite auf die Erde gelangen.
(Quelle: NASA/JPL/Malin Space Science Systems)*





andere kristallisierten vor 1,3 Milliarden Jahren und nur ein Meteorit weist ein Alter von 4,5 Milliarden Jahren auf. Im Gegensatz zum Mond oder zum Planeten Merkur herrschte auf dem Planeten Mars bis in geologisch jüngere Zeit ein aktiver Vulkanismus. Marsmeteorite zeugen daher von den magmatischen Aktivitäten des Mars über einen Zeitraum von mehr als 4 Milliarden Jahre hinweg. Sie sind bis heute die einzigen Proben unseres Nachbarplaneten, die für Laboruntersuchungen zur Verfügung stehen und aus deren Studium wir sehr viel über die abwechslungsreiche geologische und klimatische Geschichte des Mars erfahren können.



Aufbruch vom Mars

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms »Mars und die terrestrischen Planeten« (SPP 1115) wurden in den vergangenen Jahren durch Jörg Fritz, Dieter Stöfler, Cornelia Meyer und den Autor dieses Artikels am Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin insgesamt achtzehn Marsmeteoriten hinsichtlich ihrer Mineralogie und der Veränderung während des Auswurfs vom Mars, der sogenannten Stoßwellenmetamorphose, untersucht. Ziel der Studien war es, die

Druck- und Temperaturbedingungen während der Ejektion aufzuklären, um so Informationen über die Herkunftsgebiete der Meteorite, eventuelle klimatische Einflüsse auf den Auswurf und einen möglichen Transfer von primitiven Lebensformen durch die Meteorite zu erhalten.

Um aus dem Schwerefeld des Planeten Mars zu entweichen, muss oberflächennahes Material auf Geschwindigkeiten höher als die sogenannte Fluchtgeschwindigkeit des Planeten von 5,06 km/s beschleunigt werden. Die dafür benötigte Energie ist ausschließlich durch Hochgeschwindigkeitskollisionen kosmischer Körper, z.B. bei dem Einschlag eines Asteroiden auf dem Mars, zu erzeugen. Bei einem derartigen Einschlag, der mit einer mittleren Geschwindigkeit von ~10 km/s (36.000 km/h) erfolgt, entstehen im Zentrum des Kraters Drücke von bis zu fünf Millionen Atmosphären und Temperaturen von einigen 10.000 Grad Celsius, die das Projektil und das Zielgestein vollständig verdampfen lassen. Eine sich vom Zentrum des Einschlags sphärisch ausbreitende Stoßwelle erzeugt dann nach außen hin Bereiche abnehmender Druck- und Temperatur-, kurz Stoßwellenbelastung. Beim Durchgang der Stoßwelle durch die Gesteine treten irreversible Veränderungen bestimmter physikalischer Eigenschaften von Mineralen und des Gesteinsgefüges auf, die es ermöglichen, die maximalen Druck- und Temperaturbedingungen während der Stoßwellenbelastung des Gesteins zu rekonstruieren. Die Veränderungen der Minerale reichen u.a. vom Eintreten ungleichmäßiger (undulöser) Auslöschung im Lichtmikroskop, der Ausbildung unregelmäßiger bzw. bestimmter kristallographischen Richtungen folgender Brüche, der Entstehung sehr hoher Versetzungsdichten und Mosaikbaus, der Verringerung des Brechungsindex, der Änderung der Kristallstruktur und Ausbildung von Hochdruckphasen bis hin zur teilweisen bzw. vollständigen Aufschmelzung. Die Ableitung des Drucks und der Temperatur anhand der Veränderungen im Gestein wird durch die Kalibrierung der Effekte durch kontrollierte Stoßwellenexperimente möglich. Bei dieser Simulation des Einschlagereignisses sind die Minerale für sehr kurze Zeit (etwa einer halben Mikrosekunde) definierten Drücken und Temperaturen ausgesetzt, sodass sich die erzeugten Effekte eindeutig zuordnen lassen. Die extremen Bedingungen werden dabei durch Sprengstoffe oder Leichtgaskanonen erzeugt. Die beobachteten Stoßwelleneffekte in Mineralen von Marsmeteoriten kombiniert mit den experimentell erlangten Kalibrierungsdaten erlauben daher Rückschlüsse auf die Bedingungen während des Auswurfs der Gesteine vom Mars. Als für die Druck- und Temperaturbestimmung am besten geeignetes Mineral erwies sich dabei der Plagioklas, ein Feldspatmineral, das in fast allen Marsmeteoriten häufig anzutreffen ist.

