

NATURWISSENSCHAFTLICHE RUNDSCHAU

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m. b. H., Stuttgart N, Birkenwaldstraße 44, Postfach 40

Sonderdruck aus Band 23, Heft 10, Oktober 1970, Seite 391 bis 401

Bildung und Umbildung der Gesteine des Mondes Nach Ergebnissen der Apollo-Missionen 11 und 12

Von Prof. Dr. WOLF VON ENGELHARDT, Tübingen

Mit der Landung von Raumschiffen auf dem Mond hat eine neue Epoche der Mondforschung begonnen. Bis zu diesem Zeitpunkt war der Mond ein Objekt der Astronomie, das heißt es standen nur Beobachtungen zur Verfügung, die mittels terrestrischer Teleskope, in neuerer Zeit auch mit Instrumenten der den Mond umkreisenden Satelliten aus der Entfernung gewonnen wurden. Zwar war es möglich, aus solchen Beobachtungen hervorragende topographische Karten der Mondoberfläche herzustellen, die so genau sind, daß die Morphologie der der Erde zugekehrten Seite des Mondes heute besser bekannt ist als die Gestalt mancher Teile der Erdoberfläche, doch blieb den Forschern der Vor-Apollo-Zeit eine wichtige Quelle der Information verschlossen: Sie wußten nichts Sicheres über den chemischen Stoffbestand des Mondes und nichts über die Gesteine und Mineralien, welche den Mondkörper aufbauen. So befanden sie sich in der Lage eines Geologen, von dem verlangt wird, allein aus Luftbildern die Struktur und Entstehung der festen Erdrinde abzuleiten.

Man versuchte, die Oberflächenformen des Mondes durch Vergleiche mit Formen der Erdoberfläche zu deuten, ein schwieriges Unterfangen, da von vornherein feststand, daß irdische und lunare Landschaftsformen unter recht verschiedenen Bedingungen entstanden. Vorstellungen über die chemische und gesteinsmäßige Zusammensetzung des Mondes versuchte man aus Theorien über die Entstehung des Planetensystems, aus der Häufigkeit der chemischen Elemente in der Sonnenatmosphäre, aus der nach astronomischen Beobachtungen berechneten Dichte des Mondes und aus der Zusammensetzung der Meteorite abzuleiten, den einzigen bisher bekannten extraterrestrischen Körpern.

So bewegten sich bisherige Theorien über die Beschaffenheit, Entstehung und Geschichte des Mondes in einem breiten Spielraum mehr oder minder großer Wahrscheinlichkeiten, der nun dadurch eingeschränkt wird, daß die bei den Missionen Apollo 11 und 12 an der Mondoberfläche gesammelten Proben einer direkten Untersuchung im Laboratorium zugänglich geworden sind. Damit ist der Mond, der bisher immer ferne Himmelskörper, in die unmittelbare Nähe des Menschen gerückt. Neben Astronomie und Astrophysik können sich jetzt alle Wissenschaften an der Erforschung des Erdtrabanten beteiligen, die bisher der Erkundung des Erdkörpers dienten.

Im folgenden soll über die wichtigsten neuen Fakten berichtet werden, welche durch die Anwendung chemischer, physikalischer und mineralogischer Methoden über die Beschaffenheit der Mondoberfläche an den Landstellen von Apollo 11 und 12 gewonnen wurden. Natürlich kann man nicht erwarten, daß aus diesen punktuellen Probenahmen schon alles erfahren werden kann, was man für eine vollständige Theorie des Mondes und seiner Entstehung braucht. Viele Fragen bleiben offen oder werden jetzt erst neu gestellt. Manches Grundsätzliche hat sich aber geklärt, viele Spekulationen haben ihren Boden verloren und Streitigkeiten, die bis vor kurzem die Mondforscher noch bewegten, haben ihren Sinn verloren.

Die Mondoberfläche an den Landstellen von Apollo 11 (Mare Tranquillitatis) und 12 (Oceanus Procellarum)

Die Abbildung 1 zeigt die Ansicht der uns zugewandten Seite des Mondes nach teleskopischen Aufnahmen. Die Gliederung der Mondoberfläche, wie sie schon mit bloßem Auge auf der Scheibe des Vollmondes erkennbar ist, tritt deutlich hervor: Hell, das heißt das Sonnenlicht stärker reflektierend erscheinen die Hochländer oder Terrae (Einzahl: Terra), dunkel sind die sogenannten Meere oder Maria (Einzahl: Mare). Die Hochländer haben ein unruhiges, gebirgiges Relief, das vor allem durch zahlreiche sich vielfach überschneidende Ringstrukturen verschiedenster Größe, die sogenannten Krater, geformt ist. Die Maria sind Senken mit einer verhältnismäßig glatten Oberfläche und sehr viel weniger Kratern. Die Höhenunterschiede zwischen Mare-Oberfläche und angrenzenden Terra-Gebirgen sind beträchtlich, stellenweise werden Höhendifferenzen bis zu 5000 m erreicht, im allgemeinen sind die Maria 1000 bis 2000 m tiefer als die Hochländer. Die verschiedene Helligkeit von Hochländern und Meeren zeigt, daß die Mondoberfläche in diesen beiden Gebieten aus verschiedenem Material besteht. Beobachtungen aus der Ferne und Messungen der optischen Eigenschaften der Mondoberfläche führten jedoch zu keinem sicheren Urteil, über die Natur der Mare- und Terra-Gebiete. So hat man zum Beispiel ange-

Prof. Dr. W. v. ENGELHARDT (geb. 9. Februar 1910) ist Direktor des Mineralogisch-Petrographischen Instituts der Universität Tübingen.



Abb. 1. Teleskopische Ansicht des vollen Mondes. Dunkel erscheinen die tieferliegenden 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). — x : Landestelle von Apollo 12 im Meer der Stürme (Mare Procellarum).

nommen, daß die hellen Terra-Gebiete von einer Schicht feinsten Staubes bedeckt sind, während zerrissene Lavaströme den Boden der Maria bilden sollen. Nach einer anderen Hypothese sollen in den Hochländern helle, das heißt kieselsäurereichere, in den Maria dunkle, das heißt kieselsäureärmere und eisenreichere Gesteine vorliegen.

Die Landung von Apollo 11 im Süden des Mare Tranquillitatis brachte die erste direkte Kunde von der Beschaffenheit einer Mare-Oberfläche. Der Flugkörper landete auf einer weiten Ebene ohne größere Erhebungen, die von zahllosen Kratern mit Durchmessern zwischen 2 cm und mehreren hundert Metern bedeckt ist. An der Landestelle ist der Mondboden (Regolith) eine lockere Trümmersmasse, die aus Bestandteilen der verschiedensten Größe, von feinsten Staubteilchen bis zu mehrere Meter großen Blöcken besteht. Größere Krater, so zum Beispiel ein etwa 400 m von der Landestelle entfernter mit 180 m Durchmesser, sind von Randwällen aus großen Gesteinsblöcken umgeben, die offenbar aus dem tieferen Untergrund gefördert wurden. Aus der Tiefe der Krater mit Blockwällen kann man schließen, daß der lockere Mondboden an der Landestelle von Apollo 11 etwa 3 bis 6 m dick ist und auf festem Felsuntergrund liegt.

Auch Apollo 12 landete in einem Mare-Gebiet im Südteil des Oceanus Procellarum. Die auch hier von

einer lockeren Trümmersmasse gebildete Oberfläche ist weniger eben als im Mare Tranquillitatis. Mehrere große Krater mit Durchmessern zwischen 50 und 400 m liegen um die Landestelle. Die Randwälle der größten Krater sind mit großen Gesteinsbrocken bedeckt. Der lockere Mondboden ist an der Landestelle von Apollo 12 wesentlich weniger dick als im Mare Tranquillitatis.

Das Material, welches die Astronauten im Meer der Ruhe (Mare Tranquillitatis) und im Meer der Stürme (Oceanus Procellarum) sammelten, besteht aus einzelnen, an der Oberfläche ausgelesenen größeren Gesteinsstücken und aus Proben des gesamten Mondbodens. Bei Apollo 11 wurden 7,5 kg Gesteinsstücke über 1 cm Durchmesser und 12,5 kg feineres Material, bei Apollo 12 18 kg Gesteinsstücke und etwa 6,7 kg feines Material gewonnen. Der hohe Anteil größerer Gesteinsstücke an diesen Aufsammlungen darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß der Anteil grober Steine an der Gesamtmasse des Regolith nicht groß ist. Korngrößenanalysen ergaben als gewichtsmäßig häufigste Korngröße des Regolith vom Mare Tranquillitatis Teilchen mit Durchmessern um 0,05 mm.

