

BEDA A. HOFMANN

## Meteoriten und Impaktkrater – Zeugen von Kollisionen im All

### Zusammenfassung des Vortrages vom 26. März 2013

#### Zusammenfassung

*Meteoriten sind Fragmente von Himmelskörpern unseres Sonnensystems, vorwiegend von Asteroiden. Einige wenige stammen vom Mond und vom Mars. Diese Objekte sind vollgepackt mit Informationen über die frühe Geschichte des Sonnensystems. Die meisten sind seit ihrer Entstehung in der frühesten Zeit des Sonnensystems nur wenig verändert. Einige Meteoriten wurden später durch Impaktprozesse auf Asteroiden, Mars oder Mond, stark beeinflusst.*

*Meteoriten sind selten und nur wenige beobachtete Fälle pro Jahr liefern frische Meteoriten. Der Fall von Chelyabinsk, Russland, am 15.2.2013 ist einer der am besten dokumentierten und der grösste seit über 100 Jahren. Eine viel grössere Zahl wird jedoch bei systematischen Suchen in der Antarktis und in heissen Wüsten Nordafrikas und Arabiens gefunden. Die heutige hohe Fundrate ist ausserordentlich und grenzt an Raubbau. Ein sorgfältiger Umgang mit dieser einmaligen wissenschaftlichen Ressource ist anzustreben.*

#### Einleitung

Meteoriten sind feste Objekte  $>10$  mm, die auf die Oberfläche von Himmelskörpern fallen, nachdem sie sich mit mindestens der Fluchtgeschwindigkeit dem jeweiligen Körper genähert haben ( $11.2 \text{ km s}^{-1}$  bei der Erde). Diese Definition von RUBIN UND GROSSMANN (2010) trifft auch auf Meteoriten zu, welche auf dem Mond und auf dem Mars gefunden, respektive beobachtet wurden. Ausgeschlossen sind hingegen Auswurfmassen (von Vulkanen und Meteoritenkratern), welche nach ballistischem Flug wieder auf dem gleichen Körper auftreffen. Lange Zeit wurden «Steine, die vom Himmel fallen» mit grosser Skepsis oder nachgerade mit Unglauben behandelt, bis um das Jahr 1800 eine Reihe von beobachteten und gut dokumentierten Fällen dazu führten, dass auch die grössten Skeptiker die Existenz von Meteoriten nicht mehr leugnen konnten (Siena, Italien 1794; Wold Cottage, England, 1795; L'Aigle, Frankreich 1803; Weston, Connecticut, 1807). Diese Fälle und daraus resultierende Publikationen überzeugten das wissenschaftliche Establishment und bildeten die Basis einer neuen Wissenschaft, der Meteoritenkunde («Meteoritics»). Es wurde auch sehr schnell klar, dass Meteoriten nicht eine spe-

zielle Art atmosphärischer Phänomene oder vulkanische Auswurfmassen darstellen, sondern dass sie extraterrestrischen Ursprungs sind. Ihre Seltenheit und die exotische Herkunft führten schnell dazu, dass Meteoriten gesuchte Sammlungsobjekte wurden und bald Bestandteil aller wichtigen Naturalienkabinette und frühen Museumssammlungen wurden.

Die Untersuchungen von Meteoriten zeigten auch sehr schnell, dass sich die meisten von allen bekannten irdischen Gesteinen unterscheiden, obwohl sie zu einem grossen Teil aus denselben Mineralien aufgebaut sind, welche auch auf der Erde vorkommen. Meteoriten blieben das einzige verfügbare extraterrestrische Material, bis in den Jahren 1969-1976 die Apollo- und Luna-Missionen total 382 kg Mondgestein zur Erde brachten. Bis heute kamen nur winzige Mengen von Kometen- und Asteroidenstaub zu dieser Sammlung von aktiv durch Raumfahrtmissionen gesammeltem extraterrestrischem Material dazu.

Sehr viel von dem, was wir über die Entstehung, die Zusammensetzung, das Alter und die Evolution unseres Sonnensystems wissen, beruht auf der Untersuchung von Meteoriten. Meteoriten liefern vor allem Informationen über die Asteroiden, den Mars und den Mond: Chemische Zusammensetzung, Mineralogie, Alter, und Kollisionsgeschichte lassen sich aus ihnen herauslesen. Sie liefern sogar Informationen über Ereignisse vor der Entstehung des Sonnensystems. Das heute akzeptierte Alter der Erde von rund 4.5 Milliarden Jahren wurde erstmals 1953 anhand der Blei-Isotopenzusammensetzung des Cañon Diablo-Meteoriten von Prof. Fritz Houtermans in Bern berechnet (HOUTERMANS 1953).

