

Mondgesteine

Von Dr. Gero K u r a t, Wien

Vortrag, gehalten am 12. April 1972

Seit der die Welt in Atem haltenden ersten Landung von Menschen auf dem Mond wurden bis heute vier weitere bemannte (Apollo 12, 14, 15 und 16) und zwei unbemannte Landungen (Luna 16 und 20) auf dem Mond zum Zwecke einer Probennahme durchgeführt. Das gesamte, bis heute zurückgebrachte Material (rund 270 kg) würde allein ausreichen, einen Großteil der rund 200 wissenschaftlichen Teams, die zur Zeit mit der Untersuchung der Mondproben betraut sind, für die nächsten zehn Jahre voll zu beschäftigen. Eine bemannte Landung ist noch für dieses Jahr geplant, wodurch sich die Gesamtmasse des zur Untersuchung verfügbaren Mondmaterials noch wesentlich vergrößern müßte. Das Mondmaterial ist das erste Material von einem extraterrestrischen Körper mit genau bekannten Beprobungspunkten. Dadurch unterscheidet sich dieser Forschungszweig der Planetologie deutlich von der Meteoritenforschung, wel-

che bisher die einzige extraterrestrische Forschung auf erdwissenschaftlichem Gebiet betrieb. Der, verglichen mit den vermutlichen Meteoriten-Mutter-Körper(n), wesentlich erdnähere Mond ist der ideale Kandidat für den Beginn einer geologischen Erforschung des Sonnensystems. Der 24. Juli 1969, an dem die ersten Proben vom Mond zur Erde gebracht wurden, wird ein Markstein und die folgenden Untersuchungen dieser Apollo-11-Gesteine das erdwissenschaftliche Ereignis dieses Jahrhunderts bleiben. Daran werden auch die noch zu erwartenden Proben vom Mars und möglicherweise auch anderen Planeten nichts ändern.

K l a s s i f i k a t i o n

Prinzipiell lassen sich alle bisher bekannten Gesteine vom Mond einer der drei Hauptgesteinsarten zuordnen:

1. Magmatische Gesteine
2. Sedimentgesteine
3. Metamorphe Gesteine

Die magmatischen Gesteine umfassen sowohl vulkanische (extrusive) als auch Tiefen-(intrusive) Gesteine. Die Sedimente umfassen den Mondboden und Brekzien, also Gesteine bestehend aus Gesteins-, Mineral- und Glas- (= teilweise oder ganz aufgeschmolzenes Gestein) Bruchstücken. Metamorphe Gesteine werden sowohl von rekristallisier-

ten magmatischen als auch von umgewandelten Sedimenten repräsentiert. Einige Schwierigkeiten bei der Klassifikation ergeben sich allerdings aus der Tatsache, daß alle Übergänge zwischen magmatischen und sedimentären Gesteinen einerseits und den Metamorphiten andererseits zu beobachten sind und daß durch die besonderen genetischen Umstände manchmal eine Trennung zwischen magmatischen und sedimentären Gesteinen (Pyrosedimente, verschweißte Tuffe, ignimbritähnliche Gesteine) recht schwer fällt. Eine weitere Erschwernis ergibt sich daraus, daß viele Gesteine nicht (wie es in der irdischen Petrographie üblich ist) zumindest im Handstück vorliegen, sondern nur als kleine Splitter im Mondboden und in den Brekzien vorkommen.

Die Häufigkeit der Hauptgesteinsarten an den verschiedenen Landeplätzen ist recht unterschiedlich. So wurden von Apollo 12 im Oceanus Procellarum hauptsächlich Magmatite gesammelt. Ansonsten überwiegen Lockersedimente (Mondboden) und Brekzien. Da alle sekundären Gesteinsarten ja irgendwann einmal aus primären Magmatiten entstanden sind, ist es sinnvoll, zuerst diese Magmatite zu klassifizieren.

Am bequemsten läßt sich dies auf Grund des Gehaltes an normativen Mineralen (ein aus der Analyse berechneter Mineralbestand) durchführen (Abb. 1). Dieser Weg ist auch notwendig, da die