Der Regolith der Mareoberflächen entspricht den Böden und Sedimentgesteinen der Erdoberfläche, insofern auch er durch die Zertrümmerung und Umwandlung primärer fester Gesteine entstanden ist. Die Schuttmassen der Mareoberflächen bilden also ein lunares

Sediment. Wie bei irdischen Trümmersgesteinen sollte man durch die Untersuchung seiner Bestandteile erstens etwas über die Entstehung der primären Gesteine erfahren, von denen man annehmen kann, daß sie den Körper des Mondes aufbauen. Zweitens sollten sich auch Hinweise auf die Vorgänge bieten, die die Zertrümmerung und Umbildung des primären Materials bewirkt und den Transport und die Ablagerung der entstandenen Massen besorgt haben. Auf der Erde zerfallen und verwittern die primären Gesteine unter dem Einfluß von Wasser und Atmosphäre. Die Verwitterungsprodukte werden durch Winde und strömendes Wasser transportiert und abgelagert. Auf dem Mond, welchem Wasser und Lufthülle fehlen, haben bei der Bildung und Ablagerung des Regolith andere Kräfte gewirkt.

Magmatische Gesteine im Mondboden: Basalte und Anorthosite

Drei verschiedene Gesteinstypen kommen als größere Stücke und kleinere Fragmente im Mondboden des Mare Tranquillitatis und des Oceanus Procellarum vor: In Analogie zu irdischen Gesteinen nennt man sie lunare Basalte, Anorthosite und Breccien.

Die lunaren Basalte sind hell- bis dunkelgraue Gesteine, die aus den Hauptmineralien Plagioklas,

Pyroxen und Ilmenit bestehen. Die Abbildung 2 zeigt das mikroskopische Dünnschliffbild eines grobkörnigen basaltischen Gesteins. Die hellen, leistenförmigen Kristalle sind calciumreiche Plagioklase, das heißt Glieder der Mischungsreihe zwischen Natriumfeldspat oder Albit ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) und Calciumfeldspat oder Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) mit 60 bis 100% Anorthit. Die Pyroxene sind makroskopisch braun durchsichtig und erscheinen im Mikroskop in bräunlichen bis rosabräunlichen Farbtönen. Es sind Mischungen von Calcium-, Magnesium- und Eisenmetasilikat, $(\text{Ca, Mg, Fe})\text{SiO}_3$. Als ein in irdischen Gesteinen nicht bekanntes Mineral kommt in den Mondbasalten der Calcium-Eisenpyroxen Pyroxferroit, $(\text{Ca, Fe})\text{SiO}_3$ vor. Zwischen Plagioklas und Pyroxen liegen undurchsichtige, makroskopisch schwarze, metallisch glänzende Tafeln des Eisentitanerzes Ilmenit (FeTiO_3), die im mikroskopischen Schnitt meist als lange Leisten erscheinen. Neben diesen Hauptbestandteilen enthalten die Mondbasalte andere Mineralien in geringerer Menge, so vor allem Olivin, Mischungen der Orthosilikate von Eisen und Magnesium, $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$, die SiO_2 -Mineralien Cristobalit und Tridymit, metallisches Eisen, Eisensulfid oder Troilit (FeS), Spinell (MgAl_2O_4) und einige andere seltene Bestandteile. Nur in sehr geringer Menge wurden einige bisher unbekannte Mineralien gefunden, so Ferropseudobrookit und ein Eisen-Titan-spinell.

Das Gefüge der Mondbasalte zeigt, daß diese Gesteine magmatischer Natur sind, das heißt wie terrestrische Basalte durch Kristallisation aus einer Schmelze, einem Magma entstanden. Die verschiedenen Varietäten der lunaren Basalte haben ihren Ursprung in unterschiedlichen Magmazusammensetzungen, die zu verschiedenen Mengenverhältnissen der Hauptmineralien Plagioklas, Pyroxen und Ilmenit führten. Feinkörnige Basalte sind oft besonders ilmenitreich. Während die basaltischen Gesteine von Apollo 11 verhältnismäßig einheitlich sind, fand sich unter den Gesteinen von Apollo 12 eine größere Variabilität des Mengenverhältnisses der Mineralien. Diese Gesteine stammen aus recht verschieden zusammengesetzten Magmen. Neben den olivinarmen und olivinfreien Basalten, wie sie im Mare Tranquillitatis vorwiegen, kommen in den Proben von Apollo 12 Peridotite mit 40% Olivin, 25% Pyroxen und 10% Plagioklas, olivinreiche Basalte mit 40% Olivin, 25% Pyroxen, 25% Plagioklas und 10% Ilmenit und sogar ein helles Gestein mit Quarz (oder einer anderen Modifikation von SiO_2) und Kalifeldspat vor.

Das Gefüge der lunaren Basalte, vor allem die Korngröße ihrer Gemengteile bildet die Bedingungen der Abkühlung und Kristallisation ab. Die grobkörnigen Arten erstarrten langsam in größerer Tiefe. Sie entsprechen daher fast schon terrestrischen Tiefengesteinen basaltischer Zusammensetzung und könnten Gabbros genannt werden. Feinkörnige Varietäten entstanden bei schnellerer Abkühlung nahe oder an der Mondoberfläche. Wie terrestrische basaltische

Laven enthalten sie rundliche Blasen Hohlräume, die durch das Entweichen flüchtiger Bestandteile, vielleicht Wasser oder Kohlendioxyd, entstanden. Die für die feinkörnigen Mondbasalte typischen Blasen sind übrigens der einzige Hinweis darauf, daß das Mondmagma leichtflüchtige Bestandteile enthielt. Im Unterschied zu terrestrischen Gesteinen kommen in den Mondgesteinen keine Mineralien vor, die Wasser oder andere flüchtige Bestandteile enthalten, wie zum Beispiel die in irdischen magmatischen Gesteinen sehr verbreiteten Glimmer oder Hornblenden.

Sehr viel seltener und nur als kleinere Fragmente von höchstens cm-Größe kommen im Boden des Mare Tranquillitatis und des Oceanus Procellarum weiße Gesteine vor, die man in Analogie zu irdischen Gesteinen Anorthosite nennt. Sie bestehen hauptsächlich aus calciumreichem Plagioklas, dem kleine Kriställchen von Olivin oder auch Pyroxen eingelagert sind (Abb. 3). Sie enthalten weniger Eisen und Titan aber mehr Kieselsäure und Aluminium als die Basalte (Tabelle 1).

Auch die lunaren Anorthosite sind aus der Kristallisation eines Magmas entstanden. Ihr inneres Gefüge ist aber anders als das der Basalte. Während die letzteren aus ineinander verzahnten Kristallen von Plagioklas, Pyroxen und Ilmenit bestehen, die durch die vollständige Kristallisation einer Schmelze entstanden, sind die meisten Anorthosite ein Haufwerk einzelner verschieden großer Plagioklaskristalle, in deren Zwischenräumen kleine Olivinkristalle, seltener auch Pyroxenkörner eingelagert sind. Derartige Gesteinsgefüge, wie sie auch in irdischen Anorthositen vorkommen, entstehen durch eine Anhäufung der zuerst aus einem Magma auskristallisierenden Plagioklaskristalle, aus welcher eine eisenreiche Restschmelze ausgepreßt wurde.

Da die Anorthositfragmente in den Trümmermassen der Maria sehr viel kleiner sind als die der basaltischen Gesteine, ist es wahrscheinlich, daß sie von weiter entfernten Orten der Mondoberfläche stammen. Man vermutet, daß sie von den Hochländern herkommen. Hierfür sprechen die Ergebnisse

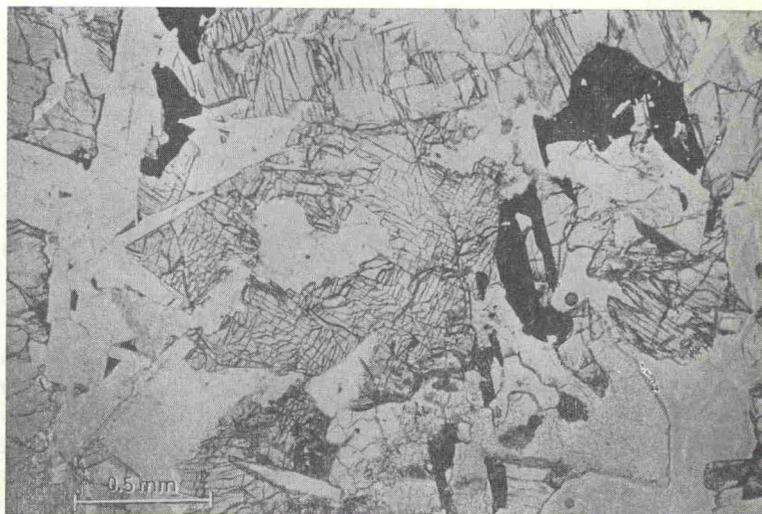


Abb. 2. Grobkörniger Mond-Basalt, mikroskopisches Dünnschliffbild. Farbloser Plagioklas, oft leistenförmig. Bräunlicher Pyroxen mit Spaltrissen. Undurchsichtiger Ilmenit. Cristobalit, farblos mit schuppiger Struktur nahe der rechten unteren Bildecke.