Neu aufgefundene Meteoriten stellen in jedem Fall wissenschaftlich interessantes Material dar und sollten klassifiziert werden, d.h. es sollte eine Bestimmung des Meteoritentyps durchgeführt werden. Alle Meteoriten erhalten ihren offiziellen Namen nach dem Fundort oder der Fundregion. Alle so klassifizierten Meteoriten sind in einer internationalen Datenbank der Meteoritical Society erfasst (<http://tin.er.usgs.gov/meteor/metbull.php>).

## Wie kommen wir zu Meteoriten?

Bis ungefähr 1930 waren beobachtete Fälle und Zufallsfunde die einzigen Quellen für neue Meteoriten. Harvey H. Nininger (1887–1986) war der erste, der systematisch begann, nach Meteoriten zu suchen, indem er im Westen der USA Farmern Meteoriten zeigte und nach ähnlichen Steinen fragte. Um 1940 war die Hälfte aller bekannten Meteorite auf seine Bemühungen zurückzuführen! Trotzdem blieb die Rate neu entdeckter Meteoriten zwischen 1900 und 1962 auf einem niedrigen Durchschnitt von 15 pro Jahr. Die Entdeckung von zwei Meteoriten in der Antarktis im Jahr 1969 durch ein japanisches Team markiert den Beginn der Exploration des weissen Kontinents auf Meteoriten durch eigens dafür organisierte, logistisch aufwändige Expeditionen aus Japan, den USA, China, Deutschland und Belgien. Die japanischen und US-Programme sind dabei bei weitem am längsten aktiv.

Aufgrund dieser Suchaktionen in der Antarktis entstand die bisher grösste Sammlung klassifizierter Meteoriten: Mitte Mai 2014 waren 32977 antarktische Meteoriten in der Datenbank der Meteoritical Society erfasst. Die systematische Suche nach Meteoriten in heissen Wüsten begann um 1970 im Roosevelt Co, New Mexico und in der Nullarbor Plain Australiens und wurde später auf die Wüstengebiete Nordafrikas, Arabiens und Südamerikas ausgeweitet. Seit 2000 wurde «Nordwestafrika» (NWA) zum grössten Lieferanten von Meteoriten. Aufgrund ökonomischer Gründe begannen die Bewohner nordafrikanischer Länder erfolgreich mit der Suche nach Meteoriten. Die Vermarktung erfolgt dabei zu einem grossen Teil durch Kanäle, welche früher mit dem Handel mit Mineralien und Fossilien in Marokko etabliert wurden. Diese neue und sehr ergiebige Quelle von Meteoriten hat zur Entdeckung einer grossen Anzahl extrem seltener und gar neuer Meteoritentypen geführt. Zwischen 2000 und 2010 erhöhte sich die Zahl neu entdeckter und offiziell klassifizierter Meteoriten auf rund 1700 pro Jahr (Basis: Datenbank der Meteoritical Society), ein mehr als 100-fache Zunahme, verglichen mit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts.

Der Nachteil der hohen Fundrate in Nordwestafrika ist das fast völlige Fehlen jeglicher Hintergrundinformationen zu den Funden. Da es unmöglich ist, in der grossen Masse der NWA-Meteoriten jene zu erkennen, welche zum gleichen Fallereignis gehören und deshalb nahe zusammen gefunden wurden, wird viel wissenschaftliche Arbeit geleistet, um das gleiche Material, welches oft über unterschiedliche Kanäle zu verschiedenen Institutionen gelangt, zu klassifizieren. Der grösste Teil der gewöhnlichen Chondrite aus Nordwestafrika wird gar nicht mehr regulär klassifiziert. Es wird deshalb nie möglich sein, eine saubere Statistik über die Häufigkeit der verschiedenen Meteoritentypen unter Zusammenfassung der zum gleichen Fall gehörenden Stücke zusammenzustellen. Die Situation ist vergleichbar mit Raubgrabungen in der Archäologie, bei welcher nur die exklusivsten Stücke gesammelt werden, aber sich niemand um die Tonnen von Scherben oder Mauerreste kümmert. Eine systematische Suche nach Meteoriten wird unter Leitung des Naturhistorischen Museums Bern seit 2001 im Sultanat Oman und z.T. in Saudiarabien durchgeführt (*Abb. 1*). Der Zweck ist die Zusammenstellung einer gut dokumentierten und statistisch repräsentativen Sammlung von Wüstenmeteoriten. Im Gegensatz zu Nordwestafrika ist der Anteil unsystematisch gesammelter Meteorite in Arabien niedrig. Oman ist weltweit das Gebiet mit den meisten Meteoriten mit dokumentierter Fall-Lokalität und ist deshalb ein wissenschaftlich einzigartiges Beispiel der Meteoritenakkumulation. Die vielen antarktischen Funde sind hingegen vom Eis transportiert.