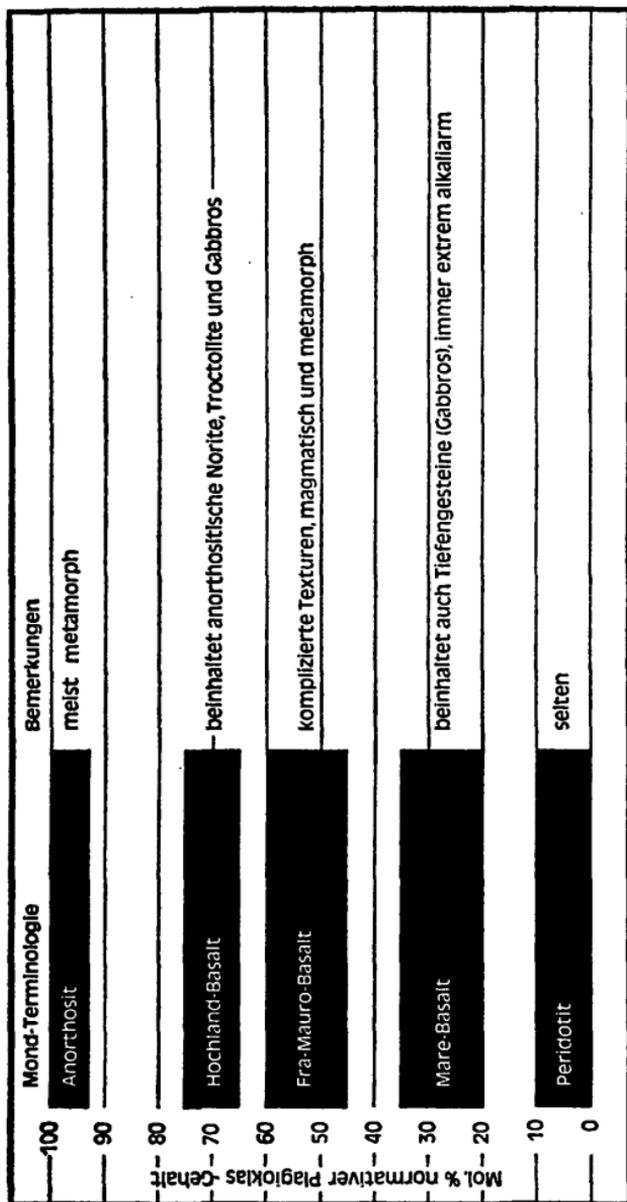


Abb. 1. Klassifikation der wichtigsten magmatischen Gesteine des Mondes.

aufgeschmolzenen Gesteine (= Gläser) mitberücksichtigt werden müssen und diese ja keinen tatsächlichen (modalen) Mineralbestand haben. Grob läßt sich dabei eine Einteilung der Gesteine auf Grund ihres normativen Feldspat-Gehaltes treffen. Die ganze Skala von feldspatfreien Duniten (über 90% Olivin) über Peridotite und Basalte bis zu den Anorthositen (über 90% Plagioklas) kommt in den Mondgesteinen vor. Dabei gibt es wohl alle Übergänge, jedoch gruppieren sich die Gesteine meist zu deutlichen Häufigkeits-Maxima, wie sie in der Abbildung angegeben sind. Typische chemische Analysen dieser Gesteine gibt die Tabelle 1. Deutlich ist darin der generell niedrige Alkalien-Gehalt der Mondgesteine zu erkennen, worin einer der größten Unterschiede zu den terrestrischen Basalten liegt. Auch Elemente wie Vanadium, Chlor, Kupfer und Nickel sind in bedeutend geringeren Konzentrationen vorhanden als in irdischen Basalten. Andererseits sind die Mondbasalte durchwegs reicher an Elementen wie Chrom, Titan, Zirkonium, Hafnium und den Seltenen Erden, wobei die letzteren vor allem in den etwas Alkali-reicheren Fra-Mauro-Basalten sehr häufig sind. Es bestehen also deutliche Unterschiede zwischen den Mondbasalten und den Basalten der Erde. Eine direkte genetische Beziehung und daher eine Entstehung des Mondes aus der Erde auf dem Wege eines „Herausreißens“ (Darwin-Theorie) ist daher wohl auszuschließen.

Tabelle 1: Chemismus der magmatischen Mond-Gesteine (Gew. % Oxide)

	Mare Basalt 10045 (aus 14318)	Fra Mauro Basalt (aus 14318)	Hochland-Basalt (aus 14318)	Anorthosit 15415	Dunit (aus 14318)
SiO ₂	39,6	48,8	47,2	44,1	40,3
TiO ₂	11,1	1,3	0,3	0,02	0,3
Al ₂ O ₃	9,5	16,8	24,8	35,5	3,7
Cr ₂ O ₃	0,5	0,2	0,2	—	0,1
FeO	19,2	7,3	6,0	0,2	12,2
MnO	0,3	0,1	0,1	—	0,1
MgO	8,1	13,1	5,7	0,1	41,2
CaO	11,1	11,3	14,9	19,7	1,7
Na ₂ O	0,4	1,2	0,5	0,3	0,1
K ₂ O	0,1	0,6	0,2	—	0,02
P ₂ O ₅	0,04	0,3	0,1	0,01	0,4
	Agrell et al. (1979)	Kurat et al. (1972)	Kurat et al. (1972)	LSPET (1972)	Kurat et al. (1972)

Die Vielfältigkeit der Gesteine, obwohl für irdische Begriffe recht beschränkt, zeigt schon deutlich, daß auf dem Mond magmatische Prozesse am Werke waren und zu dieser Differenzierung des (als chemisch einheitlich angenommenen) Urmaterials führten. Dieses Ausgangsmaterial muß überdies deutlich verschieden von dem der irdischen Basalte gewesen sein, denn die generelle Anreicherung von schwerflüchtigen Oxiden in den (schon differenzierten) Gesteinen auf dem Mond setzt ein an diesen Oxiden entsprechend reiches Ausgangsmaterial voraus.