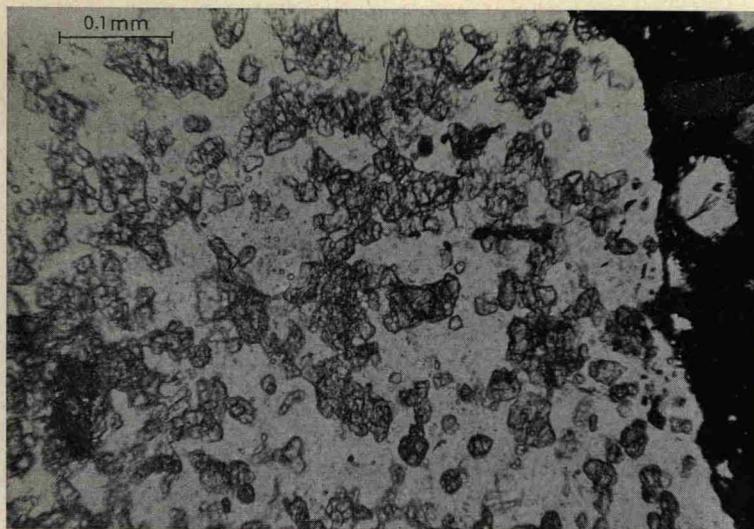


Abb. 3. Mond-Anorthosit, mikroskopisches Dünnschliffbild. Farbloser Plagioklas mit grünlichen Olivinkörnern.

chemischer Analysen der Surveyormissionen von verschiedenen Stellen der Mondoberfläche. Die durch Streuung von α -Strahlen ermittelte mittlere chemische Zusammensetzung der Mondoberfläche im Mare Tranquillitatis (Surveyor 5) entspricht nämlich recht gut der mittleren Zusammensetzung der basaltischen Gesteine von Apollo 11, während Surveyor 7 im Hochlandgebiet nördlich des Kraters Tycho eine Zusammensetzung mit weniger Eisen und Titan und dafür mehr Aluminium feststellte, wie sie der der Anorthosite ähnlich ist. Sollte es sich bei weiteren Apollomissionen bestätigen, daß in den Hochländern helle anorthosidische Gesteine, in den Meeresgebieten dunkle Basalte überwiegen, so wäre dadurch der Helligkeitsunterschied von Maria und Terrae erklärt.

Die Existenz echter magmatischer Gesteine in den Trümmern der Maria beweist, daß es im Mond flüssige Magmen gegeben hat, die in vulkanischen Prozessen bis an die Oberfläche empordrangen (feinkörnige Basalte) oder auch in einer gewissen Tiefe erstarrten. Die Beschaffenheit der magmatischen Gesteine und die Variabilität ihrer Zusammensetzung zeigt, daß die Magmen bestimmte Entwicklungen oder Differentiationen durchmachten, die zur Bildung der einzelnen Gesteinstypen führten. Schon die normalen basaltischen Gesteine aus Plagioklas, Pyroxen und Ilmenit müssen Endprodukte einer Magmendifferenzierung sein, die aus einem Ursprungsmagma dadurch hervorgingen, daß erste Kristallite abgetrennt wurden und wahrscheinlich in die Tiefe absanken. Dies kann unter anderem daraus geschlossen werden, daß die lunaren Basalte die Hauptminerale in einem solchen Mischungsverhältnis enthalten, daß die Gesteine in einem relativ engen Temperaturintervall schmelzen, respektive kristallisieren. Dies ist eine typische Eigenschaft jeder nach längerer Entwicklung eines langsam kristallisierenden Magmas übrigbleibenden Restschmelze. Die in den Apollo-12-Proben vorkommenden Peridotite, die nur aus Olivin und Pyroxen bestehen, sind wahrscheinlich Frühkristallite, die bei der Kristallisationsdifferentiation lunarer Magmen zuerst entstanden. Auch die Anorthosite sind Produkte einer Kristallisations-

differentiation. In diesem Fall haben sich aus einem Ursprungsmagma zuerst Kristalle von Plagioklas und Olivin gebildet, die als Kristallbrei auf der eisenreichen und daher schwereren Restschmelze schwammen. Manche Forscher vermuten, daß sich auf der Oberfläche des in einem frühen Stadium vollständig geschmolzenen Mondes eine mehr oder weniger geschlossene Kruste von Anorthosit gebildet hat, die auf einer eisenreicheren Unterlage etwa basaltischer Zusammensetzung in isostatischem Gleichgewicht schwimmt. Die basaltische Unterlage kommt nach dieser Vorstellung dort zu Tage, wo Einschläge sehr großer Meteoriten die Anorthositkruste zerstört und die Mare-Ebenen erzeugt haben. Die Hochländer wären dann die Reste einer ursprünglichen Anorthositkruste.

Dem Vorkommen vulkanischer Gesteine in den Trümmern der Maria entsprechen Formen der Mondoberfläche, die vulkanisch entstanden sind. Dazu gehören zum Beispiel beulenförmige Aufwölbungen in Mare-Gebieten, die sogenannten Dome, Strukturen, die wie Lavaströme aussehen und manche Rundformen (Krater), welche als vulkanische Einsturzbecken (Calderen) oder als Vulkankegel zu deuten sind.

Altersbestimmungen nach radiometrischen Methoden (Zerfall radioaktiver Atomarten) haben das überraschende Ergebnis gebracht, daß die basaltischen Gesteine von Apollo 11 und 12 vor 2,6 bis $3,6 \cdot 10^9$ Jahren erstarrten. Wenn sich diese hohen Alter weiterhin bestätigen, so sind an und nahe der Mondoberfläche flüssige Magmen nur in einer sehr frühen Zeit aufgetreten (Alter der Erde und des Planetensystems: $\approx 4,6 \cdot 10^9$ Jahre). Anders als auf der Erde, wo es Vulkanismus während der ganzen Spanne der geologischen Vergangenheit bis in die Gegenwart hinein gegeben hat und gibt, ist der Vulkanismus des Mondes wahrscheinlich schon seit geraumer Zeit erloschen.

Breccien und feine Bestandteile des Mondbodens

Neben den magmatisch entstandenen Basalten und Anorthositen kommen als größere Stücke im Boden beider Landstellen sogenannte Breccien vor. Die Breccien sind dunkelgraue, verhältnismäßig weiche Gesteine, die durch Verkittung des Mondbodens durch eine feinverteilte Glasgrundmasse entstanden sind (Abb. 4 und 9). Abgesehen von der glasigen Matrix sind die Bestandteile der Breccien dieselben wie die des Mondbodens. Beide Formationen sind als sekundäre Bildungen aus der Zertrümmerung und Umbildung der primären magmatischen Mineralien und Gesteine entstanden. Man kann die folgenden Komponenten der Breccien und des Mondbodens unterscheiden:

1. Bruchstücke kristalliner Gesteine (Basalte, Anorthosite).
2. Bruchstücke älterer Breccien.
3. Fragmente der Mineralien der kristallinen Gesteine. (in der Hauptsache Pyroxen, Plagioklas, Ilmenit).

4. Gläser verschiedener Farbe (regelmäßig geformte Glaskörper, eckige Bruchstücke, glasige Überzüge auf Gesteinen).
5. Fragmente von nickelreichem Eisen.

Daß bei der Bildung des Mondbodens und der Breccien zerstörende Prozesse hoher Energie gewirkt haben, lehrt die Beschaffenheit vieler Gesteinsfragmente, in denen die einzelnen Mineralkörner von zahlreichen Sprüngen durchsetzt und, wie die optische Untersuchung zeigt, innerlich verbogen oder zu kleinen Bereichen voneinander etwas abweichender Orientierung zerfallen sind. Durch die Untersuchung mit Röntgenstrahlen kann man nachweisen, daß diese Lockerung und Auflösung des Kristallverbandes vielfach bis in die Größenordnung atomarer Abstände reicht: Die durch Beugung der Röntgenstrahlung am Kristallgitter der mechanisch besonders stark zerrütteten Mineralkörner entstehenden Figuren sind in charakteristischer Weise verzerrt, da der einheitliche Kristallverband in sehr kleine, gegeneinander verstellte Bereiche aufgelöst ist.

Außer diesen Erscheinungen intensiver Zertrümmerung von Mineralien und Gesteinen, die auch durch heftige vulkanische Explosionen oder durch tektonische, das heißt gebirgsbildende Vorgänge hervorgebracht sein könnten, beobachtet man aber in den Mineralien der Breccien und des Mondbodens Deformationen und Umwandlungen besonderer Art, von denen man weiß, daß zu ihrer Erzeugung Druckstöße von vielen hundert Kilobar (1 kbar: 1000 at) erforderlich sind. Derartige hohe und plötzliche Druckstöße, sogenannte Stoßwellen, können nicht durch vulkanische Eruptionen oder tektonische Vorgänge erzeugt werden, das heißt, 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. Diese Körper des Planetensystems aller Größenklassen können die Mondoberfläche, je nach ihrer Eigengeschwindigkeit, mit Geschwindig-

keiten zwischen 2,4 und 70 km/sec treffen, ohne, wie auf der Erde, durch eine schützende Atmosphäre abgebremst zu werden.