## Meteoritenfälle und -Funde in der Schweiz

Aus der Schweiz sind nur acht verschiedene Meteoriten bekannt, eine geringe Zahl, wenn man sie mit der Fallhäufigkeit vergleicht, oder mit der Anzahl, welche



Abbildung 1: Meteorit «Khawr al Fazra 003» in Fundposition in der Rub' al-Khali-Wüste, Saudi-arabien, Februar 2013. Es handelt sich um einen gewöhnlichen Chondriten von 33g, Typ L6.

in den Gebieten wie Oman, Nordwestafrika oder der Antarktis geborgen werden. Bezogen auf die Fläche entspricht sie jedoch etwa der Zahl bekannter Meteoriten in den umliegenden mitteleuropäischen Ländern. Vier der acht Schweizer Meteoriten sind beobachtete Fälle, alle aus der Zeit zwischen 1901 und 1928 (Abb. 2). Nur vom Meteoriten «Twannberg», einem Eisenmeteoriten, sind mehrere Bruchstücke bekannt geworden.

### Fallphänomene und Argumente für eine Herkunft aus unserem Sonnensystem

Etwas vom faszinierendsten an Meteoriten sind sicher die Phänomene, welche einen Meteoritenfall begleiten. Die Beobachtung und Auswertung von Bahnparametern beim Eintritt in die Erdatmosphäre zeigen, dass Meteoriten aus dem inneren Teil unseres Sonnensystems stammen, vor allem aus dem Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter. Das Abbremsen von Geschwindigkeiten zwischen  $11.2$  und  $72 \text{ km s}^{-1}$  relativ zur Erde zu einer terminalen Fallgeschwindigkeit von einigen  $100 \text{ m s}^{-1}$  (grössenabhängig) erfolgt innerhalb weniger Sekunden und führt



*Abbildung 2:* Der Meteorit Utzenstorf, ein gewöhnlicher Chondrit des Typs H5, gefallen am 16. August 1928. Diese historische Aufnahme aus dem Archiv des Naturhistorischen Museums Bern zeigt den praktisch vollständigen Meteoriten, bevor das kleine Bruchstück für Analysen zersägt wurde. Die Oberfläche zeigt die typische Schmelzkruste mit Fließlinien, welche durch oberflächliches Aufschmelzen beim Durchtritt durch die Atmosphäre entstanden (Naturhistorisches Museum Bern, Inv. Nr. 7057). Die Breite des Meteoriten beträgt 21 cm. Das Hauptstück ist im Naturhistorischen Museum Bern ausgestellt.

zu extremen mechanischen Kräften und Reibungswärme. Diese führen zu einem teilweisen oder vollständigen Aufbrechen und Abschmelzen, des in die Atmosphäre eintretenden Himmelskörpers. Nur Meteoriten mit einer bestimmten Minimalgrösse können dies überstehen und erreichen den Boden. Durch die Fragmentierung von Meteoriten während des Fallereignisses in der Luft entstehen sogenannte Streufelder, typischerweise von elliptischer Form. Solche Streufelder können einige Kilometer bis über 50 km lang sein. Das Fehlen von beobachteten Meteoritenbahnen, welche auf eine Herkunft aus dem äusseren Sonnensystem oder sogar von ausserhalb des Sonnensystems hinweisen würden demonstriert, dass alle Meteoriten aus unserer unmittelbaren Umgebung, also dem inneren Sonnensystem stammen. Die Herkunftskörper sind im Wesentlichen die Asteroiden und in seltenen Fällen der Mond und der Planet Mars. Die Häufigkeit von Meteoritenfällen wird auf rund 80 Ereignisse pro Million Quadratkilometer und Jahr geschätzt, dies gilt für Meteoriten von mindestens 10 g (HALLYDAY ET AL. 1989).

