

Einleitung

Meteorite sind Gesteinsbruchstücke, die aus dem Weltall auf die Erde fallen. Sie sind für Wissenschaftler von großer Bedeutung, erlauben sie doch den direkten analytischen Blick auf unterschiedliche extraterrestrische Himmelskörper. Seit vielen Jahren ist es möglich, einige dieser Gesteinsproben eindeutig dem Mars oder zum Beispiel dem Mond als Herkunftsort zuzuordnen. Bisher wurden ca. 40 Mars-Meteoriten identifiziert. Aufgrund von statistischen Berechnungen ist davon auszugehen, dass unter der Vielzahl der bisher gefundenen Meteoriten bzw. Meteoritenteile auch einige vom Merkur stammen müssten. Bisher wurde aber noch keine Probe vom Merkur bewiesen. In unserem "Jugend Forscht" Projekt versuchen wir einen solchen Meteoriten zu identifizieren. In Frage kommen dabei insbesondere Gesteinsproben aus der Gruppe der Angrite, die sich durch eine besondere Mineralogie und Geochemie auszeichnen.

Angrit Meteorit NWA2999 - Unbekannte Herkunft

Sarah Rosenblatt und Lukas Schneider

Weird Science Club

Lichtenbergschule Darmstadt

nicht-kristallin und oder haben eine kubische Kristallstruktur und sind damit optisch isotrop. Die mikroskopische Untersuchung lieferte uns über diese Phasen also zwei Informationen. Sie waren grün-gräulich beziehungsweise rötlich und besaßen eine kubische Kristallstruktur. Diese Eigenschaften deuteten auf das häufig in geringen Mengen in irdischen Gesteinen vorkommende Oxid-Mineral Spinell hin. Dies konnten wir später mit einer elektronenmikroskopischen Analyse bestätigen.

Nicht nur die isotropische Eigenschaft des Spinells fiel uns auf, sondern auch dessen charakteristische Umgebung, in einer Korona. Um die Bestandteile der Korona zu identifizieren schauten wir sie uns unter dem Polarisationsmikroskop genauer an. Wir erkannten im Zentrum eine im polarisierten Licht blau-gräulich erscheinende Phase.

Hierbei handelte es sich wahrscheinlich um das Silikatmineral Feldspat. Diese Tatsache ließ uns auf eine Reaktion von Feldspat zu Spinell schließen. Die Reaktion von Feldspat zu Spinell sieht in erster Näherung folgendermaßen aus:

MINT-EC dass eine genaue Berechnung nicht im Rahmen unserer Möglichkeiten liegt. Wir versuchten, den Fehler der Berechnung gering zu halten, indem wir möglichst viele physikalische Phänomene berücksichtigten, um zu einer guten

Herleitung

Annäherung, zu gelangen.

Die hier verwendete Druckgleichung lässt sich per Integralrechnung herleiten. Hierzu schneidern wir einen homogenen Planeten in Gedanken in dünne Scheiben, deren Anzahl gegen unendlich geht. Das Gewicht jeder einzelnen Scheibe ist gleich dem Produkt aus deren Dicht und deren Volumen. Der Druck, den diese Scheibe auf die darunterliegenden auswirkt, nimmt mit steigender Entfernung zum Körpermittelpunkt aufgrund der ebenfalls steigenden Anziehungskraft zu. Um nun Scheibe für Scheibe - und somit den von jeder einzelnen Scheibe ausgewirkten Druck - über einem gewissen Punkt im Inneren des Planeten von oben nach unten aufzuaddieren, verwenden wir die Integralrechnung. Integriert man nun, so erhält man nach Umformen unsere Druckgleichung:

