

Ergebnisse der Untersuchung von Mondgesteinen

Autor(en): **Engelhardt, W.v.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali**

Band (Jahr): **150 (1970)**

PDF erstellt am: **17.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-90691>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ergebnisse der Untersuchung von Mondgesteinen

Prof. W. v. ENGELHARDT

Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität Tübingen

Seit der Zeit der ionischen Naturphilosophen vor 2500 Jahren hat die Frage, aus welchem Stoff der Mond besteht und wie er entstanden ist, immer wieder die Gedanken und die Phantasie der Naturforscher bewegt. Ist er doch der nächste Himmelskörper, eine Brücke zwischen der Erde und der fernen Welt der Sterne, das einzige Objekt am Himmel, an dem man schon mit blossem Auge Einzelheiten der Oberflächenstruktur erkennen kann. Philosophen und Astronomen der Alten Welt haben sich darüber gestritten, wie diese Formen zu deuten seien, in denen alte Mythen und Märchen eine menschliche Gestalt oder ein Gesicht zu erkennen glaubten. In der Neuzeit rückte der Erdtrabant durch die Erfindung des Fernrohrs in eine grössere Nähe. Als erster betrachtete GALILEI 1610 den Mond durch ein Teleskop. Er erschien ihm als ein runder, fester, von der Sonne erleuchteter Körper, dessen Oberfläche von Höhlungen und schattenwerfenden Bergen bedeckt ist. Man begann dann Karten des Mondes zu entwerfen, die mit der Verbesserung der Instrumente, der Anwendung der Photographie und neuerdings schliesslich durch den Einsatz unbemannter Raumfahrzeuge vom Ranger- und Orbitertyp immer genauer wurden. Heute ist die Topographie der uns zugekehrten Seite des Mondes genauer bekannt als manche Teile der Erdoberfläche.

So exakt man aber auch alle Einzelheiten der Mondlandschaften registrierte und vermäss, die Natur der Stoffe, die diese Formen aufbauten, blieb unbekannt, und bis in unsere Tage umstritten waren die Kräfte und Vorgänge, welche die Oberfläche des Mondes gestaltet haben.

Abbildung 1 zeigt die Ansicht des Mondes in einem grossen Teleskop. Deutlich treten die schon mit blossem Auge erkennbaren helleren und dunkleren Gebiete hervor. Da man sie ursprünglich als Ozeane ansah, heissen die dunklen, oft kreisförmig begrenzten Gebiete Meere (Maria), die helleren Flächen Hochländer (Terrae). Die Maria sind Senken mit einer verhältnismässig glatten Oberfläche, die 1000–2000 m tiefer liegt als die angrenzenden Hochländer. Die letzteren haben ein gebirgiges Relief, das insbesondere durch zahlreiche Rundstrukturen verschiedener Grösse, die sogenannten Krater, geformt ist. Da die Dichte der Krater auf den Hochländern sehr viel grösser ist als auf den Meere-Ebenen, liegt der Schluss nahe, dass die Hochländer besonders alte Teile der Mondoberfläche sind, während die Maria später entstanden.

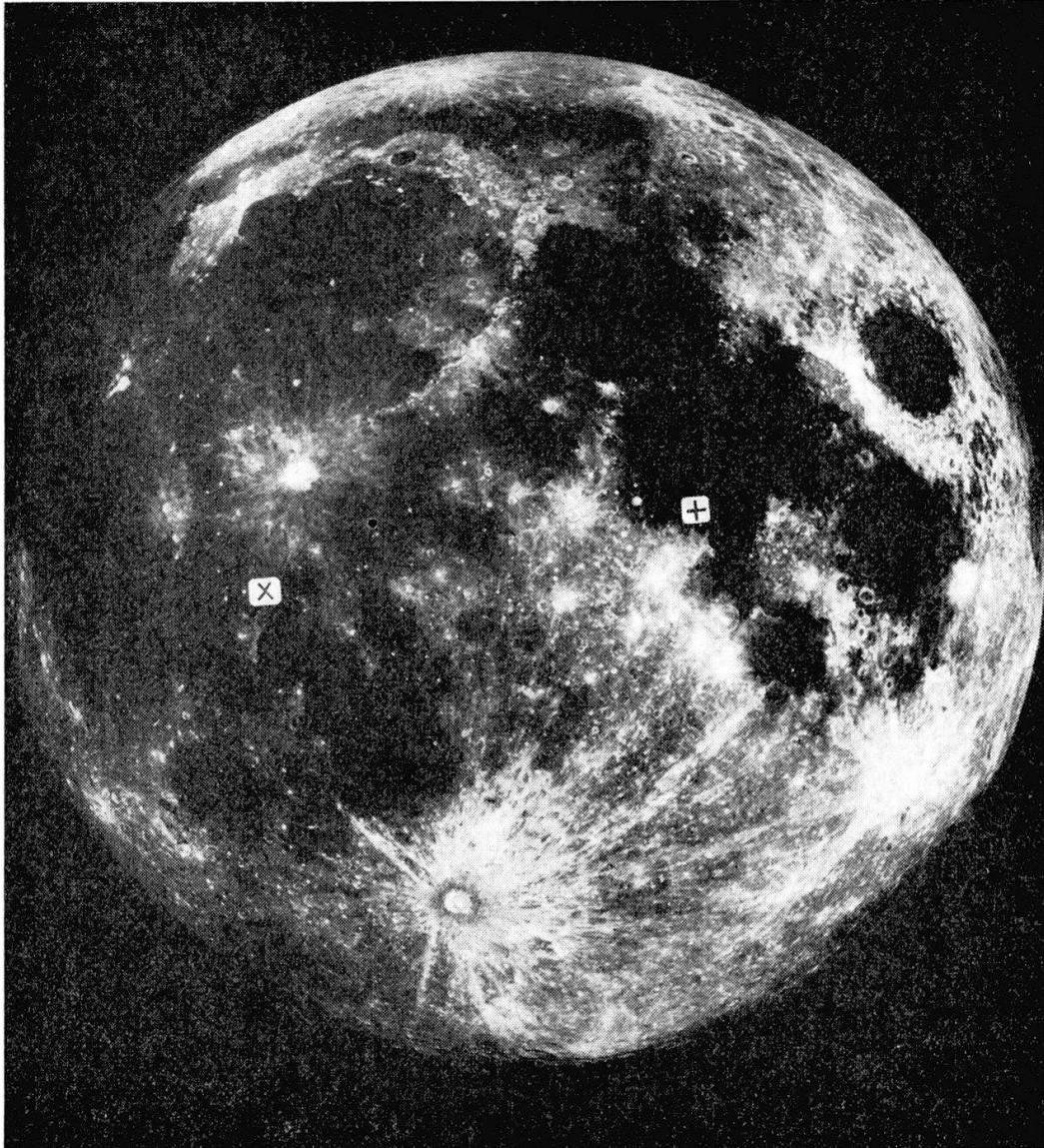


Abbildung 1

Teleskopische Ansicht des vollen Mondes. Dunkel erscheinen die tiefer liegenden Maria oder «Meere», hell die Hochländer oder Terra-Gebiete mit zahlreichen Kratern. Von mehreren grossen Kratern gehen Strahlensysteme aus, die sich über weite Bereiche der Mondoberfläche verbreiten, so vor allem vom Krater Tycho in der Nähe des Südpols (NASA-Aufnahme)

- + Landestelle von Apollo 11 im Meer der Ruhe (Mare Tranquillitatis)
- × Landestelle von Apollo 12 im Meer der Stürme (Mare Procellarum)

Hypothesen über die Bildung der Oberflächenformen des Mondes haben früh schon an den Kratern angesetzt, welche den Mond wie Pockennarben bedecken. Einer der ersten Mondbeobachter, der Engländer ROBERT HOOKE, gab bereits 1667 die zwei möglichen Erklärungen für die Entstehung dieser Gebilde. Sie haben seither als Modelle aller Mond-

theorien gedient: HOOKE zeigte durch einfache Versuche, dass krater-ähnliche Rundstrukturen entweder durch den Einschlag von Geschossen, d.h. also von aussen her, oder durch den Ausbruch von Gasen und Flüssigkeiten von innen, d.h. durch vulkanische Vorgänge, erzeugt werden können.