Trifft ein derart schnelles Projektil auf einen festen Körper, so entsteht eine Stoßwelle, das heißt ein plötzlicher Druckstoß, der sich mit Überschallgeschwindigkeit fortpflanzt. Die Höhe des Druckes hängt sowohl vom Material des Projektils als auch von dem des getroffenen Objektes ab. Durch meteoritische Projektile werden schon bei Geschwindigkeiten von einigen km/sec in silikatischen Gesteinen Druckstöße von mehreren hundert Kilobar erzeugt. Mit der durch die Stoßwelle erzeugten starken Kompression geht auch eine Erwärmung einher. Bei Gesteinen, wie sie auf dem Mond vorkommen, ist die durch Stoßwellendrucke von 600 bis 700 Kilobar erzeugte Temperatur so hoch, daß das Gestein nach dem Durchgang der Stoßwelle vollkommen geschmolzen ist. Stoßwellendrucke über 1000 kilobar bringen ein silikatisches Gestein zum Verdampfen.

Die plötzliche Kompression bei gleichzeitiger Erwärmung ruft in Mineralien typische Umwandlungen der Kristallstruktur und bestimmter Deformationen hervor, die als Spuren der Stoßwelle nach dem Abklingen des Druckstoßes erhalten bleiben und als solche erkannt werden können. Seit einigen Jahren ist es möglich, Stoßwellen im Laboratorium zu erzeugen und ihre Wirkungen auf bestimmte Mineralien zu untersuchen. Außerdem kann man die Effekte der durch Meteoriteneinschlag erzeugten Stoßwellen auf Gesteine auch direkt in großen irdischen Meteoritenkratern beobachten. Mehrere solche Krater sind zum Beispiel in Canada bekannt. In Deutschland ist das vor 15 Millionen Jahren entstandene Nördlinger Ries (Durchmesser 20 km) ein geologisch relativ junger und daher noch recht gut erhaltener Meteoritenkrater.

Auf Grund der Laboratoriumsversuche mit Stoßwellen und an Hand der an irdischen Meteoritenkratern gewonnenen Erfahrungen war es möglich festzustellen, daß es in den Mineralien des Mondbodens unzweideutige Spuren der Einwirkung von Stoßwellen hoher Energie gibt, die allein auf die Wirkung des Aufpralls von Meteoriten zurückgeführt werden können. Derartige Erscheinungen sind an allen drei Hauptmineralien der Mondgesteine zu beobachten:

Die Abbildung 5 zeigt ein Plagioklas-korn mit feinen Lamellen, die sich durch eine geringere Licht- und Doppelbrechung vom Mutterkristall unterscheiden. Solche Lamellen entstehen durch einen partiellen Zerfall des Plagioklaskristalls unter dem Einfluß von Stoßwellen genügend hoher Energie. Sie sind von irdischen Meteoritenkratern wohl bekannt und man kann sie experimentell durch Stoßwellen mit Spitzendrücken zwischen 250 und 300 kbar erzeugen. Durch Stoßwellendrucke über 300 kbar wird der Plagioklas vollständig in eine glasige Substanz umgewandelt. Dies geschieht im festen Zustand, ohne daß der Kristall schmilzt, so daß die äußeren

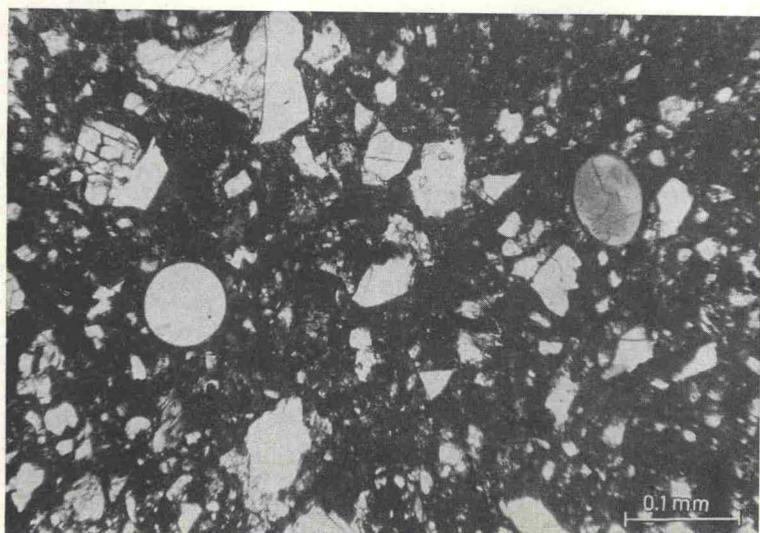


Abb. 4. Mond-Breccie, mikroskopisches Dünnschliffbild. In einer dunklen Grundmasse sind Fragmente von Gläsern, Plagioklas, Pyroxen (Spaltrisse!), Ilmenit und rotationssymmetrische Glaskörper eingebettet.

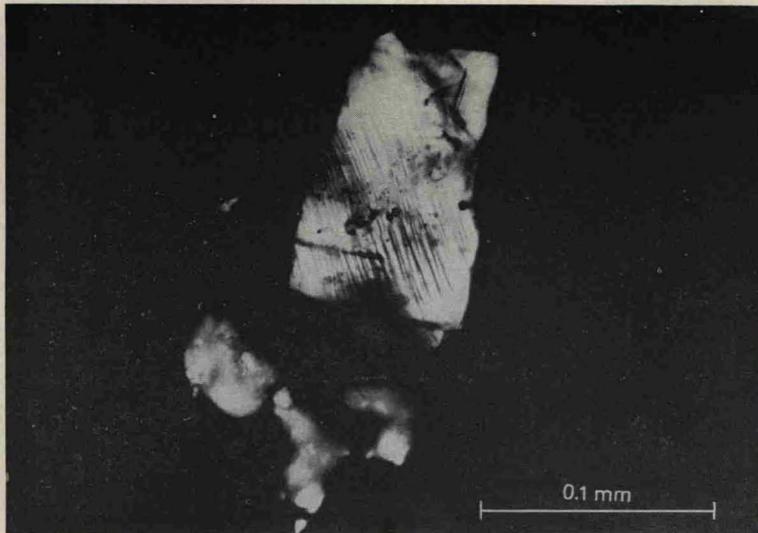


Abb. 5. Plagioklas mit feinen durch Stoßwellen erzeugten Deformationslamellen. Mikroskopisches Bild eines Kornes aus dem Mondboden, gekreuzte Polarisatoren. Die dünnen Lamellen haben keine oder eine nur geringe Doppelbrechung.

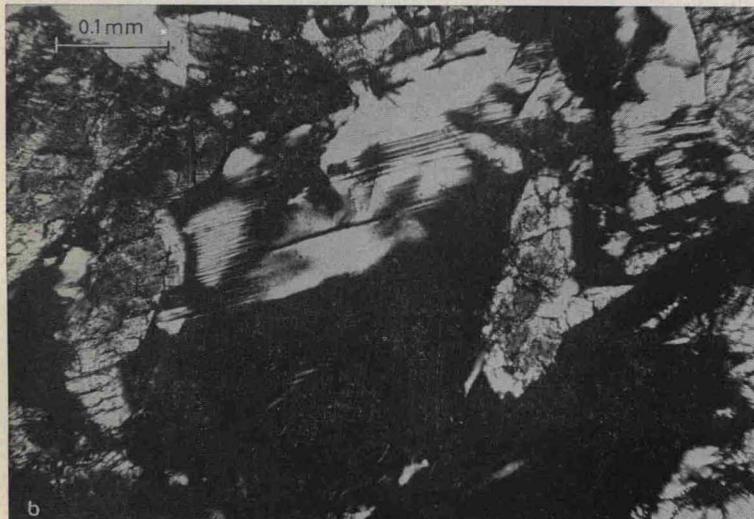


Abb. 6. Umwandlung von Plagioklas in isotropes Glas durch die Einwirkung von Stoßwellen, welche von einem Meteoriteneinschlag herrührten. Mikroskopisches Dünnschliffbild. — a: gewöhnliches Licht: Das große, farblose Plagioklaskorn ist von Pyroxen und Ilmenit umgeben. Deformationslamellen sind schwach erkennbar. — 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 Kornes beginnende Isotropisierung in unregelmäßigen Flecken und dünnen Lamellen. Der Pyroxen ist unversehrt.