Dies entspricht 3.3 Fällen pro Jahr auf die Fläche der Schweiz. Erstaunlicherweise erfolgte der letzte beobachtete Fall 1928 in Utzenstorf BE (Abb. 2).

### Der Meteoritenfall von Chelyabinsk, Russland, 15.2.2013

Am 15. Februar 2013, 09:20:32 Ortszeit, trat ein Meteorit von rund 20 m Durchmesser mit  $19.16 \text{ km s}^{-1}$  in die Atmosphäre ein und explodierte in einer Höhe von 29.7 km über der Stadt Chelyabinsk im Südrussland (Abb. 3). In einem ellipsoförmigen Gebiet von 80 km Länge gingen Meteoritenbruchstücke nieder. Die Druckwelle der Explosion betraf ein Gebiet, in welchem über eine Million Personen wohnen. Viele Schäden und Verletzungen waren auf die Druckwelle zurückzuführen, von niederfallenden Meteoriten selbst wurde niemand getroffen. Kurz nach dem Fall wurden schon erste Stücke des Meteoriten gefunden, das grösste Objekt von 570 kg wurde aber erst am 16. Oktober 2013 aus dem Tschebarkul-See geborgen. Aufgrund der detaillierten Fallaufzeichnungen mit sogenannten Dashboard-Kameras in Autos wurde dieses Ereignis ungewöhnlich gut dokumentiert und auch quantitativ erfasst (POPOVA ET AL. 2013, BROWN ET AL., 2013, BOROVÍČKA ET AL. 2013). Das Material entspricht einem gut bekannten Meteoriten-Typ: Es handelt sich um einen sogenannten LL-Chondriten, ein Bruchstück eines Asteroiden. Der von der japanischen Sonde Hayabusa besuchte Asteroid Itokawa besteht,



Abbildung 3: Ausschnitte aus einem Youtube-Video des Meteoritenfalls von Chelyabinsk, 15.2.2013. Auf diesen Aufnahmen ist das mehrfache Aufbrechen des Meteoriten in rund 29 km Höhe, verbunden mit explosionsartigem Aufleuchten, gut erkennbar, ebenso das weiterfliegende grösste Objekt, welches im Oktober 2013 aus dem Tschebarkul-See geborgen wurde (Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=AyunWUhyBps>).

wie wahrscheinlich viele weitere Asteroiden, aus demselben Material (NAKAMURA ET AL. 2011).

Kleinere Fälle von Meteoriten sind eine alltägliche Sache. Je grösser aber ein Ereignis, desto seltener sind diese. Im 20. Jahrhundert ereigneten sich zwei besonders grosse Meteoritenfälle, das Tunguska-Ereignis vom 30.6.1908 und der Fall von Sikhote-Alin am 12.2.1947, beide in Russland. Tunguska wird heute als in der Atmosphäre explodierter («Airburst») Steinmeteorit interpretiert, Sikhote Alin war ein Eisenmeteoritenschauer. Die Grösse eines Ereignisses wird üblicherweise anhand der freigesetzten Energie klassifiziert. Tunguska entsprach der Energie von 15 MT (Millionen Tonnen) TNT; 1t TNT entspricht  $4.2 \cdot 10^9$  Joule. Sikhote Alin setzte je nach Quelle eine Energie entsprechend 4–25 kT (Tausend Tonnen) TNT frei. Das Ereignis von Chelyabinsk ist mit 470–590 kT TNT nach Tunguska das zweitgrösste Fallereignis in jüngerer historischer Zeit.