Da Rundstrukturen auf der Erde fast immer vulkanischer Natur sind, hat man in der Folgezeit bis in die fünfziger Jahre unseres Jahrhunderts an dem vulkanischen Ursprung der Mondkrater kaum gezweifelt, zumal auf den Mare-Oberflächen Strukturen beobachtet wurden, die offensichtlich erstarrte Lavaströme sind. Im Urteil der Wissenschaft waren diejenigen Forscher Aussenseiter, welche – wie z.B. der amerikanische Geologe GILBERT (1893) – das erste Hookesche Modell vertraten und die Entstehung der Mondkrater durch den Einfall kleiner und grosser Meteorite erklärten.

Vollkommen ungewiss blieb bis in unsere Jahre die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Gesteine, aus denen die Mondoberfläche besteht. Die Untersuchung des vom ganzen Mond und von bestimmten Bereichen seiner Oberfläche reflektierten Sonnenlichtes brachte keine sicheren Resultate. Die Helligkeitsunterschiede von Hochländern und Meeren können entweder durch Unterschiede der Rauigkeit oder Korngrösse oder durch eine verschiedene chemische Zusammensetzung verursacht sein.

Seit dem gelungenen Apollo-11-Unternehmen im Juli 1969 erscheinen alle diese Fragen in einem neuen Licht. Es handelt sich nicht mehr darum, auf schmaler empirischer Basis geistreiche Hypothesen zu konstruieren, die letztlich unüberprüfbar blieben. Wir können nun die Gesteine des Mondes in die Hand nehmen, und wir können sie mit den exakten Methoden der modernen Naturwissenschaften im Sinne chemischer, physikalischer, mineralogischer und geologischer Fragestellungen untersuchen.

Mancher, der die grauen Gesteinsstücke betrachtet, die ARMSTRONG, ALDRIN und COLLINS vom Mond zurückbrachten, wird enttäuscht sein, dass sie gar nicht absonderlich und phantastisch aussehen, sondern so wie unscheinbare Steine, die man irgendwo auf der Erde auflesen kann. Man sollte sich heute an die Zeit erinnern, als griechische Naturphilosophen zuerst versuchten, darüber nachzudenken, woraus der Mond bestehe. Herrschend war in der Alten Welt die in den Schulen des ARISTOTELES und der Stoiker gelehrte Meinung, dass der Mond wie Sonne und Sterne aus himmlischer, ätherisch-feuriger Substanz bestünde. Im Gegensatz dazu meinte der Ionier ANAXAGORAS, der um 500 vor Christus lebte, aus der steinartigen Natur der Meteoriten, die vom Himmel auf die Erde fallen, schliessen zu können, dass auch der Mond aus Stein bestehe, aus einer dunklen, erdartigen Substanz, die ihr Licht vom Abglanz der Sonne erhält. Das waren damals ketzerische Spekulationen eines einsamen Mannes. Er wurde in Athen der Gottlosigkeit angeklagt und starb in der Verbannung.

Dass wir heute die Steine vom Mond in der Hand haben und erkennen können, dass sie wirklich erdartig, der Erde verwandt sind, wie ANAXA-

GORAS meinte, ist das Resultat des grössten technisch-wissenschaftlichen Gemeinschaftsunternehmens, das bisher von Menschen unternommen wurde. Zehntausende von Technikern und Wissenschaftern, zusammengefasst in einer bewunderungswürdigen Organisation, haben es ermöglicht, dass Menschen den Mond betreten konnten. Von den 20 kg Mondboden, die die Astronauten vom Apollo-11-Flug zur Erde mitbrachten, wurden Proben an 145 Forschergruppen in vielen Ländern verteilt. Physiker, Chemiker, Biologen und Mineralogen haben das kostbare Material mit den genauesten und modernsten Methoden untersucht. Noch kein Bereich der Erde wurde von einer Gemeinschaft aller Naturwissenschaften so genau und so gründlich erforscht wie diese 20 kg vom Mond. Nach einem Jahr Arbeit liegen die Ergebnisse in zahlreichen Publikationen vor, die für die Proben von Apollo 11 ein Volumen von etwa 3000 Druckseiten umfassen¹.

Es ist sehr schwierig, in einem einzigen Vortrag über eine so gewaltige Menge von Informationen zu berichten. Ich muss daher versuchen, das zusammenzufassen, was wichtig und grundlegend erscheint. Dass eine solche Auswahl in gewissem Sinne subjektiv ausfallen wird und an meiner Blickrichtung als Erdwissenschaftler orientiert ist, wird nicht zu vermeiden sein.

Apollo 11 landete in der Nähe des Mondäquators im südlichen Teil des Mare Tranquillitatis. Die Landestelle liegt auf einer weiten Ebene ohne grössere Erhebungen, die von zahllosen Kratern mit Durchmessern zwischen 2 cm und mehreren 100 m bedeckt ist. Der Boden besteht aus einer lockeren Trümmernasse, die von amerikanischen Forschern als «Regolith» bezeichnet wurde und aus Bestandteilen der verschiedensten Grösse von feinsten Staubteilchen bis zu mehreren Metern grossen Blöcken besteht. Die Hauptmenge des Materials ist recht fein, am häufigsten sind Partikeln von etwa $\frac{5}{100}$ mm Durchmesser. Da grössere Krater von Randwällen aus Gesteinsblöcken umgeben sind und auch auf ihrem Grunde Ansammlungen von Blöcken haben, muss man annehmen, dass der lockere Regolith auf festem Felsuntergrund liegt. An der Landestelle von Apollo 11 ist die Trümmerdecke etwa 3–6 m dick.

Auch Apollo 12 landete in einem Mare-Gebiet, im Südteil des Mare Procenarum. Die auch hier aus einer lockeren Trümmernasse bestehende Oberfläche ist weniger eben als im Mare Tranquillitatis. Mehrere grosse Krater mit Durchmessern zwischen 50 und 400 m liegen um die Landestelle, die grösseren mit Randwällen, die von grossen Gesteinsbrocken bedeckt sind. Der lockere Mondboden ist hier weniger dick als im Mare Tranquillitatis.

Das Material, welches die Astronauten an beiden Landestellen sammelten, besteht aus einzelnen an der Oberfläche aufgelesenen grösseren

¹ Die bis Anfang 1969 vorgelegten wissenschaftlichen Ergebnisse der Untersuchungen an den Proben von Apollo 11 sind publiziert in: Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference, Vol. 1, 2 und 3 (2492 Seiten), Pergamon Press, New York 1969.

Gesteinsstücken und aus Proben des gesamten feinkörnigen Mondbodens. Von Apollo 11 wurden 7,5 kg Gesteinsstücke über 1 cm Durchmesser und 12,5 kg feineres Material gewonnen, von Apollo 12 18 kg Gesteinsstücke und 6,7 kg feines Material.