Die untersuchte Gesteinsprobe

In unserem Projekt geht es hauptsächlich um die Gesteinsprobe NWA2999 (Nord-West-Afrika Nummer 2999). Diese Probe wurde 2004 von einem Sammler namens G. Hupé in Marokko oder Algerien gefunden (genaue Fundstelle unbekannt). Die von uns untersuchte Probe ist eines von 12 Teilen eines 392g schweren dunkelbraunen Steins. Sie hat eine durchschnittliche Korngröße von 0,1mm bis 0,5mm. Sie enthält, so wie alle 12 Teile größere Phasen (0,6mm) von Plagioklas (Feldspatgruppe). Seine heterogene Textur, die typisch für Tiefengesteine ist, weist des Weiteren große Anteile an Anorthit (Feldspat), Spinell und Olivin auf. Typisch für einen solchen Angrit ist außerdem das Verhältnis der drei stabilen Sauerstoffisotopien: 16O, 17O und 18O. Während 16O auf der Erde mit 99,76%,17O mit 0,037% und 18O mit 0,202% auftreten, findet man 180 hier mit einer Abweichung von 3,839-4,154‰ und 17O mit einer Abweichung von 1,974-2,095‰.

Das natürliche Verhältnis der drei stabilen Sauerstoffisotope mit unterschiedlichem Atomgewicht (160 = 15,9949, 170 = 16,9991, 180 =17,9992) wird vom 16O dominiert (99,76%), die schwereren Isotope sind mit nur 0,037% (170) und 0,20% (180) beteiligt. Freier Sauerstoff zeigt in der Atmosphäre ein konstantes Isotopenverhältnis. Gelöster Sauerstoff im Meer zeigt tiefenabhängige Änderungen mit einem Maximum von schwerem 180 im Bereich geringster Sauerstoffkonzentrationen; dies beruht auf der bevorzugten organischen Zehrung der leichten Isotope bei dem Abbau von absinkenden organischen Partikeln in der Wassersäule.

Genauso verhält es sich mit Sauerstoff, der in Gestein gelöst ist. Auch hier schwankt das Verhältnis in irdischem Gestein lediglich massenabhängig. Die Werte des Verhältnisses der drei stabilen Sauerstoffisotope in irdischem Gestein liegen also in einem Koordinatensystem auf einer Gerade, der massenabhängigen Fraktionierungslinie. Diese besagt, dass die drei Isotope des Sauerstoff nur abhängig von ihrem jeweiligen Masseunterschied (der eine Konstante darstellt) von einander abgetrennt werden können. Auch auf fremden Himmelskörpern gilt dieser massenabhängige Grundsatz. Damit gibt es Geraden, welche die Verhältnisse der Sauerstoffisotope auf dem Mars, dem Mond oder der Erde widerspiegeln.

Es existiert ebenfalls eine solche Grade für

CaAlSi308 + (Mg,Fe)2Si04 \rightarrow (Mg,Fe)Al204 + (Mg,Ca,Fe)Si03 In Worten: Feldspat + Olivin -> Spinell + Klinopyroxen

Experimentelle Arbeiten zu dieser Reaktionsgleichung zeigen, dass diese Reaktion einen konstanten, lang anhaltenden Druck von 9 kbar benötigt [6].

Der benötigte Druck verringert sich allerdings wahrscheinlich um wenige kbar durch die von uns gemessene Anwesenheit von Chrom und Ti im Spinell, die in der Grafik nicht berücksichtigt wurde. In Anbetracht dessen, dass Kollisionen mit anderen Asteroiden keinen langanhaltenden Druck in diesem Ausmaß verursachen können, musste dieser Druck aus dem inneren Druck des Probenursprungsbereiches (z.B. im Inneren eines Planeten oder Kleinplaneten) resultieren.

(diop, en)" [8]

Abb.2 "Druck-Temperatur-Diagramm der experimentelle Arbeiten zur Reaktion zwischen Feldspat (an), Olivin (fo), Spinell (sp) und Pyroxen

Energiedispersive Elektronenmikroskopie

sichtbaren Phasen tatsächlich die vermuteten

erlangen. Aus diesem Grund haben wir eine

Analyse mit einer Mikrosonde durchgeführt.

polierten 30 µm dicken Schliff geschnitten.