Abb. 1
Lichtmikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffs des Marsmeteoriten Elephant Moraine 79001. Die Aufnahme zeigt einen kleinen Bereich, der während des Auswurfs vom Mars völlig aufgeschmolzen und sehr schnell abgekühlt wurde. Die dendritischen Kristalle sind typisch für hohe Abkühlraten. Die Bildbreite beträgt etwa 3/10 mm und die Aufnahme wurde mit gekreuzten Polarisatoren erstellt.

Abb. 3
Panoramaaufnahme in Richtung Südwesten von der Pathfinder Landungsstelle in der Region Chryse Planitia des Mars vom 4. Juli 1997. Im Hintergrund sind zwei Hügel, die sogenannten »Twin Peaks« zu erkennen. (Quelle: NASA/JPL-Caltech)

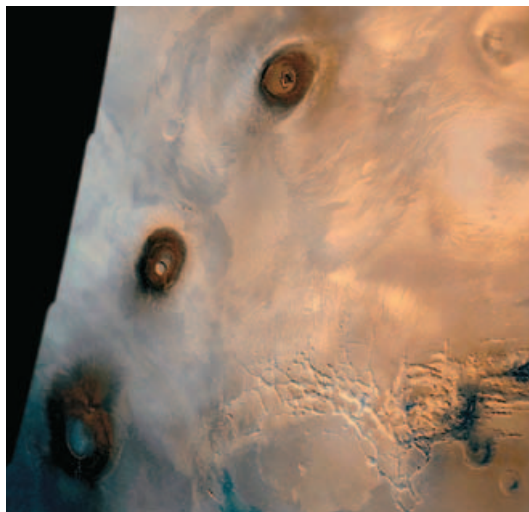
Der Druck wird messbar

Bereits 1872 hatte der österreichische Mineraloge Gustav Tschermak bei der Untersuchung des Marsmeteoriten Shergotty eine Form des Plagioklas entdeckt, in der sich Licht nicht wie im normalen Plagioklaskristall richtungsabhängig (anisotrop), sondern richtungsunabhängig ausbreitete (isotrop). Ein derartiges Verhalten wäre z.B. für zu Glas erstarrte Schmelzen typisch, doch wies diese Form des Plagioklas keine für Schmelzen typische Fließstrukturen oder Blasen auf. Tschermak benannte sie zu Ehren des englischen Mineralogen Nevil Story-Maskelyne – Maskelynit. Erst neunzig Jahre später konnte gezeigt werden, dass Maskelynit aus Plagioklas durch starke Stoßwellenbelastung entsteht. Die Umwandlung geschieht unter hohem Druck, ohne dass

me Brechungsindex konnte dann mit einem Abbé-Refraktometer bestimmt werden. Nach Beendigung der Messungen wurden von den Einzelkörnern polierte Anschliffe hergestellt und mit Hilfe einer Elektronenstrahlmikrosonde punktgenau die chemische Zusammensetzung an den Stellen der Körner bestimmt, an denen zuvor der Brechungsindex gemessen worden war.