Die Trümmermassen, welche die Mare-Oberflächen bedecken, entsprechen den Böden und Sedimenten, die fast überall auf der Erde als eine lockere mehr oder weniger dicke Schicht auf den primären Gesteinen liegen. Auf der Erde ist diese Schicht aus der Verwitterung der kompakten Gesteine unter dem Einfluss von Luft und Wasser entstanden. Auch der Mondboden muss durch eine Zerkleinerung darunterliegender fester Gesteine entstanden sein. Nur waren die Kräfte, welche diese Transformation vollbrachten, ganz andere, als wir sie auf der Erde kennen. Auf dem Mond gibt es keine Atmosphäre, keine Niederschläge, die eine Verwitterung bewirken könnten. Es gibt keine Winde und keine Flüsse, die zerkleinertes Material transportieren und ablagern.

So sind es vom Standpunkt des Geologen zwei Fragenkomplexe, die zu beantworten sind: Wir werden erstens fragen, welcher Art die primären festen Gesteine sind, die im Mondboden vorkommen. Damit ist nach der Entstehung der festen Kruste des Mondes und nach der Bildung des Mondkörpers überhaupt gefragt. Wir werden zweitens fragen, welche Vorgänge die primären Gesteine zertrümmert, umgewandelt und als lose Trümmerdecke über die Oberfläche des Mondes gebreitet haben.

Für die erste Frage nach der Natur der primären Gesteine betrachten wir die grösseren Gesteinsstücke, die im Mondboden vorkommen. Man hat drei verschiedene Gesteinstypen gefunden, die in Analogie zu irdischen Gesteinen als lunare Basalte, lunare Anorthosite und lunare Breccien bezeichnet werden.

Tabelle I
Die Hauptminerale der Mondgesteine

Name	Chemische Zusammensetzung
Plagioklas (Kalknatronfeldspat)	Mischungen von $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Anorthit) und $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Albit). Vorherrschend mit rund 80% Anorthit
Pyroxen	$(\text{Mg, Fe, Ca}) \text{SiO}_3$
Ilmenit	FeTiO_3
Olivin	$(\text{Mg, Fe})_2 \text{SiO}_4$

Am häufigsten sind die lunaren Basalte. Es handelt sich um hell- bis dunkelgraue Gesteine, die aus den drei Hauptmineralien Feldspat, Pyroxen und Ilmenit bestehen. Tabelle I zeigt die chemische Zusammensetzung dieser Komponenten. An gröberkörnigen Varietäten kann man diese Mineralien schon mit der Lupe erkennen, den weissen Feldspat, den bräunlichen Pyroxen und den schwarzen Ilmenit. Deutlicher wird das

Gefüge im mikroskopischen Dünnschliff (Abb.2). Die Feldspäte erscheinen als farblose, leistenförmige Kristalle; die Pyroxene sind meist gedrungen und von bräunlicher bis rosabräunlicher Farbe, der Ilmenit tritt in meist langen schwarzen Leisten oder Tafeln auf. Unter dem Mikroskop findet man in geringerer Menge noch einige andere Mineralien, so vor allem Olivin, eine Mischung der Orthosilikate von Eisen und Magnesium, die aus reiner Kieselsäure (SiO_2) bestehenden Mineralien Cristobalit und Tridymit, metallisches Eisen, Eisensulfid oder Troilit, Spinell und einige seltenere Bestandteile. Alle diese Mineralien sind auch aus irdischen Basalten bekannt. Nur in geringer Menge wurden einige wenige bisher unbekannt Mineralien gefunden, so vor allem ein magnesiumfreier Eisen-Kalzium-Pyroxen, der Pyroxferroit, ein Ferropseudobrookit und ein Eisentitan-spinell.

Für manche Mineralienliebhaber war es enttäuschend, dass der Mond mineralogisch nichts Sensationelles bietet, dass seine Gesteine aus Mineralien zusammengesetzt sind, die wir schon von der Erde kennen. Für die wissenschaftliche Erkenntnis des uns umgebenden Kosmos ist jedoch gerade dieses Faktum von grosser Bedeutung: Es enthüllt die Uniformität sowohl der planetarischen Materie als auch der Prozesse, die zur Bildung fester Himmelskörper geführt haben, und es berechtigt uns dazu, alle Erkenntnisse anzuwenden, die aus der Erforschung der Gesteine und Mineralien der festen Erdrinde hervorgegangen sind.

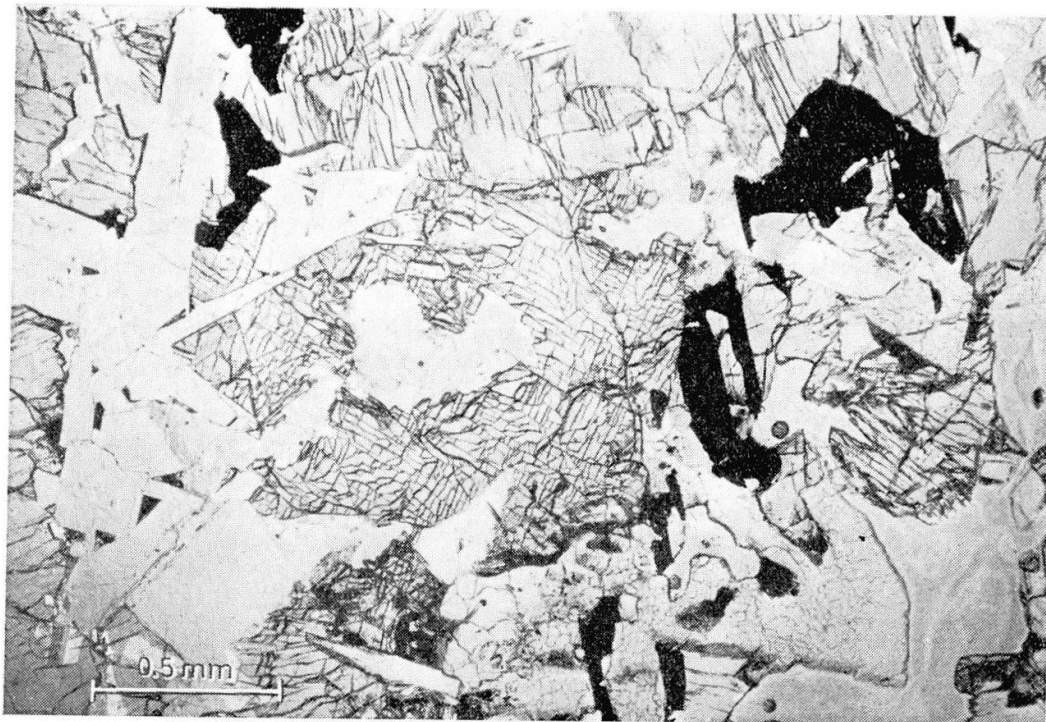


Abbildung 2

Grobkörniger Mond-Basalt, mikroskopisches Dünnschliffbild. Farbloser Plagioklas, oft leistenförmig. Bräunlicher Pyroxen mit Spaltrissen. Undurchsichtiger Ilmenit. Cristobalit, farblos mit schuppiger Struktur nahe der rechten unteren Bildecke

So können wir aus dem Gefüge und dem Mineralbestand der Mondbasalte schliessen, dass sie ebenso wie die irdischen Basalte magmatischer und speziell vulkanischer Natur sind. Sie sind an der Mondoberfläche oder in geringer Tiefe aus der Erstarrung flüssiger Gesteinsschmelzen oder Laven entstanden, und sie zeugen davon, dass es auf dem Mond einen ausgedehnten Vulkanismus gegeben hat. Man muss annehmen, dass der Untergrund der Maria aus basaltischen Lavadecken besteht.