Formen der Körner erhalten bleiben. Lichtbrechung und Dichte dieses durch Stoßwellen erzeugten sogenannten diaplektischen Glases sind höher als die eines normalen Glases, das durch Schmelzung von Plagioklas entsteht. Die Abbildungen 6a und 6b zeigen Dünnschliffbilder stoßwellenbeanspruchter Gesteinsfragmente aus dem Mondboden von Apollo 11 und 12, in denen der Plagioklas ganz oder zum größten Teil in diaplektisches Glas umgewandelt ist. Einzelne Körner von diaplektischem Plagioklasglas sind im Mondboden und in den Breccien häufig.

Stoßwellenbeanspruchte Pyroxene enthalten charakteristische Lamellensysteme, die im Polarisationsmikroskop deutlich hervortreten (Abb. 7, 8). Derartige Lamellen bestimmter kristallographischer Orientierung sind Spuren innerkristalliner Gleitvorgänge, die nur durch Stoßwellen in Gang gesetzt werden und bei langsamen Verformungsvorgängen bei niedrigeren Drücken nicht entstehen können.

Auch in Olivinkörnern des Mondbodens kommen ebene Deformationsstrukturen vor, die als Spuren von Gleitvorgängen aufzufassen sind, die, wie man aus Stoßwellenexperimenten weiß, nur durch Stoßwellen erzeugt werden können. Feine Lamellensysteme in Ilmenitkristallen des Mondbodens sind vermutlich ebenfalls durch Stoßwellendeformation entstanden.

Charakteristische Bestandteile des Mondbodens und der Breccien sind verschieden gefärbte und geformte Gläser, die etwa 50% des lockeren Bodens ausmachen. Man kann verschiedene Arten von Gläsern unterscheiden:

Nicht durch Schmelzung, sondern im festen Zustand entstanden sind die bereits erwähnten im Mondboden und in den Breccien häufigen farblosen Fragmente von diaplektischem Plagioklasglas. Durch Schmelzung gebildete Gläser verschiedener Farbe kommen entweder als regelmäßig geformte Körper oder als eckige Bruchstücke vor. Die meisten regelmäßigen Glaskörper sind Kugeln mit Durchmessern zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und 2 mm. Neben den Kugeln gibt es längliche Körper, solche, die in der Mitte eine Einschnürung haben sowie hantelförmige und tränenförmige Gebilde (Abb. 9, 10, 11). Die nicht-kugeligen Körper sind rotationssymmetrisch, die Symmetrieachse ist die längste Achse. Sie sind offenbar aus flüssigen Schmelztropfen entstanden, die durch das Vakuum der Mondoberfläche geschleudert wurden. Unter dem Einfluß der Oberflächenspannung allein müssen die Schmelztropfen Kugelgestalt

annehmen. Enthielten sie Inhomogenitäten, wie Blasen, Mineralkörner oder Partien verschiedener Zusammensetzung, so wurden sie zu länglichen Gebilden deformiert, die sich hauptsächlich um die Längsachse, die Achse des kleinsten Trägheitsmoments, drehten. Gelegentliche Drehungen um die Achse des größten Trägheitsmoments verursachten die Bildung einer Einschnürung in der Mitte, die Entstehung hantelartiger Formen und schließlich auch eine Trennung in zwei kleinere tränenförmige Körper.

Manche Glaskugeln bestehen aus einem sehr homogenen Glas, mit höchstens einer oder wenigen Blasen. Viele Glaskugeln sind mehr oder weniger inhomogen; sie enthalten Glasschlieren verschiedener Farbe und Lichtbrechung, viele Blasen und Mineraleinschlüsse, die oft angeschmolzen sind, sowie manchmal Spuren von Stoßwellenbeanspruchung zeigen. Diese Gläser sind offensichtlich durch die Aufschmelzung primärer Gesteine entstanden. Viele homogene Gläser haben sicherlich denselben Ursprung und verdanken ihre Gleichmäßigkeit einer längerdauernden Erhitzung auf höhere Temperaturen. Es kann aber auch sein, daß sehr homogene Glaskörper durch die Kondensation eines Silikatdampfes entstanden.

Sehr viel häufiger als regelmäßig geformte Glaskörper kommen in den Breccien und im Mondboden eckige Glasfragmente vor, die in Farbe und chemischer Zusammensetzung dieselbe Variabilität aufweisen wie die regelmäßigen Körper. Auch unter diesen Fragmenten gibt es sehr homogene Gläser und solche, die voll von Schlieren, Blasen und Mineralkörnern sind. Diese Glasfragmente entstanden ebenfalls aus Gesteinsschmelzen und stellen Bruchstücke größerer Glasmassen dar.

Einen wichtigen Hinweis auf die Entstehung der Gläser bieten die sowohl in den Fragmenten als auch in regelmäßigen Körpern häufig vorkommenden kleinen Kügelchen aus Eisen mit Nickelgehalt bis zu 13%. Der hohe Nickelgehalt zeigt, daß es sich um eine Beimengung von meteoritischem Eisen handeln muß.

Die meisten Gläser entstanden aus Schmelzen, die so schnell abgekühlt wurden, daß es nicht zur Bildung von Kristallen kam. In manchen Fällen war jedoch die Abkühlung langsamer, so daß sich Kristalle zu bilden begannen. Nicht selten finden sich in Glaskörpern und Glasfragmenten während der Abkühlung entstandene Kristallskelette und Kristalle von Pyroxen, Ilmenit und auch Feldspat. Charakteristisch sind Glaskügelchen mit radialstrahligem Pyroxen, die an die Chondren der Chondrite, der häufigsten Art der Steinmeteorite, erinnern.

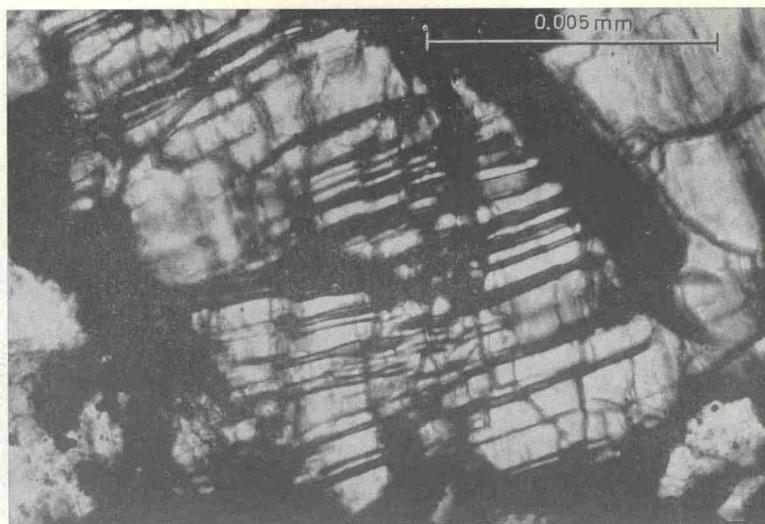


Abb. 7. Durch die Stoßwelle eines Meteoriteneinschlags erzeugte Deformationslamellen in Pyroxen, mikroskopisches Dünnschliffbild, gekreuzte Polarisatoren.

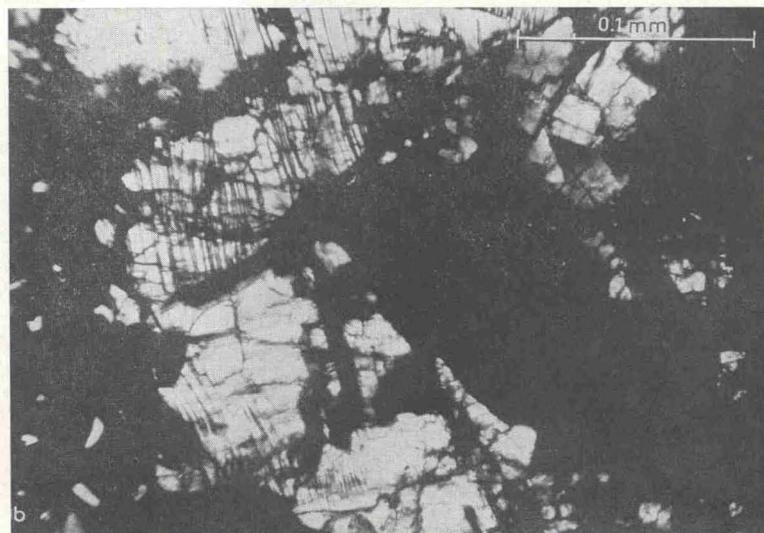
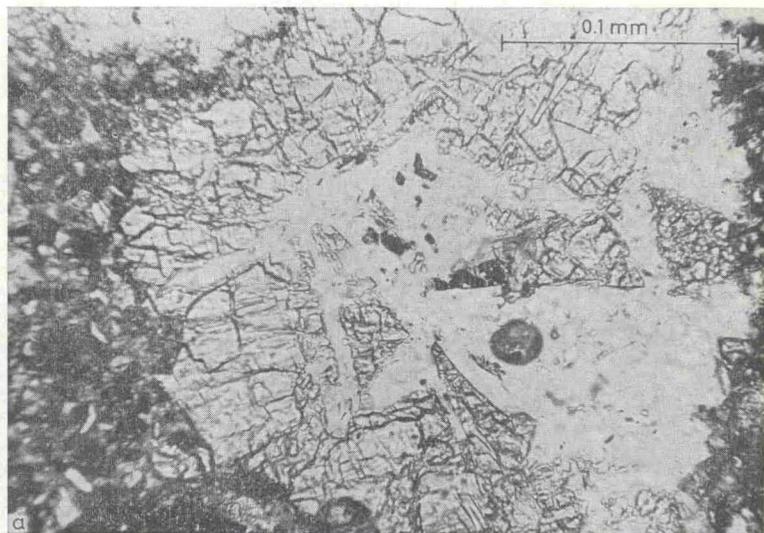


Abb. 8. Durch die Stoßwelle eines Meteoriteneinschlags veränderter Mondbasalt. Mikroskopisches Dünnschliffbild. — a: Gewöhnliches Licht. Pyroxene grau mit Bruchflächen. Der farblose Plagioklas ist in ein Glas umgewandelt. — b: Gekreuzte Polarisatoren. Pyroxene mit Deformationslamellen. Das aus dem Plagioklas entstandene Glas erscheint dunkel.