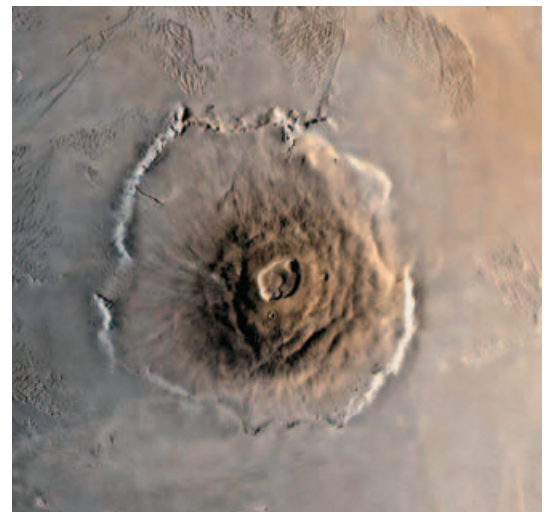
Unter Berücksichtigung unserer Ergebnisse und denen anderer Forschergruppen an hier nicht untersuchten Marsmeteoriten lässt sich zusammenfassend feststellen, dass alle Marsmeteorite während ihres Auswurfs eine Stoßwellenbelastung von mindestens 5–14 GPa bei einer gleichzeitigen Temperaturerhöhung von etwa 30°C erfahren haben. Dagegen beträgt der maximale

*Abb. 4
Dieses Bild zeigt ein Photomosaik der östlichen Tharsis Region des Mars, das aus Einzelbildern des Viking 1 Orbiters zusammengesetzt wurde. Sichtbar sind – von oben rechts nach unten links – die drei etwa 25 km hohen Vulkane Ascræus Mons, Pavonis Mons und Asia Mons sowie im unteren Bildausschnitt das ausgeprägte Canonsystem Noctis Labyrinthus.
(Quelle: NASA/JPL-Caltech)*



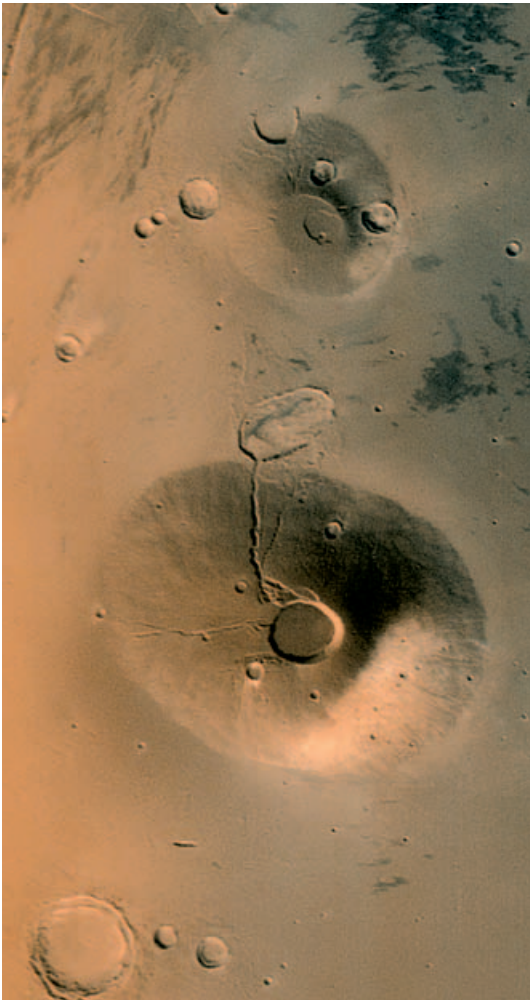
sich für normale Glasschmelzen typische Fließstrukturen ausbilden können. Man spricht daher bei Maskelynit von einem diaplektischen Glas.

Optische Untersuchungen haben gezeigt, dass Licht beim Durchgang durch unterschiedlich stark stoßwellenmetamorph beanspruchte Plagioklase bzw. Maskelynite verschieden stark gebrochen wird: mit steigendem Stoßwellendruck reduziert sich der sogenannte Brechungsindex. Experimentell kalibriert kann dieser daher zur Ermittlung des Stoßwellendruckes genutzt werden. Zur Bestimmung des Brechungsindex der unterschiedlichen Plagioklase in Marsmeteoriten wurden zunächst aus den zur Verfügung stehenden Proben jeweils 10–15 etwa 20–300 µm messende Einzelkörner der Plagioklasphasen herauspräpariert. Auf einem Objektträger befestigt, wurden sie mit einer speziellen Brechungsindexflüssigkeit benetzt, deren Temperatur nun solange erhöht wurde bis ihr Brechungsindex mit dem der Mineralkörner übereinstimmte. Der gemeinsa-