Wir haben unter dem Polarisationsmikroskop

Dafür wurde die Gesteinsprobe in einen

Gewissheit, dass die lichtmikroskopisch

Minerale enthalten, ist durch reines

Mikroskopieren nicht abschließend zu



zwei unterschiedliche Stellen mit einer Korona ausgesucht um die vermuteten Bestandteile zu bestätigen.

Bei jeder dieser Stellen haben wir Messpunkte auf die verschiedenen Phasen gesetzt (Abb.10, Abb.11). Mit der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX) haben wir zuerst eine Übersicht über die enthaltenen Elemente bekommen, auch um abschätzen zu können, ob die Messpunkte die gewünschten Phasen zeigen.



Gravitationsänderung Über das erste zu berücksichtigende Phänomen erfuhren wir über ein Online-Skript von Courtney Seligman [7]. Dieses Skript schrieb über die Besonderheit der Gravitation. Umso näher man dem Kern kommt, umso mehr "Gegen-Gravitation" erfährt man. "Gegen-Gravitation" meint hierbei, dass das darüber befindliche liegende Gestein dem gleichen Gravitationsgesetz folgt und der Anziehung des Kerns entgegenwirkt.

Dichtediskrepanz

Bei dieser Rechnung wird von einer perfekten Kugel mit einer konstanten Dichte ausgegangen. Kein Himmelskörper ist so aufgebaut. Die Dichte innerhalb des Himmelskörpers ändert sich im Kern. Also können wir für eine präzise Berechnung an verschiedenen Stellen nicht mit dergleichen Dichte weiterrechnen. Wir setzen die Dichte ein, um diese in unserem Program eingeben zu können. Die Masse wird nicht mehr benötigt.



Mit dieser Formel kann man die mittlere Dichte ermitteln, wenn man die Dichten und Volumenverhältnisse der einzelnen Schichten kennt. Hierbei werden nur die Schichten berücksichtigt, die zwischen Messpunkt und Mittelpunkt liegen. In der Skizze sind diese Schichten innerhalb des kleineren Kreises. Die Dichte wird in die Formel so eingesetzt, dass sie die Dichte des gesamten Körpers repräsentiert. Dies ist allerdings kein Fehler, sondern ist eine legitime Vorgehensweise, da die Schichten außerhalb des Messpunkts in der Berechnung nicht berücksichtigt werden [7]. Die Druckwirkung der Schichten heben sich auf.



Mars

Gesteinsproben, deren Herkunftsort man als Vesta vermutet. Doch diese ist keines Falls bestätigt. Es ist nicht möglich diese Gerade für einen Planten, den wir mit unseren Mitteln noch nicht besuchen können, zu bestätigen. Für unser Projekt dient das Verhältnis der $\delta^{6}_{0,0}$ Sauerstoffisotope in den Gesteinsproben nur

um zu zeigen, dass die Angrite alle von einem einzigen Mutterkörper stammen, der weder Erde, Mond, Mars noch Vesta sein kann. Ein direkter Beleg für einen Ursprung vom Merkur ist dies nicht zwangsläufig. Es galt nun neue Wege für die Identifizierung zu finden.

Untersuchungen und Ergebnisse

Unser erstes Treffen fand mit Prof. Dr. Frank E. Brenker und Prof. Dr. Raphael Ferreiro Mählmann in den Räumlichkeiten der TU Darmstadt statt. Hier besprachen wir, wie die Untersuchung unserer Gesteinsprobe vorgenommen werden soll. Mit dem Lichtmikroskop wird zuerst nach interessanten Bestandteilen gesucht und eine ungefähre Identifikation der Gesteinsbestandteile vorgenommen. Mit etwas Übung und Erfahrung kann man über das Aussehen, die Farbe und das Verhalten unter dem Polarisationsfilter bereits konkrete Vermutungen vornehmen, die anschließend mit dem Elektronenmikroskop überprüft und bestätigt werden können.