Aus der Mineralzusammensetzung der lunaren Basalte kann man weiter folgern, dass die Gesteinsschmelzen selbst vor ihrer Erstarrung eine Entwicklung oder chemische Differenzierung durchgemacht haben. An der Landestelle von Apollo 11 konnten zwei Arten von Basalten unterschieden werden, eine meist feinkörnige und eine gröberkörnige Varietät, die sich chemisch vor allem nach ihrem Gehalt an Spurenelementen so deutlich voneinander unterscheiden, dass sie aus zwei verschiedenen Lavaergüssen stammen müssen. Die basaltischen Gesteine von Apollo 12 zeigen eine noch grössere Variabilität. Neben olivinfreien bis olivinarmen Basalten kommen dort sehr olivinreiche Gesteine vor, und es wurde sogar ein helles, nicht basaltisches Gestein gefunden, das aus Kalifeldspat und einer SiO_2 -Modifikation besteht.

Charakteristisch für die Mondbasalte ist es, dass sie im Unterschied zu ähnlichen terrestrischen Gesteinen wasserfrei sind. Es fehlen alle wasserhaltigen Mineralien, wie z. B. Glimmer und Hornblende. Dass im Mondmagma dennoch flüchtige Bestandteile enthalten waren, zeigt das häufige Vorkommen runder Blasen, die bei der Erstarrung dieser Laven mit irgendwelchen Gasen erfüllt waren. Es könnte sich vielleicht um Kohlenoxid (CO) gehandelt haben.

Den deutlichsten Hinweis auf stoffsondernde Vorgänge in den Magmen, aus denen die primären Mondgesteine entstanden, bietet das Vorkommen des zweiten Typs von Gesteinen, der lunaren Anorthosite. Es handelt sich um weisse Gesteine, die bisher nur in kleinen Stücken unter 1 cm gefunden wurden und sehr viel seltener sind als die Basalte. Sie bestehen hauptsächlich aus Feldspat, und zwar aus fast reinem Kalziumfeldspat (Anorthit), dem kleine Kriställchen von Olivin oder auch Pyroxen eingelagert sind (Abb. 3). Auch die Anorthosite entstanden aus der Kristallisation eines Magmas, dies jedoch auf eine ganz andere Weise als die Basalte. Ihr Gefüge zeigt, dass sie ein sogenanntes Agglomerat bilden, d.h. Kristalle, die sich aus einer Schmelze abschieden und vermöge ihres geringeren spezifischen Gewichtes zu einem auf der Restschmelze schwimmenden Kristallbrei akkumulierten.

Da die Anorthositfragmente in den Trümmernmassen sehr viel seltener und kleiner sind als die Bruchstücke basaltischer Gesteine, ist es sehr wahrscheinlich, dass sie von weiter entfernten Orten der Mondoberfläche stammen. Man vermutet, dass sie von den Hochländern herkommen. Hierfür sprechen unter anderem die Ergebnisse der chemischen Analysen des Mondbodens durch die Surveyor-Sonden: Surveyor 5 fand im Mare Tranquillitatis eine etwa basaltische Zusammensetzung, Surveyor 7 im Hochlandgebiet nördlich des Kraters Tycho deutlich mehr Aluminium,

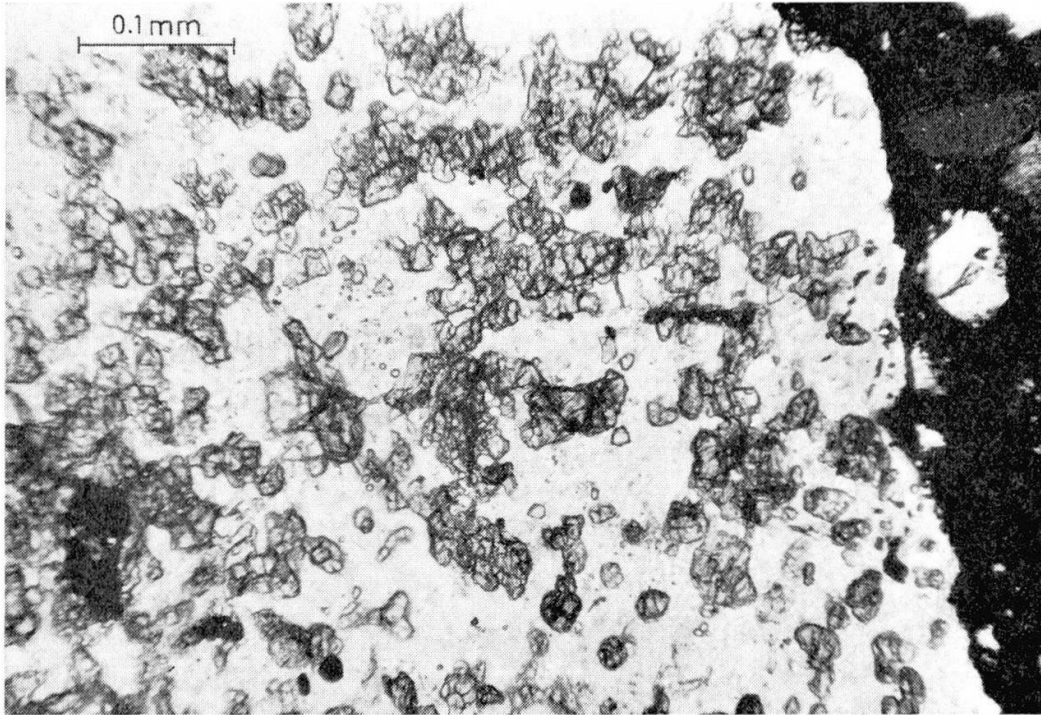


Abbildung 3

Mond-Anorthosit, mikroskopisches Dünnschliffbild. Farbloser Plagioklas mit grünlichen Olivinkörnern

weniger Eisen und Titan, im ganzen eine Zusammensetzung, die der der Anorthosite sehr ähnlich ist. So könnte es wohl sein, dass in den Hochländern viel oder vorherrschend helle anorthositische Gesteine, in den Meeren vorwiegend dunkle basaltische Gesteine vorkommen.

Das Vorkommen basaltischer Gesteine beweist, dass es im Mond einmal flüssige Magmen gegeben hat, die in vulkanischen Prozessen bis an die Oberfläche empordrangen oder auch in gewisser Tiefe erstarrten. Gewisse morphologische Einzelheiten der Mare-Oberflächen sind sicherlich vulkanisch entstanden. Dazu gehören beulenförmige Aufwölbungen, die sogenannten Dome, ausgedehnte Lavaströme und manche Rundformen, die als vulkanische Einsturzbecken oder Calderen und als Vulkankegel zu deuten sind.

Auf der Erde fördern und förderten in der geologischen Vergangenheit die meisten Vulkane basaltische Magmen, und wir nehmen heute an, dass es in der Tiefe eine den ganzen Erdball umgebende Schicht basaltischer Zusammensetzung gibt, auf der die mehr granitisch zusammengesetzten Kontinentalblöcke wie Eisberge auf dem Ozean schwimmen. Es liegt daher nahe, zu prüfen, inwieweit die chemische Zusammensetzung der lunaren Basalte der der irdischen Basalte ähnlich ist. Auch bestehen die Steinmeteoriten, die einzigen bisher bekannten ausserirdischen Gesteine, aus den Hauptmineralien der Basalte: Pyroxen, Olivin und Plagioklas, so dass auch ihr chemischer Bestand mit dem der Mondgesteine verglichen werden sollte.