*Abb. 5
Fotomosaik von Olympus Mons, dem mit einer Höhe von bis zu 27 km höchsten Vulkan unseres Sonnensystems. Olympus Mons liegt in der Tharsis Region des Mars, eines der möglichen Liefergebiete junger basaltischer Marsmeteorite.
(Quelle: NASA/JPL-Caltech)*

in den Marsmeteoriten gemessene Stoßwellendruck 55 GPa und hatte eine Temperaturerhöhung von etwa 1000°C zur Folge. Diese Schlussfolgerungen bestätigen numerische Modellierungen russischer Kollegen, nach denen Gesteine Stoßwellendrücken von mindestens 10 GPa ausgesetzt sein müssen, um den Mars zu verlassen. Die Modellierungen zeigen zudem, dass bei schrägen Meteoriteneinschlägen eine Region im Umkreis von einem halben bis 1,5-fachen des Durchmessers des einschlagenden Projektils bis in eine Tiefe von etwa 10% des Projektildurchmessers beprobt wird. Dabei können bereits kleine Impakt ereignisse mit Kratern von etwa 3 km Durchmesser Marsmeteorite produzieren. Allerdings werden Gesteinsfragmen-



te, die kleiner als 20 cm sind, durch die Marsatmosphäre zu stark abgebremst, um dem Schwerfeld des Planeten zu entfliehen.

Das Marsmeteoriten-Paradoxon

Modellierung und Kenntnis über die Auswurfbedingungen liefern darüber hinaus den Ansatz zur Lösung eines seit langem bestehenden »Marsmeteoriten-Paradoxons«. Dieses Paradoxon besteht darin, dass mit einer einzigen Ausnahme Marsmeteorite relativ geringe Kristallisationsalter von weniger als 1,3 Milliarden Jahren aufweisen – die meisten Shergottite entstanden sogar erst vor 160 bis 200 Millionen Jahren – während nur etwa 10% der Marsoberfläche jünger als 1 Milliarde Jahre sind. Damit sind die Marsmeteorite nicht repräsentativ für die auf dem Mars vorkommenden geologischen Einheiten. Die ungewöhnliche Häufigkeit junger Gesteine unter den Marsmeteoriten kann entweder damit erklärt werden, dass vor 150–200 Millionen Jahren große Bereiche der Planetenoberfläche durch

Lavaflüsse bedeckt wurden oder aber dass kleine Regionen junger Gesteine besonders günstige Bedingungen für einen Auswurf von Meteoriten bieten.

Ein zusätzliches Problem resultiert aus der Anzahl der Auswurfereignisse, die durch die Marsmeteorite dokumentiert wird. Auskunft hierüber geben die sogenannten kosmischen Bestrahlungsalter. Befindet sich ein Meteoroid im Weltall, so entstehen durch den Beschuss mit kosmischer Strahlung relativ kurzlebige Radionuklide, z.B. ^3He , ^{10}Ne , ^{21}Ne und ^{26}Al – um nur einige zu nennen. Da die Produktionsraten dieser Nuklide bekannt sind, lässt sich durch Messung ihrer Häufigkeit das Bestrahlungsalter und damit die Transferzeit von Mars zu Erde bestimmen. Auf der Erde angelangt, ist der Meteorit dann durch die Atmosphäre unseres Planeten von der kosmischen Strahlung abgeschirmt und die Radionuklide zerfallen, ohne dass neue produziert werden. Dies ermöglicht die Bestimmung des irdischen Alters, also wie lange der Meteorit schon auf der Erde liegt. Irdisches Alter plus Bestrahlungsalter ergeben den Zeitpunkt des Auswurfs vom Mars. Für die Marsmeteorite wurden 7 Auswurfereignisse bestimmt, die ungleichmäßig über einen Zeitraum von etwa 20 Millionen Jahre verteilt sind. Das oben geschilderte Paradoxon ist vor allem für die letzten fünf Millionen Jahre sehr ausgeprägt. In dieser Zeit fanden vier Auswurfereignisse statt, die ausschließlich 160–200 Millionen alte Basalte lieferten und so weniger als 5–10% der Marsoberfläche beprobten. Als mögliche Liefergebiete kommen für diese Gesteine die Tharsis, Amazonis und Elysium Regionen des Mars in Frage, in denen vor etwa 200 Millionen Jahren nachweislich vulkanische Aktivitäten stattfanden und die einige geographische und geologische Merkmale aufweisen, die für einen bevorzugten Auswurf von Material verantwortlich sein könnten. Alle Regionen erheben sich bis zu einer Höhe von 10 km über das Normalnull des Mars. Bei derartigen Erhebungen ist der Atmosphärendruck um etwa 50% reduziert, was bei einer typischen Größenverteilung ausgeworfener Bruchstücke die Gesamtauswurfmasse um den Faktor 20 erhöht. Des Weiteren liegen diese Regionen in geringen geographischen Breiten, sodass sich die Winkelgeschwindigkeit des Planeten, die am Marsäquator 0,24 km/s und damit 5% der Entweichgeschwindigkeit beträgt, zu der Auswurfgeschwindigkeit addiert, wenn der Auswurf in Drehrichtung des Mars erfolgt. Schließlich sind die betreffenden Regionen im wesentlichen aus jungen Gesteinen mit hoher Festigkeit aufgebaut. Bei Impaktereignissen werden auf derartigen Untergründen höhere Auswurfgeschwindigkeiten erreicht als bei alten und von einem lockeren Regolith bedeckten Planetenoberflächen.