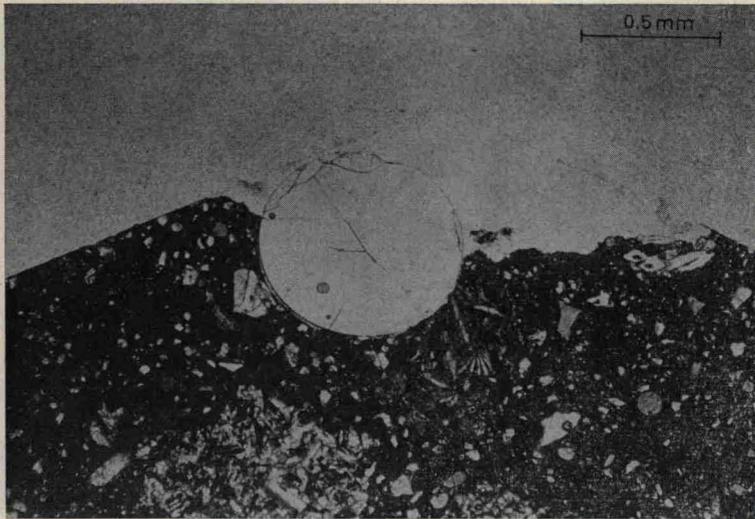


Abb. 9. Mond-Breccie mit Mineral- und Gesteinsfragmenten und einer farblosen Glaskugel. Mikroskopisches Dünnschliffbild.

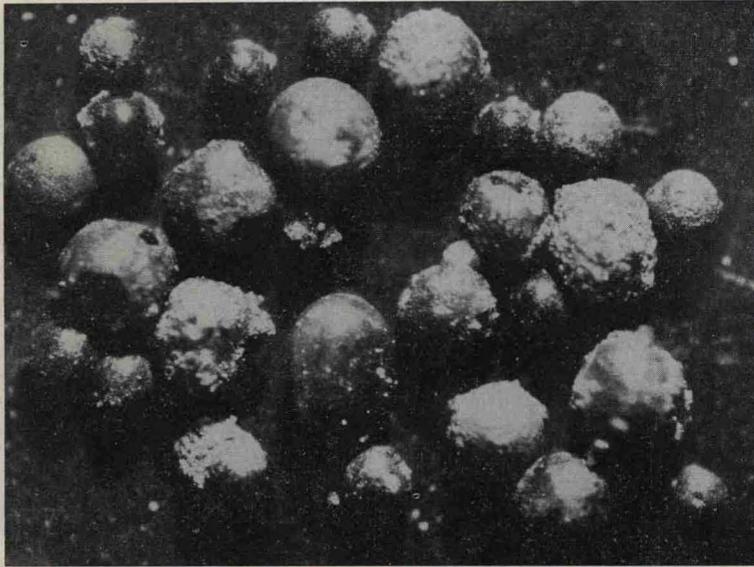


Abb. 10. Glaskugeln aus dem Mondboden von der Landestelle von Apollo 11 im Meer der Ruhe (Mare Tranquillitatis), Durchmesser der Kugeln: 0,25 bis 0,5 mm.

Fragmente und Glaskörper kommen in allen möglichen Farben vor: farblos, grünlich, gelb, braun, rot, violett und fast undurchsichtig. Ihre Lichtbrechung variiert in weiten Grenzen. Entsprechend ist die chemische Zusammensetzung der einzelnen Gläser, wie sie mit Hilfe der Elektronenstrahlmikrosonde bestimmt werden kann, sehr verschieden. Nahezu jedes Glasstückchen hat eine besondere chemische Zusammensetzung, aber jede besondere Zusammensetzung kann aus je einer bestimmten Mischung der drei Hauptminerale der Mondgesteine Plagioklas, Pyroxen und Ilmenit abgeleitet werden.

Das Zusammenvorkommen von Gläsern recht verschiedener chemischer Zusammensetzung unterscheidet den Mondboden von den lockeren Auswurfmassen irdischer Vulkane. Solche terrestrische vulkanische Tuffe sind oft (wie z. B. der Bimsstein) reich an Glasteilchen, die aus schnell abgekühlten Lavafetzen entstanden. Doch haben diese vulkanischen Glaspartikel alle dieselbe oder nahezu dieselbe che-

mische Zusammensetzung, da sie aus einem einheitlichen, gut durchmischten Magma stammen, das durch eine vulkanische Eruption gefördert wurde. Es ist deshalb nicht wahrscheinlich, daß die Gläser des Mondbodens aus Eruptionen von Mondvulkanen stammen. Sie sind vielmehr durch eine plötzliche Aufschmelzung von Mondgesteinen und ein Zerreißen der unvermischten Schmelze in kleine Partien entstanden, so daß jedes Glaspartikel einem besonderen Mengenverhältnis der Hauptminerale entspricht. Da stoßwellenbeanspruchte Mineralkörner und Nickeleisentröpfchen in den Gläsern häufig sind, muß man annehmen, daß die wiederholten Aufschläge von Meteoriten Mondgesteine oder auch Mondboden zum Schmelzen brachten und das zu Glas erstarrte Material weithin über die Mondoberfläche verteilten.

Trotz der im einzelnen variablen chemischen Zusammensetzung der Gläser ergibt eine Statistik vieler Analysen, daß es zwei Hauptgruppen von Gläsern gibt, die sich nach Farbe und chemischer Zusammensetzung unterscheiden: Eine Gruppe umfaßt die dunkleren Gläser von brauner, gelber, roter, violetter und fast undurchsichtiger Farbe. Sie sind reicher an Eisen, Titan und Mangan, und ärmer an Kieselsäure als die Gläser der zweiten Gruppe, zu welcher die farblosen und grünlichen Gläser gehören, die relativ wenig Eisen und Mangan, dafür aber mehr Aluminium und Kieselsäure enthalten.

Wie die Tabelle 1 zeigt, entspricht die Zusammensetzung der dunklen Gläser recht gut der mittleren Zusammensetzung der dunklen Gläser recht gut der mittleren Zusammensetzung der basaltischen Gesteine, während die hellen Gläser ähnlich zusammengesetzt sind

wie die Anorthosite. Die Gläser sind daher Äquivalente oder Umbildungsprodukte der beiden Haupttypen der auf der Mondoberfläche gefundenen magmatischen Gesteine. Die dunklen Gläser entstanden durch Meteoriteneinschläge auf basaltisches Substrat, die hellen Gläser durch Einschläge auf anorthositisches Gesteine. Da manches dafür spricht, daß An-

	Dunkle Gläser	Basalt	Helle Gläser	Anorthosit
SiO ₂	38,55	40,69	45,08	46,0
TiO ₂	8,30	10,78	0,71	0,3
Al ₂ O ₃	10,84	9,49	24,14	27,3
FeO	17,92	19,16	6,87	6,2
MgO	9,45	7,55	7,91	7,9
CaO	10,29	10,97	13,72	14,1
Na ₂ O	0,43	0,46	0,43	0,3
K ₂ O	0,11	0,18	0,12	Spur

Tab. 1. Chemische Zusammensetzung von dunklen und hellen Gläsern, Basalt und Anorthosit des Mondbodens (Apollo 11).

orthosite vorwiegend auf den Hochländern, Basalte dagegen vorwiegend in den Mare-Senken vorkommen, kann man weiter schließen, daß die hellen Gläser durch Meteoriteneinschläge auf dem Hochland entstanden und in die Trümmernmassen der Mare-Senken eingestreut wurden, während die dunkleren Gläser durch Einschläge im Maregebiet erzeugt wurden, das heißt wahrscheinlich mehr in der Nähe der Landestelle von Apollo 11 und 12.