Tabelle II
Chemische Zusammensetzung lunarer Basalte von Apollo 11,
irdischer Basalte und von Steinmeteoriten

	Lunare Basalte Apollo 12	Tholeitische Basalte	Ca-reiche Achondrite	Chondrite ohne met. Fe
SiO ₂	40,38	50,83	48,17	39,88
TiO ₂	11,10	2,03	0,51	0,15
Al ₂ O ₃	9,68	14,07	13,91	2,31
Fe ₂ O ₃	0,00	2,88	1,17	0,00
FeO	18,91	9,00	15,99	13,12
MgO	7,13	6,34	7,10	24,98
CaO	11,00	10,42	10,94	1,90
Na ₂ O	0,57	2,23	0,67	0,88
K ₂ O	0,20	0,82	0,13	0,14

Tabelle II enthält die chemische Zusammensetzung der lunaren Basalte von Apollo 11, der irdischen Basalte und zweier Gruppen von Steinmeteoriten. Qualitativ ist der Stoffbestand der lunaren Basalte dem der irdischen ähnlich. Es bestehen jedoch charakteristische Unterschiede: Die irdischen Basalte enthalten dreiwertiges Eisen, Wasser, mehr Alkalien, mehr SiO₂ und weniger Titan. Die Unterschiede sind noch grösser bezüglich einiger Spurenelemente. So enthalten die Mondbasalte rund fünfmal soviel seltene Erden, sehr viel geringere Mengen an den leicht verdampfbaren Elementen Silber, Kadmium, Zink, Indium, Thallium und Wismut. Bemerkenswert gering ist der Gehalt der Mondbasalte an sogenannten siderophilen Elementen, d.h. solchen, die bei der Berührung einer Silikat- mit einer Eisenschmelze bevorzugt in das Eisen gehen. Dazu gehören Nickel, Kobalt, Iridium und Gold.

Die chemischen Unterschiede zwischen terrestrischen und lunaren Basalten sind für die Frage einer eventuellen Abstammung des Mondes von der Erde von Bedeutung. Wir können heute sagen, dass lunare und irdische Basalte chemisch ähnlicher sein müssten, wenn sich der Mond von einer Erde abgetrennt hätte, auf der schon eine Kruste basaltischer Gesteine bestand. Verglichen mit der mittleren Zusammensetzung der in der Sonnenatmosphäre noch erhaltenen Ursprungsmaterie des Planetensystems sind die lunaren Gesteine noch stärker als die Gesteine der Erdrinde an leicht verdampfbaren Elementen verarmt. Man wird daraus den Schluss ziehen, dass die Materie des Mondes sich bei höheren Temperaturen oder in einem geringeren Schwerfeld als die Materie der Erde gesammelt hat. Der Mangel an siderophilen Elementen lässt vermuten, dass die Schmelze, aus der die Mondgesteine entstanden, einmal mit einer Eisenschmelze in Berührung war. Im Mondkörper selbst kann das nicht stattgefunden haben, da der Mond im Gegensatz zur Erde keinen Eisenkern hat. Dies geht daraus hervor, dass der Mond kein Magnetfeld besitzt und dass seine Gesamtdichte von 3,3 g/cm³ nicht höher ist als die der Gesteine an seiner Oberfläche. So könnte man vermuten, dass sich die

Mondmaterie aus der äusseren Sphäre eines sich bildenden grösseren Körpers abgetrennt hat, der sich bereits in einen Eisenkern und eine flüssig-gasförmige äussere Silikathülle gesondert hatte. Ob dies die Erde oder ein anderer Körper des Planetensystems war, ist heute noch nicht zu entscheiden.

Die Tabelle II zeigt, dass die Mondgesteine ganz anders zusammengesetzt sind als die häufigsten Steinmeteoriten, die Chondrite. Dagegen besteht eine grosse Ähnlichkeit der lunaren Basalte mit einer anderen Klasse der Steinmeteorite, den kalziumreichen Achondriten, deren Mineralbestand und Gefüge von allen bekannten Gesteinen den Mondbasalten am nächsten entspricht. Was diese Ähnlichkeit bedeutet und ob hier vielleicht genetische Beziehungen bestehen, wissen wir heute noch nicht.

Von besonderer Bedeutung für die Geschichte des Mondes sind die Altersbestimmungen, die man nach radiometrischen Methoden an Mondbasalten ausgeführt hat. Die Ergebnisse waren sehr überraschend. Nach der Rubidium-Strontium-Methode sind die Basalte von Apollo 11 vor 3,7 Milliarden Jahren gebildet worden. Ähnliche Werte ergaben sich aus dem Kalium-Argon-Zerfall. Aus dem Zerfall von Uran und Thorium in Blei wurden sogar noch höhere Werte, nämlich 4,1 Milliarden Jahre errechnet. Worauf diese Diskrepanz beruht, ist noch nicht endgültig geklärt. Jedenfalls muss man aus diesen Werten schliessen, dass die vulkanisch-magmatische Periode des Mondes sehr lange zurückliegt und in die

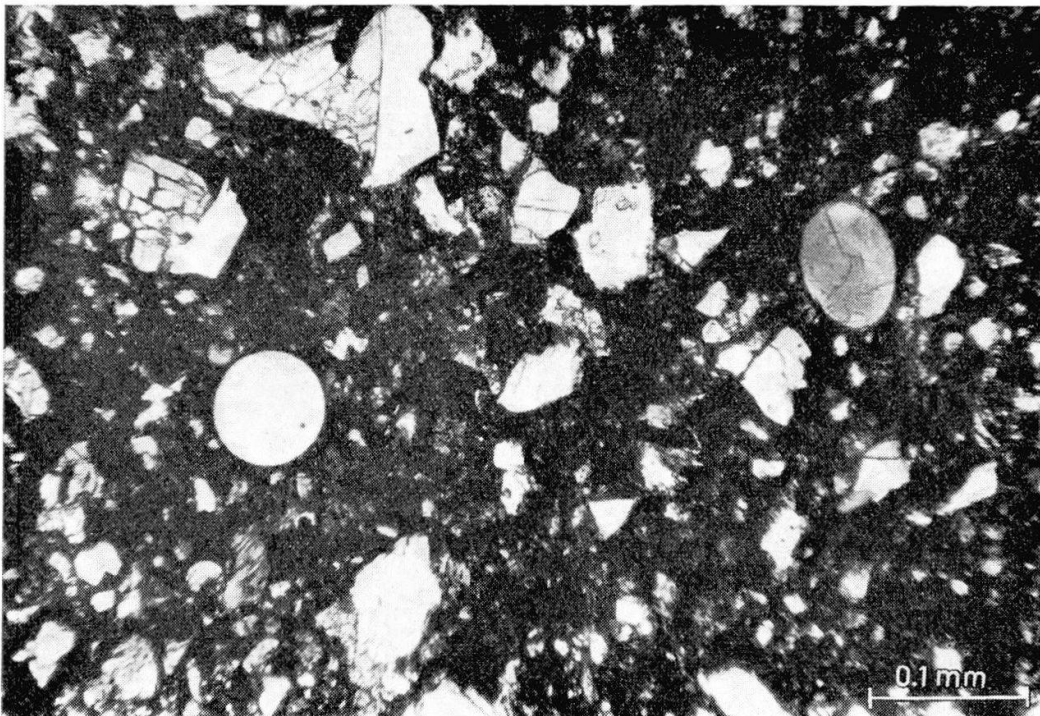


Abbildung 4

Mond-Breccie, mikroskopisches Dünnschliffbild. In einer dunklen Grundmasse sind Fragmente von Gläsern, Plagioklas, Pyroxen, (Spaltrisse!), Ilmenit und rotations-symmetrische Glaskörper eingebettet

früheste Zeit des Planetensystems zurückreicht, dessen Alter mit etwa 4,6 Milliarden Jahren angenommen wird. Anders als auf der Erde, wo wir heute noch lebendigen Vulkanismus haben, ist der Vulkanismus des Mondes wohl schon vor sehr langer Zeit erloschen.