## Meteoritentypen, Mineralogie und Prozesse auf den Herkunftskörpern

Die Klassifikation von Meteoriten entwickelte sich aus der Beschreibung einer erst nur beschränkten Anzahl von Meteoriten. Sie basiert auf wichtigen Merkmalen, welche direkt mit der Entstehung und der Geschichte von Meteoriten zusammenhängen. Chondrite sind Meteoriten, welche aus Bausteinen aufgebaut sind, welche älter sind als die Entstehung der grossen Himmelskörper wie Asteroiden oder gar Planeten. Diese Bausteine sind in den Chondriten anhand von Form und Zusammensetzung immer noch erkennbar. Aus chondritischem Material wurden grössere Protoplaneten aufgebaut, die dann teilweise oder vollständig aufschmolzen. Dabei bildeten sich ein metallreicher Kern und silikatisches Mantel- und Krustenmaterial, analog der Erde. Solche «differenzierten» Himmelskörper sind der Herkunftsort der nicht-chondritischen Meteoriten (Achondrite und Eisenmeteorite). In Meteoriten erkennbare Prozesse, welche auf den Herkunftskörpern abgelaufen sind, sind Metamorphose, (partielle) Aufschmelzung und wässrige Alteration. Die «primitivsten» Meteorite, d.h. die relativ zum Sonnennebel am wenigsten veränderten, sind die kohligen Chondrite vom CI-Typ (C für carbonaceous, I für Ivuna, ein in Tansania gefallener Meteorit dieses Typs). Die Zusammensetzung der CI-Chondrite dient als Referenz-Zusammensetzung des Sonnensystems und wird beispielsweise bei der Interpretation von Analysen irdischer Gesteine als Normierungsbasis eingesetzt (sogenannte Chondrit-normalisierte Analysenwerte). Die Mineralogie der Meteoriten ist grob gesehen sehr ähnlich wie jene irdischer ultrabasischer Gesteine. Aus Meteoriten sind nur relativ wenige Mineralien bekannt geworden, welche auf der Erde nicht bekannt sind, die meisten davon stammen aus chemisch extrem reduzierten Meteoriten.

## Chondrite: Das Geschichtsbuch des frühen Sonnensystems

Chondrite sind die häufigste Meteoritenklasse. Der namensgebende Bestandteil sind die Chondren, kugelige Gebilde von typischerweise 0.2 bis 2 mm Grösse. Diese bestehen aus teilweise rekristallisiertem Mg,Fe-reichem Glas und liegen in einer feinkörnigen Matrix. CI-Chondrite bestehen nur aus einer Serpentin-reichen Matrix, während Chondren fehlen. Während die Matrix der Chondrite als das ursprünglichste Material des Sonnensystems betrachtet wird, werden die Chondren als erstarrte Tropfen einer Silikatschmelze interpretiert, welche durch lokale Aufschmelzung von Staub entstanden sind. Wo und aufgrund welcher Prozesse die Chondrenbildung erfolgt, ist aber bis heute ungeklärt. Ein dritter wichtiger Bestandteil der Chondrite ist Eisen-Nickel-Metall.

Nachdem sich chondritisches Material zu Asteroiden zusammengeballt hatte, wurde es durch eine Reihe von Prozessen wie Metamorphose, Aufschmelzung und Impakt-Prozesse in verschieden starkem Grade verändert (*Abb. 4*). Es wird unterschieden zwischen drei Typen (H, L, LL) von «gewöhnlichen Chondriten», sogenannten «kohligen Chondriten» und einigen weiteren seltenen Typen. Die gewöhnlichen Chondrite machen den Grossteil aller Fälle und Funde aus.

## Eisenmeteoriten: Kerne von Asteroiden

Das Aufschmelzen von grösseren Asteroiden (mindestens einige Kilometer Durchmesser) führte zu einer gravitativen Differentiation. Geschmolzenes Eisen-Nickel-Metall sammelte sich als schwerste Komponente im Zentrum und bildete einen Asteroidenkern, welcher von einer Hülle (Mantel und Kruste) aus Silikaten umgeben war. Fragmente solcher Asteroiden-Kerne sind die Eisenmeteoriten. Einige davon stammen wahrscheinlich auch aus Aufschmelzungszonen, die sich oberflächennah infolge von Impakt-Ereignissen bildeten. Eisenmeteoriten zeigen eine grosse Variabilität in ihrer Zusammensetzung, sowohl was den Nickel-Gehalt angeht, als auch die Spurenelemente. Die charakteristischen Texturen wie die Widmannstätten'schen Figuren sind Entmischungen, welche sich bei der Abkühlung bildeten.