Von besonderer Bedeutung ist nun auch die Frage, wo diese verschiedenen Gesteine in der Hauptsache vorkommen. Darüber gibt uns die Häufigkeit dieser Gesteine an den verschiedenen Aufsammlungspunkten auf dem Mond Auskunft. Die Abbildung 2 zeigt die ungefähre Verteilung der verschiedenen Gesteine an den verschiedenen Landplätzen. Dabei wird deutlich, daß die Missionen Apollo 11 und 12 und Luna 16, welche alle in typischen Mare-Gebieten landeten, überwiegend Mare-Basalte brachten. Da ja nur die Oberfläche in der Nähe der jeweiligen Landestelle beprobt wurde, sind diesen Mare-Basalten unterschiedliche Mengen an Mare-fremdem Material als Krater-Auswurfmaterial von den mehr oder weniger nahe gelegenen Hochländern beigemischt. Auf Grund der Häufigkeit bestimmter Gesteine läßt sich jedoch

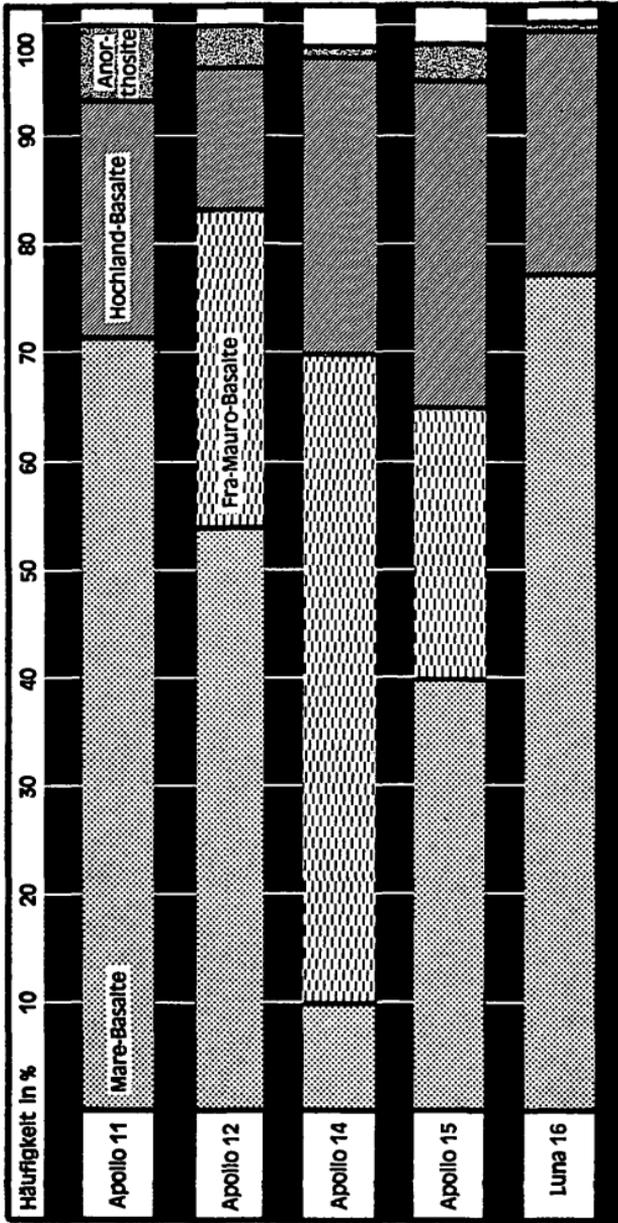


Abb. 2. Häufigkeit der wichtigsten magnetischen Mondgesteine an der verschiedenen Landeplätzen.

klar feststellen, daß die Mare von Mare-Basalten aufgebaut werden. Diese sind sich von den verschiedenen Maria wohl prinzipiell ähnlich, unterscheiden sich andererseits jedoch in verschiedenen Elementgehalten, was eine Unterteilung möglich macht. Von besonderem Interesse ist hier vor allem auch die Apollo-14-Mission, welche im Fra-Mauro-Hochland landete. Dieses Hochland wird von der sogenannten Fra-Mauro-Formation gebildet, welche deutlich ein Auswurfmaterial aus dem Mare Imbrium darstellt. Dementsprechend bestand das aufgesammelte Material hauptsächlich aus Brekzien und diese wieder zum größten Teil aus Fra-Mauro-Basalten (Abb. 2). Es ist klar, daß die Fra-Mauro-Basalte wahrscheinlich vor der Bildung des Mare Imbrium (durch Einschlagen eines Fremdkörpers) dieses Gebiet bedeckten.