Wir kommen nun zu der Entstehung der sekundären Trümmergesteine und Trümmermassen der Mare-Oberfläche. Dazu gehört die dritte Art von Gesteinsstücken, die sogenannten Breccien und der lockere Mondboden. Als Breccien bezeichnet man auf der Erde Gesteine, die aus einer ungeordneten Masse miteinander verkitteter Bruchstücke von primären Gesteinen und Mineralien bestehen. Die Komponenten der lunaren Breccien sind dieselben Fragmente und Körner, die den lockeren Mondboden zusammensetzen, sie sind hier nur durch eine feine braune Glasgrundmasse miteinander verbunden.

Wir können daher die Bestandteile der Breccien und des feinen Mondbodens zusammen betrachten.

Wir finden in Breccien (Abb. 4) und im unverfestigten Mondboden einerseits die uns schon bekannten Basalte und Anorthosite, ferner Bruchstücke älterer Breccien und Körner der Mineralien der magmatischen Gesteine: Pyroxen, Feldspat, Olivin, Ilmenit. Alle diese Bestandteile sind durch blosser Zertrümmerung der primären Gesteine entstanden. Daneben kommen aber in grosser Menge Glaspartikeln vor, und zwar einerseits unregelmässig geformte Fragmente, andererseits regelmässig geformte Körper und schliesslich in geringer Menge kleine Stücke meteoritischen Nickeleisens.

Die Beschaffenheit vieler Gesteins- und Mineralfragmente zeigt, dass zerstörende Prozesse hoher Energie gewirkt haben. Neben den Erscheinungen intensiver Zertrümmerung, die eventuell auch durch heftige vulkanische Eruptionen oder gebirgsbildende Vorgänge hervorgebracht sein könnten, beobachtet man in Mineralien der Breccien und des Mondbodens Deformationen und Umbildungen besonderer Art, von denen man aus experimentellen Untersuchungen weiss, dass zu ihrer Erzeugung Druckstösse von vielen hunderttausend Atmosphären oder vielen hundert Kilobar erforderlich sind. Solche Druckstösse, sogenannte Stosswellen, können nicht durch vulkanische Eruptionen oder tektonische Vorgänge erzeugt werden, d. h., man kann sie auf keine Weise aus dem Inneren des Mondes ableiten. Stösse so hoher Energie können den Mond nur von aussen her getroffen haben. Sie sind auf die Einschläge von Meteoriten und wohl auch von Kometen zurückzuführen, welche im Laufe der Zeit vom Mond eingefangen wurden.

Die Auffindung dieser Spuren von Meteoriteneinschlägen im Regolith der Mondoberfläche wurde durch die Beobachtungen an irdischen Meteoritenkratern ermöglicht, die im Laufe der letzten Jahrzehnte an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche nachgewiesen wurden. Grosse Krater dieser Art sind z. B. aus Kanada bekannt. In Deutschland ist das vor 15 Millionen Jahren entstandene Nördlinger Ries ein geologisch relativ junger und daher recht gut erhaltener Meteoritenkrater von 24 km Durchmesser. Die im Ries vorkommenden Trümmermassen haben manche Ähnlichkeit mit dem lunaren Regolith.

Meteoriten aller Grössenklassen erreichen die Mondoberfläche mit Geschwindigkeiten zwischen 2,4 und 70 km/sec. Trifft ein derart schnelles Projektil auf einen Gesteinsuntergrund, so werden Wirkungen erzeugt, die nach Art und Ausmass alle Wirkungen von Stössen und Explosionen niederer Energie übertreffen. Im Untergrund entsteht zunächst ein Druckstoss, der sich als Stosswelle mit Überschallgeschwindigkeit fortpflanzt, wobei Druckamplitude und Geschwindigkeit allmählich abnehmen. Mit der durch die Stosswelle erzeugten starken Kompression und Deformation des Gesteins geht auch eine Erwärmung einher. Nächste dem Einschlagszentrum wird das Gestein so hoch erhitzt, dass es verdampft. Nach aussen schliesst sich eine Zone an, in der das Gestein geschmolzen wird. Weiter vom Zentrum entfernt werden die Mineralien in charakteristischer Weise deformiert, noch weiter aussen nur noch zerbrochen. Nachdem die Kompressionswelle abgeklungen ist, federt der vom Einschlag getroffene Gesteinsuntergrund zurück, und verdampfetes, geschmolzenes, deformiertes und zertrümmertes Gesteinsmaterial wird mit grosser Geschwindigkeit ausgeworfen. Es bleibt ein Krater übrig, der von den Trümmern zum Teil erfüllt und weithin umgeben ist.

Dass der Regolith der Mare-Oberflächen durch wiederholte Meteoriteneinschläge auf der Mondoberfläche erzeugt wurde, geht aus den erwähnten Deformations- und Umwandlungserscheinungen an primären Mineralien und Gesteinen hervor, die als Zeugen der hohen Druckstösse

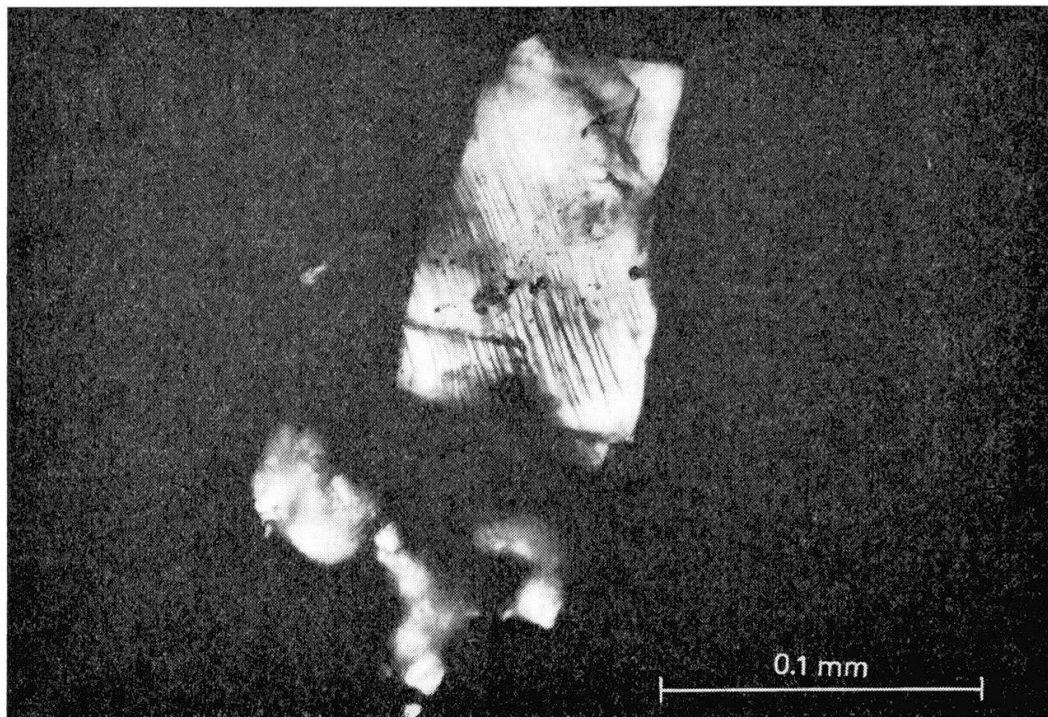


Abbildung 5

Plagioklas mit feinen, durch Stosswellen erzeugten Deformationslamellen. Mikroskopisches Bild eines Kornes aus dem Mondboden, gekreuzte Polarisatoren. Die dünnen Lamellen haben keine oder eine nur geringe Doppelbrechung

erhalten geblieben sind. Einige besonders charakteristische Beispiele seien im folgenden betrachtet.