## Achondrite von Asteroiden

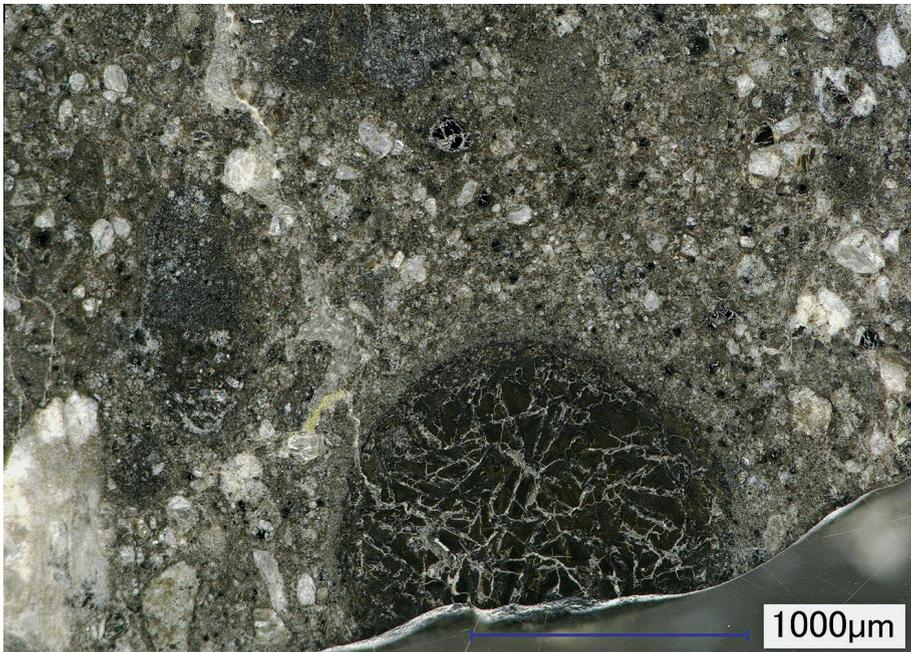
Differentiationsprozesse auf Asteroiden führten zur Ausbildung von drei Haupttypen von magmatischen Meteoriten-Gesteinen: Howardite-Eucrite-Diogenite (HED-Gruppe, bestehend aus Pyroxeniten, Gabbros und Basalten), Aubrite (stark reduzierte, d.h. praktisch Eisen-freie Pyroxenite) und Angrite (Basalte). Diese Gesteine enthalten nur geringe Mengen von metallischem Eisen. Die HED-Meteoriten stammen sehr wahrscheinlich vom Asteroiden Vesta.



*Abbildung 4:* Dünnschliff eines Chondriten (Rumuruti-Typ) aus dem Oman. Dieser Meteorit zeigt sehr deutlich den Effekt vieler Impakttereignisse auf dem Herkunfts-Asteroiden. Das Gestein ist stark zertrümmert (brekziiert), Bruchstücke aus verschiedener Tiefe im Asteroiden (erkennbar an unterschiedlicher Rekristallisation), liegen nebeneinander. Daneben sind deutlich die kugelförmigen Chondren erkennbar. Breite des Dünnschliffes: 34 mm.

## Mars-Meteoriten

Eine spezielle Gruppe von Achondriten zeigt Eigenschaften, welche eine Herkunft vom Planeten Mars höchst wahrscheinlich machen, während andere Herkunftskörper praktisch ausgeschlossen werden können. Das wichtigste Argument für eine Herkunft vom Mars sind Einschlüsse von Gas, deren Zusammensetzung der Marsatmosphäre entspricht. Diese Gruppe zeigt einheitliche, aber von allen anderen Meteoriten abweichende Sauerstoff-Isotopenzusammensetzungen und besteht aus Basalten bis Gabbros (Shergottite), Klinopyroxeniten (Nakhlite), Duniten (Chassignite), einem Orthopyroxeniten und einer Gruppe von gepaarten Meteoriten (Bruchstücke des gleichen Fallereignisses), welche vermutlich kompaktierten Marsboden (Regolith) repräsentieren (*Abb. 5*). Mitte Mai 2014 waren 131 Marsmeteoriten bekannt, welche rund 60 verschiedene Fallereignisse repräsentieren. 27 wurden in der Antarktis gefunden, 99 in heißen Wüsten und 5 sind beobachtete Fälle.



*Abbildung 5:* Ausschnitt einer polierten Fläche des Marsmeteoriten NWA 7907 («Black Beauty»). Dieses Gestein ist eine Art Bodenmaterial (Regolith) mit Gesteinsbruchstücken verschiedenster Herkunft. Das dunkle rundliche Gebilde ist ein Tropfen geschmolzenen Gesteins, welcher aus einem Mars-Meteoritenkrater stammt (Naturhistorisches Museum Bern, Inv. Nr. 42160).