Auf- und Durchlichtmikroskopie

Um einen groben Überblick zu bekommen, begutachteten wir die Probe unter einem Lichtmikroskop, sowohl im Durchlicht- als auch im Auflichtmikroskopiermodus. Dabei suchten wir die Probe hauptsächlich nach Schockadern ab. Schockadern sind sichtbare Stagnationen der Reaktionen innerhalb einer Gesteinsformation, wie sie bei kurzzeitigem Druck, zum Beispiel bei einer Asteroidenkollision, entstehen. Unter dem Lichtmikroskop erkannte man eine große Phasenvielfalt in den Gesteinsproben, wir fanden aber keine Schockadern. Dennoch ist es nicht ausgeschlossen, dass die Probe einst einer Kollision ausgesetzt gewesen war.

Polarisationsmikroskopie

Richtig interessant wurde die Untersuchung als wir den Polarisationsfilter des Mikroskops benutzt haben. Unter dem Polarisationsmikroskop sah die Probe noch viel phasenreicher aus, als bei bloßer unpolarisierter Lichtbeleuchtung. Man erkannte beim Drehen des Probentischs immer mehr Phasen. Besonders bunte Phasen, wie sie typisch für Olivine sind, sowie etwas weniger bunte Phasen, die eher auf Pyroxene deuten und schließlich graue Phasen, die vermutlich Feldspat darstellen. Es hat nicht lange gedauert, bis wir uns mit dem Mikroskop so gut zurecht fanden, so dass wir die Probe besser analysieren konnten. Wir erkannten immer mehr Details und konnten schon bald die verschiedenen Phasen unterscheiden. Uns fiel ein besonderer Bestandteil auf. Wir fanden eine grün-gräuliche und eine rötliche Phase, die mit polarisiertem Licht in jeglicher Ausrichtung schwarz erschien. Diese Phase beeinflusste den Fortgang unsers Projekts erheblich. Phasen, die in jeder Ausrichtung schwarz erscheinen, sind entweder

Wellenlängendispersive Elektronenmikroskopie

Wir haben die Wellenlängendetektoren dann auf die standardisierten Elemente kalibriert und sie gemessen. Hierbei konnten unsere vorher angestellten Voruntersuchungen im Wesentlichen bestätigt werden. Eine wichtige Komplikation wurde anhand der quantitativen Messungen allerdings auch deutlich. Der Elementumsatz der an der Reaktion beteiligten Phasen ist nicht vollständig, das heißt, die Reaktion ist nicht isochem. Die beiden Reaktionsprodukte weisen erhöhte Konzentrationen von Cr und Ti auf. Beide Elemente kommen in den Ausgangsphasen nicht in für uns messbaren Konzentrationen vor. Während der Reaktion werden diese Elemente zugeführt. Am wahrscheinlichsten ist das Transportmedium eine Fluidphase, die auch in der Lage wäre die Reaktion zu stimulieren. Aus irdischen Gesteinen ist bekannt, dass höhere Cr-Werte in einem Gestein die Stabilitätsgrenzen von Spinell erweitern, da dieser dieses Element gut in seine Struktur aufnehmen kann. Wir müssen also davon ausgehen, dass die bisherige Druckabschätzung von ca. 9kbar im Modellsystem um einige wenige kBar vermindern wird. Obwohl es sich hierbei im Augenblick nur um Schätzwerte handeln kann wurde dies in der folgenden Berechnung der Minimalgröße eines geeigneten Asteroiden oder Zwergplaneten oder Planeten berücksichtigt.



Abb. 3 " NWA2999 Messpunkt A an der Mikrosonde"