Abbildung 5 zeigt ein Feldspatkorn mit feinen Lamellen, die sich durch geringere Licht- und Doppelbrechung vom Mutterkristall unterscheiden. Wir wissen, dass derartige Deformationsstrukturen durch Stosswellen mit Spitzendrücken zwischen 250 und 300 kbar hervorgerufen werden. Durch Stosswellendrucke über 300 kbar wird der Feldspat im festen Zustand, also ohne zu schmelzen, in eine glasige Substanz umgewandelt. Eine solche höhere Stosswellenbeanspruchung hat das in Abbildung 6 dargestellte Gesteinsstück erlitten. Bei schwacher Vergrößerung erkennt man fast nur die starke Zerbrechung des Gesteinsgefüges. Bei stärkerer Vergrößerung sieht man, wie der Feldspat stellenweise Deformationslamellen enthält und bereichsweise in das erwähnte Glas, sogenanntes diaplektisches Glas, umgewandelt ist. Daneben zeigen Pyroxenkörner Lamellen bestimmter kristallographischer Orientierung, die als Spuren innerkristalliner Gleitvorgänge aufzufassen sind, die nur durch Stosswellen in Gang gesetzt werden und bei langsamen Verformungsvorgängen bei niedrigeren Drücken nicht entstehen können.

Etwa 30% des Mondbodens und der Breccien bestehen aus Fragmenten und regelmässig geformten Körpern aus Glas. Sie sind aus der Aufschmelzung der primären Gesteine durch Meteoritentreffer hervorgegangen.

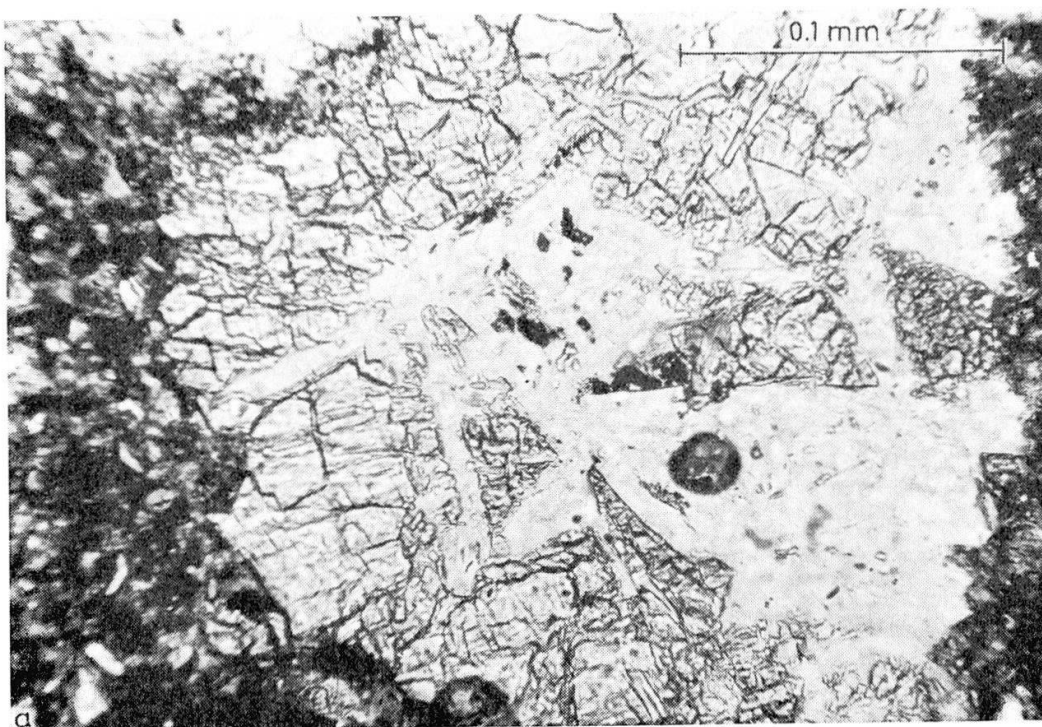


Abbildung 6

Umwandlung von Plagioklas in isotropes Glas durch die Einwirkung von Stosswellen, welche von einem Meteoriteneinschlag herrührten. Mikroskopisches Dünnschliffbild
a) gewöhnliches Licht: Das grosse, farblose Plagioklaskorn ist von Pyroxen und Ilmenit umgeben. Deformationslamellen sind schwach erkennbar

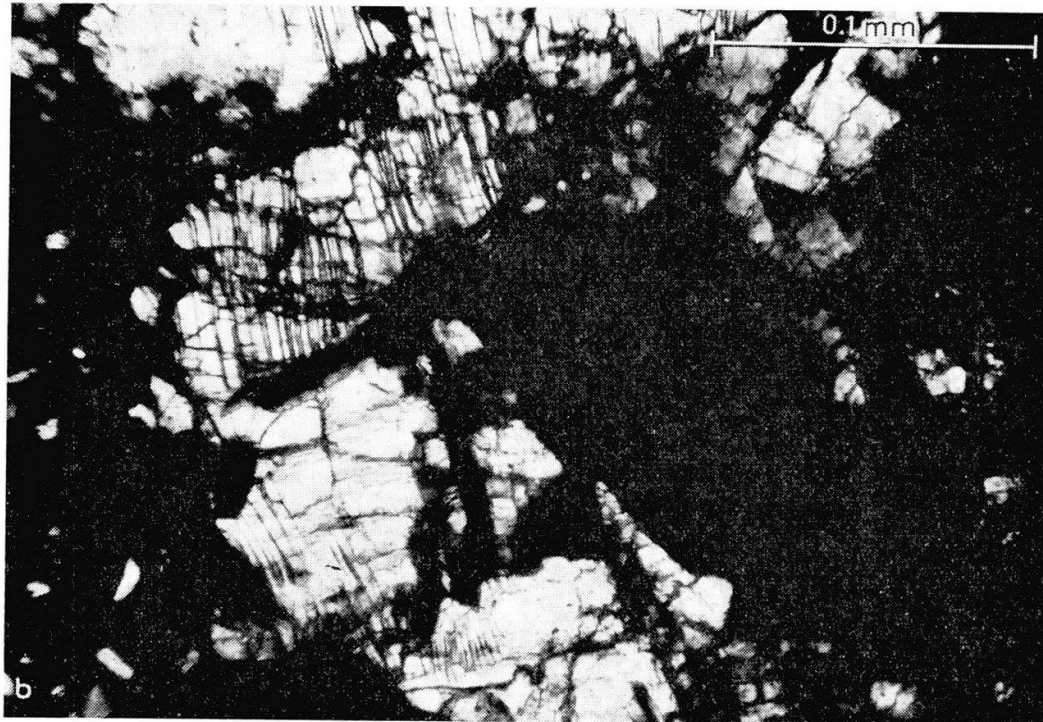


Abbildung 6

- b) gekreuzte Polarisatoren: Die Hauptmasse des Plagioklaskorns ist im festen Zustand in ein optisch isotropes Glas (diaplektisches Glas) umgewandelt und erscheint daher unter gekreuzten Polarisatoren dunkel. Im oberen Teil des Korns beginnende Isotropisierung in unregelmässigen Flecken und dünnen Lamellen. Der Pyroxen enthält dunkel erscheinende Deformationslamellen

Dies kann man direkt an den kleinen und kleinsten Meteoritenkratern beobachten, mit denen die Aussenseiten vieler Gesteinsfragmente bedeckt sind. Es handelt sich um etwa halbkugelige Löcher, die von Glas überzogen und oft von einem Hof pulverisierter Mineralien umgeben sind.