*Abb. 6
Einschlagkrater auf den
Flanken der Marsvulkane
Ceraunius Tholus (unten)
und Uranus Tholus (oben)
aufgenommen im März 2002
von der Raumsonde Mars
Global Surveyor. Aus
Impaktkratern auf diesen
Vulkanen könnten basalti-
sche Marsmeteorite mit jun-
gen Kristallisationsaltern
herausgeschleudert worden
sein.
(Quelle: NASA/JPL/Malin
Space Science Systems)*



Dr. Ansgar Greshake

Jg. 1967. Studium der Mineralogie an der Universität Münster. 1993 Diplom in Mineralogie. 1996 Promotion in Planetologie. Seit 1997 Kustos der Meteoritensammlung und Leiter des Labors für Transmissionselektronenmikroskopie am Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin.

Kontakt

Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität zu Berlin
 Invalidenstr. 43
 D-10115 Berlin
 Tel.: +49 30 2093-8858
 Fax: +49 30 2093-8868
 E-Mail: Ansgar.Greshake@museum.hu-berlin.de

Das Ende einer Eiszeit

Die hohe Fluktuation bei der Häufigkeit von Auswurfereignissen und der Art der beprobten Oberfläche des Mars während der letzten 20 Millionen Jahre legen zudem nahe, dass klimatische Veränderungen auf dem Mars Einfluss auf den Auswurf von Marsmeteoriten hatten. Während ausgedehnter Eiszeiten können z. B. Bedeckungen durch Gletscher den Auswurf von Material wesentlich erschwert haben. Ursache derartiger Klimawechsel ist vor allem eine starke Schwankung des Neigungswinkels der Rotationsachse des Mars, die nicht wie bei der Erde durch einen großen Mond stabilisiert wird. In den letzten fünf Millionen Jahren, in denen nur basaltische Regionen beprobt wurden, war die Rotationsachse des Mars nur relativ gering geneigt und die Gletscher befanden sich auf dem Rückzug. Aufgrund ihrer großen Höhe über Normalnull, der geringen geographischen Breite, einer hohen Untergrundfestigkeit und nun auch Eis- bzw. Sedimentfreiheit konnte von den genannten vulkanischen Regionen überproportional viel Material ausgeworfen werden. Die selektive Beprobung dieser Gebiete würde daher das Ende der letzten großen Eiszeit auf dem Mars vor etwa fünf Millionen Jahren dokumentieren.

Der Transfer von Lebensformen

Seit einiger Zeit wird intensiv über die Existenz von Leben auf dem Mars und einen möglichen Transport einfacher Lebensformen durch das Weltall diskutiert. Neueste Stoßwellenexperimente an mit primitiven Mikroorganismen dotierten Gesteinen, an denen das Berliner Naturkundemuseum beteiligt ist, zeigen, dass ein Teil der Organismen selbst die extremen Druck- und Temperaturbedingungen, denen Marsmeteorite ausgesetzt waren, überleben können. Ein Transport potentieller primitiver Lebensformen vom Mars zur

Erde durch Meteorite erscheint daher theoretisch möglich.