Die feldspatreichen Hochland-Basalte scheinen wiederum praktisch nur auf die echten Hochländer verteilt zu sein. Dies wird durch die Ergebnisse der Surveyor-VII-Sonde und durch das Apollo-15-Geochemische-Röntgenfluoreszenz-Experiment unterstützt. Beide zeigen hohe Al_2O_3 -Konzentrationen der Hochland-Gebiete, vergleichbar mit den in allen Proben vorhandenen Hochland-Basalten. Die Anorthosite sind wohl petrologisch interessant, sind jedoch entgegen früheren Vorschlägen sicher nicht das Baumaterial der Hochländer. Das Vorhandensein von Anorthositen, Anorthosit-ähnlichen Ge-

steinen und auch Peridotiten zeigt jedoch, daß auf dem Mond petrologische Differentiationen stattgefunden haben. Dies bedeutet, daß Teile des Mondes im Laufe seiner Geschichte geschmolzen waren und einem ruhigen, ungestörten Abkühlungs- und Kristallisationsprozeß unterworfen waren. Die Anorthosite und auch die Peridotite sind generell Produkte einer gravitativen Differentiation, d. h. einer Trennung von eben kristallisierten Mineralien von ihrer Schmelze durch die Schwerkraft. Die im Vergleich mit der Schmelze weniger dichten Plagioklase sammeln sich an der Decke der Magma-Kammer an, wogegen die spezifisch schwereren Fe-Mg-Silikate sich am Kammerboden ansammeln.

Von einiger Bedeutung ist auch die Textur der magmatischen Mondgesteine. Diese wird ja hauptsächlich von den physikalischen Bedingungen bei der Entstehung oder bei der letzten bedeutsamen Umprägung bestimmt. Die bisher bekannten magmatischen Gesteine vom Mond umfassen texturell einen weiten Bereich. Dieser reicht von vitrophyrischen (Kristalle und Kristallskelette in glasiger Matrix) über mikro-porphyrische, porphyrische (einige größere Kristalle in feinkristalliner Matrix) ophitische (große Pyroxen-Kristalle schließen kleinere Feldspat-Kristalle ein) bis zu equigranularen Texturen. Andererseits sind auch häufig mikrogranulare (Hornfelse) und granulare (granulitische)

Texturen zu beobachten. Alle diese Texturen spiegeln verschiedene Entstehungsgeschichten der Gesteine wider. So sind zur Schaffung von virtophyrischen, mikroporphyrischen Texturen generell zwei Abschnitte in der Kristallisationsgeschichte des betreffenden Gesteins notwendig. Zuerst muß eine relativ langsame Abkühlung zur Kristallisation einiger Kristalle (meist Olivin und/oder Pyroxen) führen. Danach erfolgt die Eruptionsphase (Ausfluß des Kristall-Schmelz-Gemisches an die Oberfläche) gefolgt von einer relativ raschen Abkühlung. Abhängig von dieser Abkühlungsrate erstarrt die Schmelze entweder zu Glas oder sie kristallisiert zu einem mehr oder weniger feinkörnigen Mineralgemisch. Die feinkörnige äquigranulare und die ophitische Textur sind das Ergebnis einer gleichzeitigen Kristallisation der verschiedenen Minerale bei rascher bzw. langsamer Abkühlung. Verschiedene magmatische Gesteine erreichen zum Teil auch eine beachtliche Korngröße (5 mm und mehr) und deuten somit eine Entstehung tief unter der Mondoberfläche an.

Neben diesen magmatischen Texturen treten Texturen auf, wie wir sie auf der Erde von metamorphen Gesteinen kennen. Besonders mikrogranulare und granulare Texturen zeugen von einer Rekristallisation präexistenter Gesteine unter verschieden lange andauernden Wärme-Einflüssen. Von diesen Einflüssen können natürlich — wie auf

der Erde — sowohl ursprünglich magmatische Gesteine als auch Sedimente betroffen werden. Einflüsse von hohen (statischen) Drücken als auch von großräumigen Erwärmungen (Regional-Metamorphose) sind nicht nachweisbar. Diese Gesteine sind wohl Produkte lokaler Kontakte zwischen Nebengestein und Laven (Kontaktmetamorphite).