Daß Meteoriteneinschläge auf die Mondoberfläche gewirkt und ihre Beschaffenheit verändert haben, kann man auch unmittelbar auf der Oberfläche der Gesteins- und Glasfragmente beobachten. Viele Gesteinsstücke sind mit zahlreichen kleinen etwa halbkugeligen Löchern bedeckt, die von Glas überzogen und oft von einem weißen Hof pulverisierter Mineralien umgeben sind. Ähnliche kleine Krater kommen auch auf der Oberfläche von Glaskugeln vor, ihre Größe geht bis auf wenige Mikron und darunter herab. Die Krater auf Glas sind von radialen Rissen umgeben. Aus der Beschaffenheit dieser Mikrokrater kann man schließen, daß sie von den Einschlägen kleiner und sehr kleiner Meteoriten herrühren, die anders als auf der durch die Lufthülle geschützten Erde die Mondoberfläche mit denselben kosmischen Geschwindigkeiten erreichen können, wie die großen Meteoriten.

Auf vielen Gesteinsoberflächen finden sich unregelmäßige Spritzer oder Überzüge braunen, blasi-

gen Glases. Daß auch diese Glasüberzüge von Meteoriteneinschlägen stammen, geht daraus hervor, daß in ihnen Eisen-Nickelkugeln und Mineralfragmente mit Stoßwelleneffekten vorkommen. Außerdem ließ sich in einigen Fällen nachweisen, daß das Gestein unter dem Glasüberzug durch starke Stoßwellen verändert ist.

Stoßwellenbeanspruchte Mineralkörner und die verschiedenen Glaspartikel, die wahrscheinlich alle durch Stoßwellen hoher Energie erzeugt wurden, machen einen hohen Anteil des Mondbodens aus. Der Mondboden ist eine Trümmernmasse, die durch viele Einschläge von großen und kleinen Meteoriten oder Kometen erzeugt und weithin über die Mondoberfläche verteilt wurde. Viele, wahrscheinlich die meisten Ringstrukturen sind daher, wie man schon aus ihrer Gestalt geschlossen hat, nicht vulkanischen Ursprungs sondern durch den Einschlag extralunarer Körper erzeugt worden.

Auf welche Weise die verfestigten Breccien entstanden, ist noch nicht klar. Vielleicht handelt es sich um die Produkte von Einschlägen in den lockeren Mondboden, dessen feiner Anteil durch die Stoßwelle zu einer die gröberen Fragmente verkittenden Glasgrundmasse aufgeschmolzen wurde. Daß solche Vorgänge sich mehrfach wiederholten, erkennt man an älteren Breccienfragmenten, die in den Breccien eingeschlossen vorkommen.

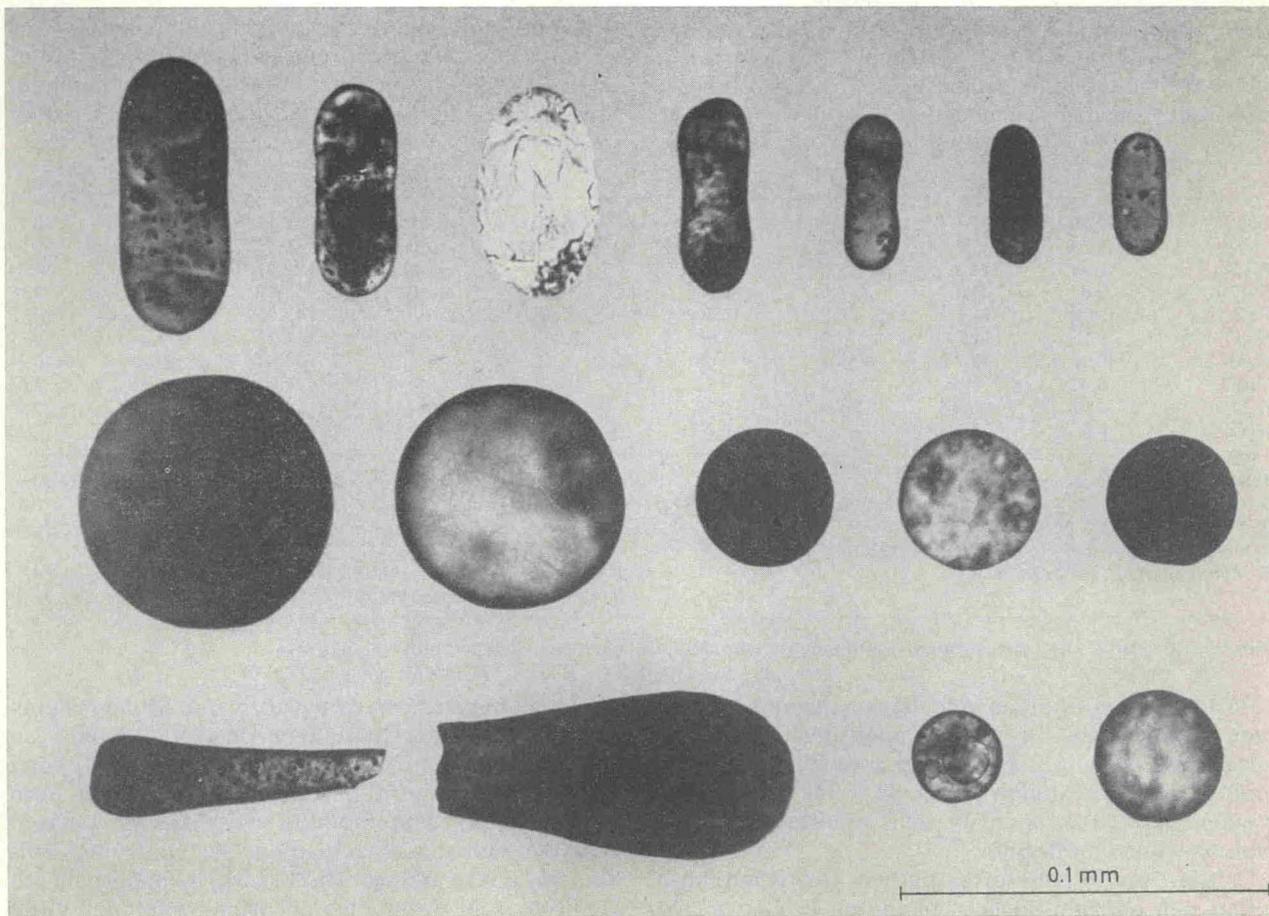


Abb. 11. Längliche, kugelige und tränenförmige Glaskörper verschiedener Farbe aus dem Mondboden und den Breccien von Apollo 11. Die länglichen Körper der obersten Reihe enthalten z. T. Reste von Mineralkörnern und Glaspatrien verschiedener Farbe und Zusammensetzung. In der kleinen Kugel der unteren Reihe sind zwei Glaskugeln mit niedriger Lichtbrechung eingeschlossen.

Auch am feinen Anteil des Mondbodens wurden radiometrische Altersbestimmungen nach verschiedenen Methoden ausgeführt. Sie ergaben übereinstimmend ein Alter von $4,65 \cdot 10^9$ Jahren. Der feine Anteil des Mondbodens erscheint also älter als die bisher untersuchten magmatischen Gesteine. Dieser Altersunterschied ist erklärlich, wenn man bedenkt, daß der Mondboden das Produkt eines langdauernden Bombardements der Mondoberfläche durch Meteoriten ist. In seinem feinen Anteil enthält er vorwiegend ältere, wiederholt zerkleinerte Gesteinskomponenten, während jüngere magmatische Gesteine weniger stark beansprucht wurden und daher noch als größere Steine erhalten sind.

Chemische Zusammensetzung

Die Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die chemische Zusammensetzung der Mondgesteine und des Mondbodens. Deutlich tritt der Unterschied zwischen den dunklen Basalten (Nr. 1, 2) und den hellen Anorthositen (Nr. 3) hervor, die wegen ihres höheren Feldspat- und geringeren Ilmenitgehaltes reicher an SiO_2 , Al_2O_3 und CaO und ärmer an FeO und TiO_2 sind. Der feine Anteil des Mondbodens (Nr. 4, 5) ist chemisch im ganzen den Basalten ähnlich. Die höheren Gehalte an SiO_2 und Al_2O_3 kommen dadurch zustande, daß der Boden an den Landstellen von Apollo 11 und 12 aus der Zertrümmerung und Umwandlung von viel basaltischem Gestein und weniger Anorthosit entstanden ist. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß Basalte und Anorthosite nur Spuren von Nickel enthalten, während in den Bodenproben 0,2% Nickel festgestellt wurden. Dies entspricht einer Beimengung weniger Prozente meteoritischer Substanz von der Zusammensetzung der Chondrite.

tativ entspricht ihr Mineralbestand dem der irdischen Basalte. Die auf der Erde häufigsten tholeitischen Basalte (Nr. 8), deren Magmen aus dem oberen Erdmantel stammen, enthalten jedoch stets dreiwertiges Eisen, chemisches gebundenes Wasser sowie mehr Alkalien und Kieselsäure und weniger TiO_2 als die Mondbasalte. Unter den kieselsäureärmeren Alkaliolivinbasalten gibt es zwar einzelne Typen mit hohem Titangehalt (bis 7%). Doch enthalten gerade diese Gesteine besonders viel Alkalien, dreiwertiges Eisen und Wasser. Bemerkenswerte Unterschiede bestehen auch hinsichtlich verschiedener Spurenelemente. So enthalten die Mondbasalte rund 5 mal so viel Seltene Erden als die irdischen Basalte, mehr Barium, sehr viel geringere Mengen an den flüchtigen Elementen Silber, Cadmium, Zink, Indium, Thallium und Wismut sowie an den siderophilen Elementen Nickel, Kobalt, Iridium und Gold.