Literatur

Fritz, J. (2005): Aufbruch vom Mars – Petrographie und Stoßwellenmetamorphose der Marsmeteorite. Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin, 138 pp.
 Fritz, J. / Artemieva, N. / Greshake, A. (2005a): Ejection of Martian meteorites. *Meteoritics and Planetary Science* 40, 1393–1411.
 Fritz, J. / Greshake, A. / Stöffler, D. (2005b): Micro-Raman spectroscopy of plagioclase and maskelynite in Martian meteorites: Evidence of progressive shock metamorphism. *Antarctic Meteorite Research* 18, 96–116.
 Fritz, J. / Greshake, A. / Stöffler, D. (2007): The Martian meteorite paradox: Climatic influence on impact ejection from Mars? *Earth and Planetary Science Letters*, doi: 10.1016/j.epsl.2007.01.009.
 Greshake, A. / Fritz, J. / Stöffler, D. (2004): Petrology and shock metamorphism of the olivine-phyric shergottite Yamato 980459: Evidence for a two-stage cooling and a single-stage ejection history. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68, 2359–2377.
 Nyquist, L. E. / Bogard, D. D. / Shih, C.-Y. / Greshake, A. / Stöffler, D. / Eugster, O. (2001): Ages and histories of Martian meteorites. In: *Chronology and Evolution of Mars* (eds. W. K. Hartmann et al.), Space Science Series of ISSI, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 105–164.
 Stöffler, D. / Horneck, G. / Ott, S. / Hornemann, U. / Cockell, C. S. / Moeller, R. / Meyer, C. / de Vera, J.-P. / Fritz, J. / Artemieva, N. A. (2006): Experimental evidence for the potential impact ejection of viable microorganisms from Mars and Mars-like planets. *Icarus*, doi: 10.1016/j.icarus.2006.11.007.

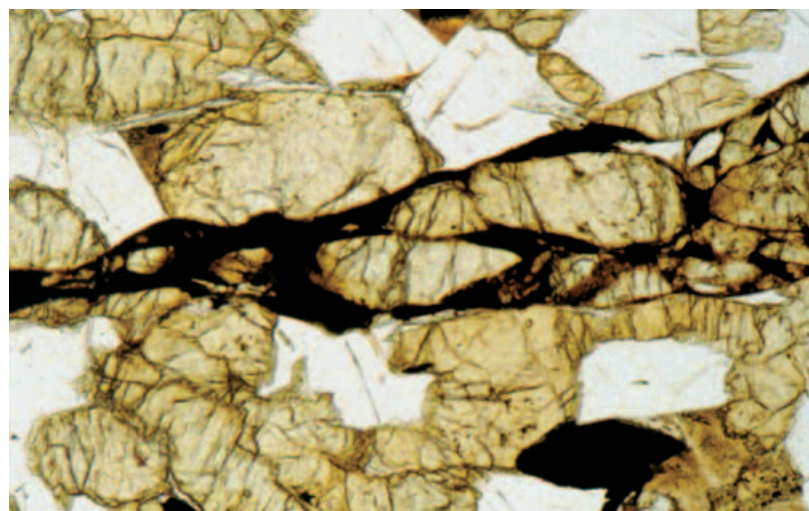


Abb. 7

Lichtmikroskopische Aufnahme eines Dünnschliffs des Marsmeteoriten Zagami. Bei den bräunlichen Phasen handelt es sich um das Mineral Pyroxen, bei den weißlichen um zu Maskelynit umgewandelten Plagioklas. Der schwärzliche Gang in der Mitte des Bildes ist ein Schmelzgang, der infolge der hohen Drücke und Temperaturen während des Auswurfs des Meteoriten vom Mars entstand. Die Bildbreite beträgt etwa 0,5 mm und die Aufnahme wurde mit parallelen Polarisatoren erstellt.