Die Zusammensetzung der Gläser des Mondbodens und der Breccien variiert in weiten Grenzen, entspricht aber immer irgendeinem Mischungsverhältnis der Hauptmineralien Feldspat, Pyroxen und Ilmenit. Diese Variabilität der Zusammensetzung, die sich in den verschiedenen Farben von farblos und grün über gelb, braun, rot, violett bis fast undurchsichtig widerspiegelt, ist so zu erklären, dass die Gläser durch eine plötzliche Aufschmelzung von Mondgesteinen und ein Zerreißen der unvermischten Schmelze in kleine Teile entstanden.

Eine Statistik vieler Glasanalysen ergibt, dass man zwei Hauptgruppen unterscheiden kann. Die einen Gläser sind farblos oder grünlich und entsprechen chemisch den Anorthositen, die anderen sind dunkler gefärbt und enthalten mehr Eisen, Magnesium und Titan. Wir nehmen an, dass die farblosen Gläser aus Meteoriteneinschlägen auf anorthositische Gesteine stammen, also wahrscheinlich von den Hochländern herkommen, während die dunklen Gläser durch Meteoriteneinschläge auf die basaltischen Gesteine erzeugt wurden.

Besonders auffallend sind neben den eckigen Fragmenten regelmässig geformte Glaskörper (Abb. 7). Meist handelt es sich um Kugeln mit Durchmessern zwischen 0,3 μm und 2 mm Durchmesser. Daneben gibt es längliche Körper, solche, die in der Mitte eine Einschnürung haben, sowie hantelförmige und tränenförmige Gebilde. Alle diese Körper sind aus flüssigen Schmelztropfen entstanden, die durch das Vakuum der Mondoberfläche geschleudert wurden. Die meisten dürften aus aufgeschmolzenem Gestein stammen. Einige besonders homogene könnten auch durch Kondensation aus Silikatdampf entstanden sein. Unter dem Einfluss der Oberflächenspannung mussten diese Tropfen Kugelgestalt annehmen. Enthielten sie Unregelmässigkeiten, wie Blasen oder nicht vollständig geschmolzene Mineralkörner, so wurden sie bei der wirbelnden Rotation zu länglichen und eingeschnürten Gebilden deformiert.

Blicken wir zurück, so können wir zusammenfassend sagen, dass die Oberfläche des Mondes als die Grenze zwischen dem festen Mondkörper und dem äusseren planetarischen Raum der Schauplatz interner Prozesse und externer Ereignisse war. Aus inneren Kräften und Vorgängen stammen Magmen und vulkanische Erscheinungen, welche jedoch, anders als auf der Erde, nur einer sehr frühen Periode der Mondentwicklung angehören und längst abgeklungen sind. Von aussen her war der Mond dem

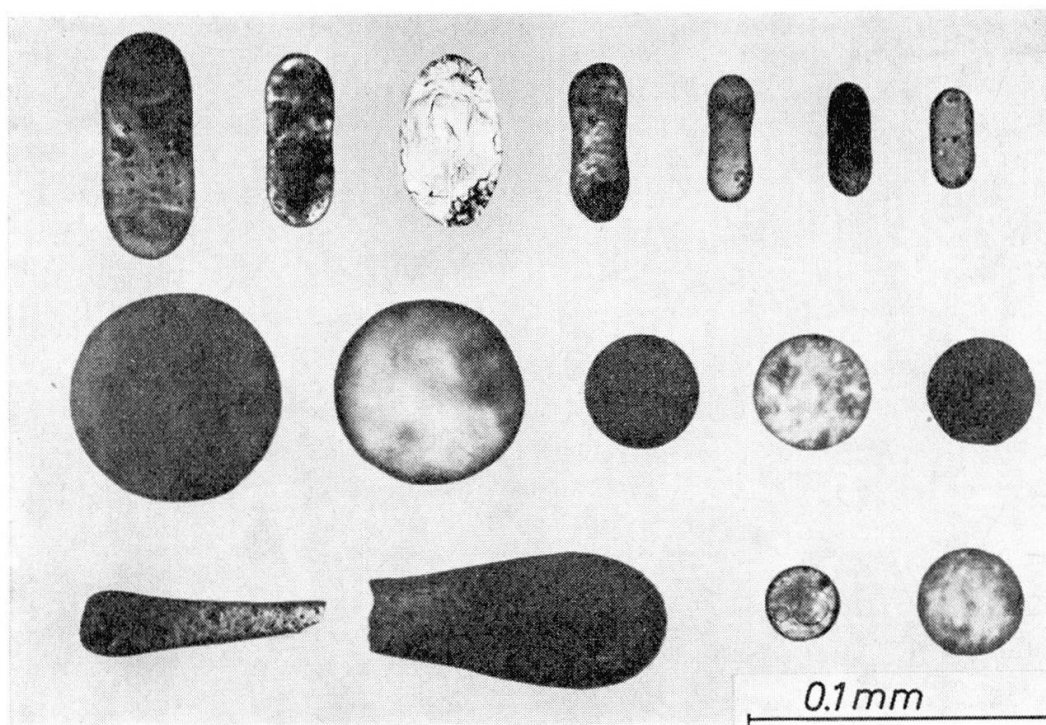


Abbildung 7

Längliche, kugelige und tränenförmige Glaskörper verschiedener Farbe aus dem Mondboden und den Breccien von Apollo 11. Die länglichen Körper der obersten Reihe enthalten zum Teil Reste von Mineralkörnern und Glaspartien verschiedener Farbe und Zusammensetzung. In der kleinen Kugel der unteren Reihe sind zwei Glaskügelchen mit niedrigerer Lichtbrechung eingeschlossen

Bombardement durch Körper des Planetensystems ausgesetzt, deren Grösse von submikroskopischen Teilchen bis zu den Dimensionen der Asteroiden variiert haben dürfte. Neben festen Körpern von der Art der Eisen- und Steinmeteorite wird es sich auch um Kometen gehandelt haben. Die von diesen Einschlägen erzeugten Trümmersmassen haben wir an den Proben von Apollo 11 und 12 untersuchen können. Als Narben dieser Einschläge müssen wir die zahllosen grossen und kleinen Krater betrachten, die die Mondoberfläche bedecken. Wir hoffen, dass einer der nächsten Apolloflüge einen solchen grossen Einschlagkrater, vielleicht den Kopernikus, erreichen und sein näheres Studium ermöglichen wird.