Eine andere Art der Metamorphose, welche auf der Erde recht selten ist, hat viele Mondgesteine jedoch wesentlich beeinträchtigt und etliche erst gebildet: Die Schockwellen-Metamorphose (durch extralunare Körper). Fast kein Mondgestein ist (ähnlich wie die Meteoriten) völlig frei von Anzeichen dieser gewaltsamen Veränderungen. Druckzwillingsbildung, undulöse Auslöschung und teilweise Isotropisierung von Mineralen sind weit verbreitet. Noch häufiger sind die Endprodukte einer Schockwelleneinwirkung, die Gesteinsschmelzen, welche zu Glas erstarrten. Dabei reicht die Skala von nur zum Teil verglasten Gesteinen bis zu vollkommen homogenisierten Gläsern und zu Gläsern, welche durch die starke Überhitzung bei ihrer Bildung sogar ihren Anteil an leichtflüchtigen Elementen verloren haben. Abhängig von der Größe des Einschlagereignisses werden dabei schlierige, einschlußreiche Glasfladen, schlierige Glaskügelchen, homogene Glaskügelchen und sogar großvolumige Schmelzen erzeugt. Alle diese Produkte der extremen Schockwellenmetamorphose

werden zusammen mit mehr oder weniger unverändertem Material ausgeworfen, lagern sich auf der Mondoberfläche ab und bauen die den gesamten Mond bedeckende Schuttschichte auf. Diese Schuttlage (Regolith) ist im wesentlichen ein Lokersediment mit einer vom Alter der jeweiligen Landschaft abhängigen Mächtigkeit. So sind die Mare bis zu 10 m und die Hochländer bis zu 20 m mit dem Regolith bedeckt. Gesteins- und Mineralbruchstücke, Glasbruchstücke und rotationssymmetrische Glaskörper bauen den Mondboden auf. Die Korngrößenverteilung im Mondboden ist typisch die eines schlecht sortierten Verwitterungsschutts (Abb. 3). Dabei liegt die häufigste Korngröße des feinen Anteils praktisch immer in der Siltfraktion (0,02 mm).

Die Gläser sind sehr verbreitet. Sie sind ja eines der typischen Produkte von Impakt-Ereignissen, nicht nur auf dem Mond, sondern auch auf der Erde und wahrscheinlich auch auf anderen Himmelskörpern. Manche Lagen im Mondboden bestehen überhaupt nur aus Glaskügelchen und -splittern. Der Chemismus der Gläser variiert sehr stark und umfaßt natürlich hauptsächlich den chemischen Variationsbereich der Gesteine.

Die Glaskügelchen zeugen von einem feindispersen Auswurf von Silikatschmelzen beim Impakt und einer folgenden raschen Abkühlung in Bruchteilen einer Sekunde. Gläser entstehen ja generell