Berechnung des inneren Drucks

Um den Herkunftsort von NWA2999 eingrenzen zu können, beschäftigten wir uns mit den Druckverhältnissen im Inneren von verschiedenen Asteroiden, Meteoriden und (Klein-)Planeten unseres Sonnensystems. Nur bei ausreichend hohem Druck, der über einen längeren Zeitraum besteht, kann die von uns identifizierte Reaktion von Feldspat und Olivin zu Spinell und Klinopyroxen ablaufen. Wir mussten feststellen, dass sich nur sehr schwierig ausführliche Angaben über den inneren Druck existierenden und theoretischen Himmelskörpern einer angenommenen Größe finden ließen. Es galt also, selbst Berechnungen über den Inneren Druck vorzunehmen um damit eine Idee zur Mindestgröße eines Kleinplaneten zu erhalten, der in der Lage wäre den geschätzten Druck von einigen kBar aufzubauen. Den höchsten inneren Druck vermuteten wir im Mittelpunkt des Körpers, also der größtmöglichen Tiefe. Aus dem Mittelpunkt kann unsere Probe eines differenzierten Gesteins aber nicht stammen, da der Mittelpunkt von dichte-diskreten Himmelskörpern einen metallischen Kern aufweist, aber unsere Probe aus nichtmetallischem Material besteht. Somit vermuten wir den höchst möglichen, für die Reaktion zur Verfügung stehenden inneren Druck, an der Grenze des Kerns zum Mantel. Je mehr Literatur wir über den inneren Druck eines kugelförmigen Objektes gelesen hatten, desto komplizierter erschien uns die Berechnung. Uns ist jetzt klar,

Ergebnis

Nach unserer Berechnung muss der Mutterkörper des Angrits NWA2999, bei einer Dichte von 6000-7000 kg/m³ im Kern, einen Mindestradius von 420-490km haben. Dann würde der Planet die Druckbedingung (~ 9kBar) mit 9,06kBar erfüllen. Selbst wenn der Druck der Reaktion aufgrund des Chromgehalts auf 5kBar sinkt, wird immer noch ein Radius von 310-370km benötigt. Bei dieser Berechnung haben wir einen fiktiven Planeten betrachtet, dessen Verhältnis von Kern- und Gesamtradius 0.5 beträgt, wie es für die terrestrischen Planeten unseres Sonnensystems üblich ist. Merkur hat heutzutage ein Verhältnis von Kern- zu Gesamtradius von ungefähr 0.8. Aufgrund dieser Anomalie ist anzunehmen, dass Merkur einst größer gewesen ist und einen Radius bei einem Verhältnis von 0.5 von ungefähr 3800km hatte. Das. Das Gestein, das sich von Merkurs heutiger Oberfläche abgelöst hat, könnte der Ursprung von NWA2999 sein. Die Druckberechnung bei den früheren Bedingungen an der heutigen Oberfläche (2440km) bei einer mittleren Dichte von 5427kg/m³ ergibt ca. 350kBar. Dieser Druck wäre folglich ausreichend für die untersuchte Reaktion.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Prof. Dr. Frank E. Brenker (Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main), der uns dieses Projekt ermöglichte. Dafür und für seine zeitaufwendige Betreuung danken wir ihm ganz herzlich. Des Weiteren bedanken wir uns bei unserem betreuenden Lehrer Dr. Martin Geider und dem gesamten Weird Science Club für die tatkräftige Unterstützung.

Literaturverzeichnis

Abb. 4 " NWA2999 Messpunkt B an der Mikrosonde"

[1] http://www.geodz.com/deu/d/Polarisationsmikroskopie [2] http://www.geologieinfo.de/mineralgruppen/index.html [3] http://chemie.degruyter.de/riedel/index.html#data/mineral/04/022/image.jpg [4] Antje Bergmann (2003): http://www.physik.uniregensburg.de/forschung/schwarz/Mikroskopie/07-Polarisations-Lichtmikroskopie.pdf [5] http://meteoritics.org [6] http://adsabs.harvard.edu [7] Courtney Seligman: http://cseligman.com/text/planets/internalpressure.htm [8] Presnal (1976): Druck-Temperatur-Diagramm der experimentelle Arbeiten zur Reaktion zwischen Feldspat (an), Olivin (fo), Spinell (sp) und Pyroxen (diop, en) [9] Raphael, Achim (2010, unveröffentlicht), siehe: http://www.aranemac.de/mets/special/isotopes/oplot.html [10] Scheffer, Fritz (1984): Lehrbuch der Bodenkunde/Scheffer/Schachtschabel, 11. Auflage, Enke-Verlag Stuttgart [11] Wittke, James (University of Arizona, unveröffentlicht): http://www4.nau.edu/meteorite/Meteorite/Angrite.html