## Mondmeteoriten

Der erste Mondmeteorit wurde unter bereits früher gesammelten antarktischen Proben erst entdeckt, nachdem die Apollo-Missionen Mondgestein zur Erde gebracht hatten. Seither ist die Sammlung von Mondmeteoriten stark gewachsen. Mitte Mai 2014 sind 181 verschiedene Mondmeteoriten bekannt, die rund 100 Fallereignisse repräsentieren. 34 Mondmeteoriten stammen aus der Antarktis, die restlichen aus heissen Wüsten (64 davon aus dem Oman). Der Fall eines Mondmeteoriten wurde noch nie beobachtet. Der grösste Teil der Mondmeteoriten repräsentiert Gesteine, wie sie auch bei den Apollo und Luna-Missionen gesammelt wurden. Am häufigsten sind Anorthosite, d.h. Gesteine, welche vorwiegend aus dem Calcium-reichem Plagioklas-Feldspat Anorthit bestehen. Daneben kommen Mare-Basalte vor. Viele Mondmeteorite sind durch Impact-Ereignisse veränderte Gesteine, am häufigsten Brekzien und Impact-Schmelzen. Da alle Apollo- und Luna-Missionen Material aus einem relativ kleinen Gebiet des Mondes zur Erde brachten, sind die Mondmeteoriten eine wichtige Ergänzung, da sie ein «statistisches Mittel» der Mondoberfläche repräsentieren.

## Meteoritenkrater und ihre Produkte

Impakt-Prozesse, d.h. alle Ereignisse, welche mit dem Einschlag grosser Himmelskörper zusammenhängen, sind heute die einzigen geologischen Prozesse auf Asteroiden und auch weitaus die dominantesten auf dem Mond und Mars. Entsprechend sind Impakt-Prozesse für das Verständnis vieler Meteoriten von Bedeutung. Viele Meteoriten sind Gesteine, welche durch Impakt-Prozesse stark verändert wurden (Brekzien, Brekzien mit Schmelzanteilen, geschockte Gesteine), häufig auch mit Schock-produzierten Hochruckphasen wie z.B. Ringwoodit, einer Hochdruckphase von Olivin mit Spinellstruktur. Die Schockeffekte, welche in Meteoriten beobachtet werden können, sind dieselben, welche auch in terrestrischen Gesteinen in der Nähe von Meteoritenkratern vorkommen. Für die Bildung von Meteoritenkratern ist die hohe kinetische Energie von Meteoriten bei hoher Geschwindigkeit ausschlaggebend. Impakt-Ereignisse mit Geschwindigkeiten von mindestens  $11.2 \text{ km.s}^{-1}$  auf der Erde führen zu einer praktisch vollständigen Verdampfung (kurzzeitige Umwandlung in ein Gas) des Meteoriten. Die aus der Volumenexpansion resultierende Explosion ist im Wesentlichen für die Kraterbildung verantwortlich. Vom Meteoriten bleibt bei einem solchen Ereignis typischerweise nichts Erkennbares übrig, in den aufgeschmolzenen Gesteinen kann jedoch oft eine meteoritische chemische Signatur nachgewiesen werden (z.B. erhöhte Iridium-Gehalte). Nur bei den kleinsten Kratern (einige 10er Meter Durchmesser) findet man häufig Reste des Einschlagkörpers, in diesem Fall meist Eisen. Damit ein Krater entstehen kann, muss ein Meteorit mit kosmischer Geschwindigkeit, d.h. von der Atmosphäre im Wesentlichen ungebremst auf die Erdoberfläche treffen. Nur dann ist die kinetische Energie gross genug, um einen Explosionskrater entstehen zu lassen. Kleine Meteoriten geben ihre Energie vollständig in der Atmosphäre ab und fallen mit geringer Geschwindigkeit (normale Fallgeschwindigkeit im Gleichgewicht mit Luftwiderstand), es entstehen deshalb keine Krater, und die Meteoriten bleiben erhalten.

Die Häufigkeit von Meteoritenkratern auf der Oberfläche verschiedener Himmelskörper ist im Wesentlichen vom Alter der Oberfläche abhängig. Eine abnehmende Kraterdichte von Mond und Merkur > Mars > Venus > Erde ist bedingt durch eine zunehmende geologische Aktivität auf diesen Körpern. Auf der Erde sind nur rund 200 Impakt-Strukturen bekannt, weil sie durch Verwitterung und tektonische Prozesse meist über geologisch kurze Zeiträume zerstört werden.