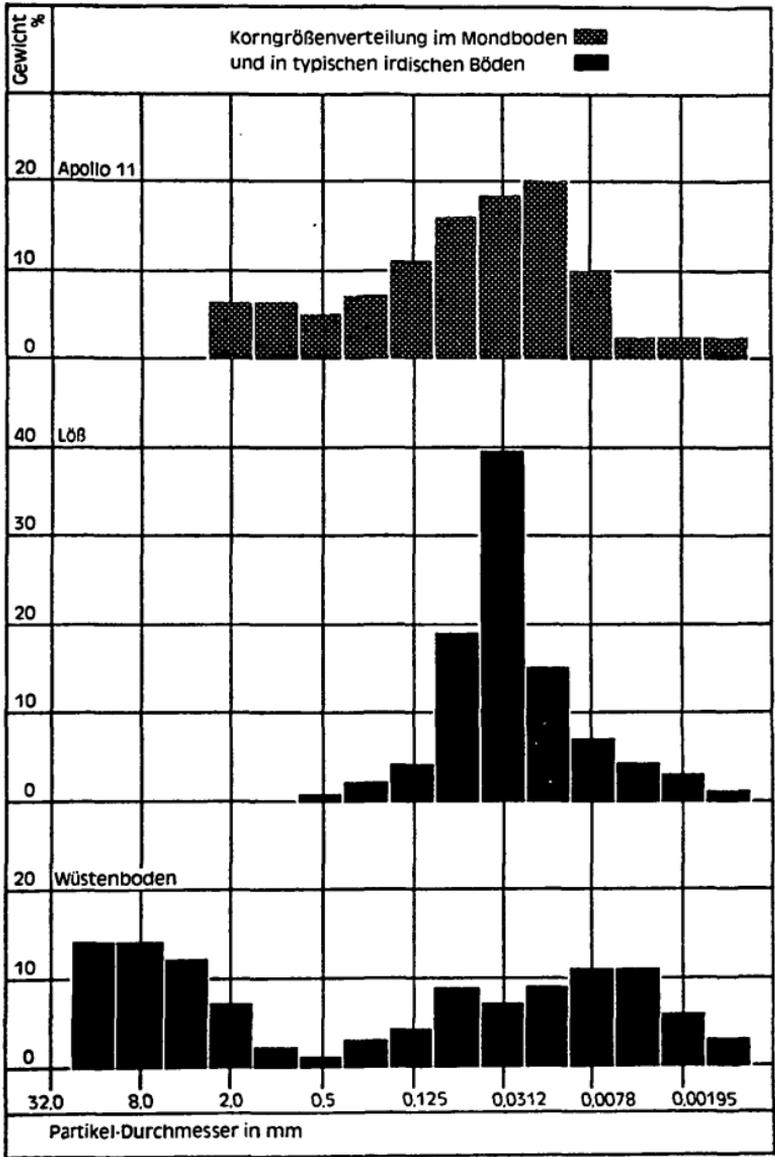


Abb. 3. Korngrößenverteilung im Mondboden und in typischen irdischen Böden.

durch eine starke Schmelz-Unterkühlung, welche eine Kristallisation verhindert. Erlaubt man den Schmelztröpfchen, sich langsamer abzukühlen, erfolgt eine weniger starke Unterkühlung und eine Kristallisation. Das Produkt sind dann kristalline Kügelchen oder (in der Sprache der Meteoritenkunde) Chondren, welche in manchen Mondgesteinen sehr verbreitet sind. Die langsamere Abkühlung wird dabei durch eine Gas-, Staub- und Glutwolke verursacht, die eine thermische Abstrahlung in den Weltraum verhindert. Solche Glutwolken werden sich generell nur bei größeren Impakt-Ereignissen bilden. Das Produkt der Glutwolken ist ein Gestein, welches am besten als „verschweißter Tuff“ zu beschreiben ist: Eine Mischung von Gesteins- und Mineralbruchstücken mit Chondren, Glaskügelchen und Glasbruchstücken, welche alle miteinander verwachsen oder durch eine glasige Matrix verbunden sind. Diese Gesteine stellen ein Endglied der Reihe der Mondbrekzien dar. Das andere Ende wird durch Brekzien repräsentiert, die nur durch relativ milde Schockwellen-Einflüsse aus dem Mondboden entstanden (Schockwellen-Verfestigung). Zwischen diesen Extremen gibt es natürlich alle Übergänge.

Die Alter der Mondgesteine sind durchwegs sehr hoch und mit dem Gesteinstyp korrelierbar. Dabei sind die Mare-Basalte mit 3,2—3,6 Milliarden Jahren die jüngsten, die Fra-Mauro-Basalte mit 4,0—

4,2 Milliarden Jahren die ältesten Gesteine auf dem Mond. Die einzige bisher aufgesammelte handstückgroße Probe eines Hochlandbasaltes wird zur Zeit noch untersucht, sollte jedoch ein Alter, vergleichbar mit den Fra-Mauro-Basalten oder etwas mehr ergeben. Alle Modellalter (Rb-Sr) streuen um 4,65 Milliarden Jahre, was bedeutet, daß die erste Krustenbildung auf dem Mond praktisch gleichzeitig mit der Entstehung des Mondes erfolgte. Die jüngsten Mare-Basalte sind für irdische Begriffe extrem alt und mit den ältesten bisher auf der Erde gefundenen Gesteinen vergleichbar. Seit dieser Zeit (vor rund 3,2 Milliarden Jahren) waren auf dem Mond keine großräumigen geologischen Prozesse wirksam. Im Gegensatz dazu ist die Erdkruste auch heute noch äußerst aktiv (Kontinent-Wanderungen, Gebirgsbildung).

Mineralogisch ist der Mond wenig ergiebig. Nur 36 Minerale (Tabelle 2) sind bisher bekannt geworden. Dies ist, verglichen mit der Erde (rund 2 500 Minerale) sehr wenig, spiegelt jedoch den relativ eintönigen Chemismus der Gesteine und die Bildungsbedingungen wider. Unter den gefundenen Mineralien befinden sich allerdings drei bisher noch nicht bekannte: Pyroxferroit, Armalcolit und Tranquillityit (siehe Tab. 2). Pyroxferroit, ein häufiger Nebengemengteil in Mondbasalten, ist ein pyroxenähnliches Mineral, verwandt mit dem Pyroxmangit, welcher auch bei der Benennung Pate

stand (Mangan ist hier durch zweiwertiges Eisen ersetzt). Armalcolit ist ein Ferro-Pseudobrookit, benannt nach den Apollo-11-Astronauten Armstrong, Aldrin und Collins. Der Tranquillityit ist ein neues Silikat-Mineral benannt nach dem Mare Tranquillitatis.