Die häufigsten Steinmeteorite, die Chondrite, bestehen im wesentlichen aus Olivin, Pyroxen und metallischem Eisen. Ihr silikatischer Anteil (Nr. 6) ist daher ärmer an Kieselsäure und Aluminium und reicher an Magnesium als die Mondgesteine.

Mineralogisch und chemisch den Mondbasalten am ähnlichsten sind die aus Pyroxen und Plagioklas bestehenden achondritischen Meteorite oder Eukrite (Nr. 7). Doch bestehen auch hier Unterschiede, so zum Beispiel hinsichtlich des Titangehaltes.

Folgerungen

Ob der Mond bei der Bildung des Planetensystems als ein selbständiger Körper entstand oder ob er einmal von der Erde abgespalten wurde, kann man heute noch nicht mit Sicherheit sagen. Eines geht jedoch

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	40,69	40	46,0	42,25	42	39,88	48,17	50,83	45,78
TiO_2	10,78	3,7	0,3	7,24	3,1	0,15	0,51	2,03	2,63
Al_2O_3	9,49	11,2	27,3	13,83	14	2,31	13,91	14,07	14,64
Fe_2O_3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,17	2,88	3,16
FeO	19,16	21,3	6,2	15,80	17	13,12	15,99	9,00	8,73
MgO	7,55	11,7	7,9	7,97	12	24,98	7,10	6,34	9,39
CaO	10,97	10,7	14,1	11,96	10	1,90	10,94	10,42	10,74
Na_2O	0,46	0,45	0,3	0,43	0,40	0,88	0,67	2,23	2,63
K_2O	0,18	0,065	Spur	0,13	0,18	0,14	0,13	0,82	0,95
H_2O	0,0	0,0	...	0,0	0,0	0,37	0,44	0,91	0,76

1 Basalt, Apollo 11 (Mittel)

2 Mittel von 9 basaltischen Gesteinen von Apollo 12 (PET 1970)

3 Anorthosit, Apollo 11 (Wood, 1970)

4 Mondboden <1 mm, Apollo 11 (Wiik, 1970)

5 Mondboden <1 mm, Apollo 12

6 Chondrite (low iron — low metal group) Mittl. Zusammensetzung des silikat. Anteils

7 Mittel achondritischer Meteorite (Pyroxen-Plagioklas Achondrite)

8 Tholeitische Basalte (Mittel)

9 Alkaliolivin-Basalte (Mittel)

Tab. 2. Chemische Zusammensetzung von Mondgesteinen, Mondboden, Meteoriten und irdischen Basalten.

Allen Mondgesteinen gemeinsam ist das Fehlen von Wasser und CO_2 und der niedrige Oxidationsgrad des Eisens, das nur in der zweiwertigen Stufe und in geringer Menge sogar als freies Metall vorkommt. Auffallend sind die sehr niedrigen Gehalte von Natrium und Kalium.

Weder unter den terrestrischen Gesteinen noch unter den einzigen bisher bekannten Proben extraterrestrischer Materie, die als Meteoriten auf die Erde fallen, gibt es Gesteine, deren chemische Zusammensetzung der der Mondgesteine gleicht. Quali-

aus dem hohen Erstarrungsalter der Mondgesteine hervor: Wenn der Mond von der Erde stammt, so muß die Trennung schon sehr bald nach der Bildung des Erdkörpers erfolgt sein. Dafür sprechen auch die chemischen Unterschiede zwischen den lunaren Basalten und den basaltischen Gesteinen der Erdkruste: Lunare und irdische Basalte müßten chemisch ähnlicher sein, 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 leichten, das heißt leicht verdampfenden Elementen verarmt. Der Verlust leichtflüchtiger Bestandteile ist aber beim Mond noch weitergegangen als bei der Erde, was man an den sehr geringen Alkaligehalten aber auch an den niedrigen Konzentrationen leichtflüchtiger Spurenelemente der lunaren Gesteine feststellen kann. Die Materie des Mondes sollte sich daher bei höheren Temperaturen oder in einem geringeren Schwerfeld als die Materie der Erde gesammelt haben. Merkwürdig sind die niedrigen Konzentrationen der sogenannten siderophilen Elemente in den Mondgesteinen. Siderophil sind Elemente, die bei der Berührung einer Silikatschmelze mit flüssigem Eisen vorzugsweise in das Eisen gehen. Der Mangel an siderophilen Elementen läßt daher vermuten, daß die Schmelze, aus der die Mondgesteine entstanden, einmal mit einer Eisenschmelze in Berührung war. Im Mondkörper selbst kann dies 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 ($3,3 \text{ g/cm}^3$) nicht höher ist als die der Gesteine der Oberfläche. Der Mangel an siderophilen Elementen könnte deshalb dafür sprechen, daß die Mondmaterie aus der äußeren Sphäre eines sich bildenden größeren Körpers abgetrennt wurde, der sich bereits in einen Eisenkern und eine äußere Silikathülle gesondert hatte. Ob dies die Erde oder ein anderer Körper war, ist heute noch nicht zu entscheiden.

Die Oberfläche des Mondes als die Grenze zwischen dem kompakten Mondkörper und dem äußeren planetarischen Raum war der Schauplatz interner Prozesse und externer Ereignisse. Daß Vorgänge beider Art die Oberfläche geformt haben, ist das wichtigste Ergebnis der ersten Untersuchungen der Proben aus dem Mare Tranquillitatis (Apollo 11) und

dem Oceanus Procellarum (Apollo 12). Das Vorkommen magmatischer Gesteine zeigt, daß der Mond einmal ganz oder doch teilweise geschmolzen war. Bei der Erstarrung der Magmen hat Kristallisationsdifferentiation, das heißt die Abtrennung zuerst unterschiedlicher Kristallisate von Restschmelzen, ähnlich wie auf der Erde, wenn auch nicht in so ausgeprägtem Maße, zu magmatischen Gesteinen verschiedener Zusammensetzung geführt. Aus dem hohen Alter aller bisher untersuchten Magmengesteine geht hervor, daß die magmatisch-vulkanische Periode der Mondentwicklung lange zurückliegt und heute wahrscheinlich ganz abgeklungen ist.

Während seiner ganzen Geschichte war die Oberfläche des Mondes dem 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 Steine meteorite wird es sich auch um Kometen gehandelt haben. Die Energie dieser Einschläge hat einmal charakteristische Oberflächenformen, die großen, kleinen und kleinsten Einschlagkrater hervorgebracht und zum anderen die mächtigen Trümmernmassen aus mechanisch zerbrochenem und durch Stoßwellen deformiertem und umgewandeltem Gesteinsmaterial erzeugt und verteilt, die als Mondboden oder Regolith die Oberfläche des Mondes bedecken.

SCHRIFTTUM

Die in diesem Bericht verwerteten Untersuchungsergebnisse an den Proben von Apollo 11 und 12 findet man an folgenden Stellen: Preliminary Examination of Lunar Samples from Apollo 11. *Science* **165**, 1211—1227 (1969). — Moon Issue: *Science* **167**, 449—784 (1970). — Preliminary Examination of Lunar Samples from Apollo 12. *Science* **167**, 1325—1339 (1970). — Während der Drucklegung erschienen drei Sammelbände mit vielen Aufsätzen über die Untersuchungsergebnisse an den Proben von Apollo 11: Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference: Volumes I, II, III. Pergamon Press 1970.

Die NATURWISSENSCHAFTLICHE RUNDSCHAU erscheint monatlich. Bestellungen nimmt jede Buchhandlung des In- und Auslandes, die Post oder der Verlag entgegen. In den Ländern Belgien, Dänemark, Großbritannien, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Portugal, Schweden, der Schweiz und der Vatikanstadt ist der Bezug durch die Post ebenfalls möglich. *Bezugspreis*: viertelj. DM 13.80. Einzelheft DM 5.—. Studenten u. Assistenten in nicht voll bezahlter Stellung viertelj. DM 11.—.

Probeheft: kostenlos durch den Verlag.

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft m. b. H., Stuttgart N, Birkenwaldstraße 44, Postfach 40.