## Wie sind Meteoriten erkennbar?

Oft werden Objekte gefunden und für Meteoriten gehalten. Viele landen dabei zur Bestimmung auf dem Pult von Experten in Museen oder Universitäten. Einige einfache Kriterien erlauben es, mögliche Meteoriten von Objekten zu trennen,

welche sicher keine sind. Meteoriten zeigen oft die folgenden Eigenschaften (aber nicht immer alle gleichzeitig):

- Magnetismus
- Dünne, dunkle Kruste an der Oberfläche (Schmelzkruste), in Innern sind sie heller
- Aufbau aus 0.2–2 mm grossen Kügelchen
- Eisenmeteoriten besitzen ein hohes spezifisches Gewicht, sind magnetisch und oft rostig
- Die Oberfläche ist oft gerundet, ohne scharfe Kanten

Sicher keine Meteoriten sind Objekte mit folgenden Eigenschaften:

- Auffällig hohes spezifisches Gewicht, metallisch, aber nicht magnetisch
- Dunkle Objekte, magnetisch, mit vielen Löchern im Innern
- Deutlich rostige Objekte, die aber nicht magnetisch sind
- Hohle Steine
- Vollständig aus Glas bestehende Objekte

Meteoritenfunde sind überall möglich, und fragliche Objekte sollten geprüft werden!

## Zitierte Literatur

- BOROVÍČKA, J., SPURNY, P., BROWN, P., WIEGERT, P., KALENDA, P., CLARK, D., and SHRBNY, L., 2013. The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor. 35–237.
- BROWN, P. G., ASSINK, J. D., ASTIZ, L., BLAAUW, R., BOSLOUGH, M. B., BOROVÍČKA, J., BRACHET, N., BROWN, D., CAMPBELL-BROWN, M., CERANNA, L., COOKE, W., GROOT-HEDLIN, C. D., P.DROB, D., EDWARDS, W., EVERS, L. G., GARCÉS, M., GILL, J., HEDLIN, M., KINGERY, A., LASKE, G., PICHON, A. L., MIALLE, P., MOSER, D. E., SAFFER, A., SILBER, E., SMETS, P., SPALDING, R. E., SPURNY, P., TAGLIAFERRI, E., UREN, D., WERYK, R. J., WHITAKER, R., and KRZEMINSKI, Z., 2013. A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. 238–241.
- HALLIDAY, I., BLACKWELL, A. T., and GRIFFIN, A. A., 1989. The flux of meteorites on the Earth's surface. 173–178.
- HOUTERMANS, F. G., 1953. Determination of the age of the Earth from the isotopic composition of meteoritic lead. 1623–1633.
- NAKAMURA, T., NOGUCHI, T., TANAKA, M., ZOLENSKY, M. E., KIMURA, M., TSUCHIYAMA, A., NAKATO, A., OGAMI, T., ISHIDA, H., UESUGI, M., YADA, T., SHIRAI, K., FUJIMURA, A., OKAZAKI, R., SANDFORD, S. A., ISHIBASHI, Y., ABE, M., OKADA, T., UENO, M., MUKAI, T., YOSHIKAWA, M. and KAWAGUCHI, J., 2011. Itokawa dust particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. 1113–1116.
- POPOVA, O. P., JENNISKENS, P., EMEL'YANENKO, V., KARTASHOVA, A., BIRYUKOV, E., KHAIBRAKHMANOV, S., SHUVALOV, V., RYBNOV, Y., DUDOROV, A., GROKHOVSKY, V. I., BADYUKOV, D. D., YIN, Q.-Z., GURAL, P. S., ALBERS, J., GRANVIK, M., EVERS, L. S. G., KUIPER, J., KHARLAMOV, V., SOLOVYOV, A., RUSAKOV, Y. S., KOROTKIY, S., SERDYUK, I., KOROCHANSEV, A. V., LARIONOV, M. Y., GLAZACHEV, D., MAYER, A. E., GISLER, G., GLADKOVSKY, S. V., WIMPENNY, J., SANBORN, M. E., YAMAKAWA, A., VEROSUB, K. L., ROWLAND, D. J., ROESKE, S., BOTTO, N. W., FRIEDRICH, J. M., ZOLENSKY, M. E., LE, L., ROSS, D., ZIEGLER, K., NAKAMURA, T., AHN, I., LEE, J. I., ZHOU, Q., LI, X.-H., LI, Q.-L., LIU, Y., TANG, G.-Q., HIROI, T., SEARS, D., WEINSTEIN, I. A., VOKHMINTSEV, A. S., ISHCHENKO,

- A. V., SCHMITT-KOPLIN, P., HERTKORN, N., NAGAO, K., HABA, M. K., KOMATSU, M. and MIKOUCHI, T., 2013. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization. 1069–1073.
- RUBIN, A. E. and GROSSMAN, J. N., 2010. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. 117–125.