Neben diesen neuen Mineralen fallen in der Liste Minerale auf, die typisch für Meteoriten sind. Vor allem die gediegenen Fe-Ni-Minerale Kamazit und Taenit, aber auch Troilit, Schreibersit und Cohenit zeigen Entstehungsbedingungen an, die jenen der Meteoriten angenähert erscheinen. (Die meisten dieser Minerale wurden nicht nur im Mondboden, sondern auch direkt im Gesteinsverband der Mondbasalte beobachtet.) Diese Minerale verlangen ein wasserfreies und sauerstoffarmes Milieu. Das Sauerstoff-Defizit ist allerdings nicht so ausgeprägt, wie in den meisten Meteoriten. Hydroxyl-haltige Minerale wie Amphibol und Biotit wurden nur jeweils als Einzelkörner in Hohlräumen gefunden. Der in der Tabelle angeführte Goethit ist wohl häufig zu beobachten, doch entsteht er zu leicht unter dem Einfluß der irdischen Atmosphäre, um als echtes Mondmineral angesprochen werden zu können.

Zusammenfassend ergaben die bisherigen Untersuchungen an Mondgesteinen:

- 1) Der Mond unterscheidet sich petrographisch und chemisch sowohl von der Erde, als auch von den

Tabelle 2: Minerale in Mondgesteinen

Name	Chemische Formel	Bemerkung
Hauptgemengenteil (mehr als 10%)		
Klinopyroxen	Ca(Mg, Fe) Si ₂ O ₆	Meist stark wechselnde Zusammensetzung
Plagioklas	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	Meist sehr Ca-reich
Nebengemengenteil (1—10%)		
Olivin	(Mg, Fe) ₂ SiO ₄	Fast alle Zusammensetzungen Manchmal Mg- und Zr-haltig
Ilmenit	FeTiO ₃	
Cristobalit	SiO ₂	Neues Mineral
Tridymit	SiO ₂	
Pyroxferroit	(Fe, Ca) ₂ Si ₂ O ₆	
Akzessorien (weniger als 1%)		
Troilit	FeS	Verbreitet, Meteoritenmineral Selten
Mackinawit	FeS	
Kamazit	Fe	
Taenit	(Fe, Ni)	Verbreitet; niedriger Ni-Gehalt;
Chromit	FeCr ₂ O ₄	Co-haltig; Meteoritenmineral
Ulvöspinell	Fe ₂ TiO ₄	Verbreitet; hoher Ni-Gehalt;
Titan-Chrom-Spinell	(Fe, Cr, Ti) ₃ O ₄	Meteoritenmineral
		Verbreitet; Ti-haltig
		Verbreitet; Cr—haltig
		Verbreitet; irdisch nicht bekannt

Spinell	(Mg, Fe)Al ₂ O ₄	Selten, Cr-haltig; manchmal Ti-haltig
Armalcolit	(Fe, Mg)Ti ₂ O ₅	Neues Mineral; benannt nach Armstrong, Aldrin und Collins
Zirkellit	CaZrTiO ₅	Selten, reich an Seltenen Erden
Zirkon	ZrSiO ₄	Verbreitet
Baddeleyit	ZrO ₂	Selten, Hf-haltig
Tranquillityit	Fe ₈ (Zr, Y) ₂ Ti ₃ Si ₃ O ₂₄	Selten, neues Mineral, benannt nach Mare Tranquillitatis
Rutil	TiO ₂	Selten, Nb-haltig
Apatit	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	Verbreitet, manchmal Cl-haltig, reich an Seltenen Erden
Whitlockit	Ca ₃ (PO ₄) ₂	Verbreitet, Meteoritenmineral, reich an Seltenen Erden
Korund	Al ₂ O ₃	Selten
Quarz	SiO ₂	Sehr selten
Kalfeldspat	KAlSi ₃ O ₈	Verbreitet, Ba-haltig
Orthopyroxen	(Mg, Fe)SiO ₃	Selten
Kupfer	Cu	Sehr selten
Graphit	C	Sehr selten
Cohenit	Fe ₃ C	Sehr selten, Meteoritenmineral
Schreibersit	(Fe, Ni) ₃ P	Sehr selten, Meteoritenmineral
Aragonit	CaCO ₃	Ein Korn
Amphibol	Na ₃ (Fe, Mg) ₈ Si ₉ O ₂₈ (OH, F)	Ein Korn
Biotit	K ₂ (Mg, Fe) ₅ (Al, Ti)(Si, Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₄	Ein Korn
Goethit	FeOOH	Fraglich, Ni-haltig

Meteoriten. Die Darwin'sche Theorie der Mondentstehung aus der Erde ist somit auch vom geochemischen Gesichtspunkt aus abzulehnen.

- 2) Die Mondgesteine stellen eine eigenständige Gesteinsgruppe dar. Parallelen in der Genese sind jedoch sowohl mit irdischem als auch mit meteoritischem Material gegeben.
- 3) Die verschiedenen Mondlandschaften werden von verschiedenen Gesteinen aufgebaut.
- 4) Die relativ große Variabilität im Gesteinschemismus (Dunit bis Anorthosit) bedeutet, daß eine großräumige (wahrscheinlich gravitative) Differentiation auf dem Mond stattfand. Ein Schalenbau des Mondes (ähnlich der Erde) wird dadurch wahrscheinlich gemacht.
- 5) Das häufige Vorkommen von gediegen Fe, Troilit und anderen Meteoritenmineralen spiegelt das sauerstoffarme Bildungsmilieu auf dem Mond wider.
- 6) Die dichte Schuttschichte auf dem Mond und die Häufigkeit von Impakt-Brekzien zeigen, daß der Impakt ein häufiges und normales kosmisches Ereignis ist. Die Geologie des Mondes, aber sicher auch die Geologie aller Planeten, wurde in ihrem frühen Stadium entscheidend durch Impakte beeinflußt.
- 7) Die großräumige geologische Aktivität auf dem Mond endete im Gegensatz zur Erde schon vor rund 3 Milliarden Jahren. Seither wurde die

Mondoberfläche praktisch nur mehr durch mond-fremde Kräfte (Sonnenwind, Meteoriten, Kometen) verändert. Der Mond ist also ein in einer sehr frühen Entwicklungsphase stehengebliebener Planet. Ein genaues Studium dieses Körpers gibt somit Aufschluß über die früheren Entwicklungsphasen der Erde und der erdnahen Planeten.

- 8) Das Alter des Mondes ist gleich dem der Erde und des Sonnensystems. Dadurch ist auch eine Entstehung des Mondes außerhalb des Sonnensystems auszuschließen. Gleichzeitig stützt dieser Befund auch jenen aus geochemischen Untersuchungen, welcher ergab, daß sich der Mond nur gleichzeitig mit der Erde gebildet haben kann. Detaillierte Vorstellungen dazu werden zur Zeit noch diskutiert.

Ausgewählte Literatur:

- Adler I., Tromka J., J. Gerad, P. Lowman, R. Schmadebeck, H. Blodget, E. Eller, L. Yin, R. Lamothe, P. Gorenstein und P. Bjorkholm, Apollo 15 geochemical X-ray fluorescence experiment: preliminary report, *Science* 175 (1972), p 436.
- Agrell S. O., Scoon J. H., Muir I. D., Long J. V. P., McConnell I. D. C., and Peckett A., Observations on the chemistry, mineralogy and petrology of some Apollo 11 lunar samples. *Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf.*, vol. 1, Pergamon Press, N. Y., 1970, p 93.

- Brown G. M., Petrology, mineralogy, and genesis of lunar crystalline rocks. *J. Geophys. Res.* 75 (1970), 6480.
- Duke M. B., Woo C. C., Sellers G. A., Bird M. L., and Finkelman R. B. Genesis of lunar soil at Tranquillity Base, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., vol. 1, Pergamon, N. Y., 1970, p 347.
- El Goresy A., Ramdohr P., and Taylor L. A., The opaque minerals in the lunar rocks from Oceanus Procellarum, Proc. Second Lunar Sci. Conf., MIT Press 1971, vol. 1, 219.
- Engelhardt W. von, Arndt J., Müller W. F. and Stöffler D., Shock metamorphism of lunar rocks and origin of the regolith at the Apollo 11 landing site, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., vol. 1, Pergamon, N. Y., 1970, p 363.
- Fredriksson K., Nelen J., and W. G. Melson, Petrography and origin of lunar breccias and glasses, Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., vol. 1, Pergamon, N. Y., 1970, p 419.
- Hörz F., Hartung J. B., and Gault D. E., Micrometeorite craters on Lunar rock surfaces, *J. Geophys. Res.* 76 (1971) 5770.
- Keil K., Prinz M., and Bunch T. E., Mineralogy, petrology, and chemistry of some Apollo 12 samples, Proc. 2nd Lunar Sci. Conf., vol. 1, p 319, MIT-Press, Cambridge, Mass., 1971.
- Keil K., Kurat G., Prinz M., and Green J. A., Lithic fragments, glasses and chondrules from Luna 16 finds, *Earth Planet. Sci. Letts.* 13 (1972), 243.
- King E. A., Jr., J. C. Butler, and M. F. Carman, Jr., The lunar regolith as sampled by Apollo 11 and Apollo 12: Grain size analyses, modal analyses, and origins of particles, Proc. 2nd Lunar Sci. Conf., vol. 1, MIT-Press, Cambridge, Mass., 1971, p 732.
- Kurat G., K. Keil and M. Prinz, Lunar Breccia 14318, 4: composition of lithic fragments, glasses, chon-

- drules, and textural similarities to chondrites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, in prep.
- LSPET (Lunar Sample Preliminary Examination Team)
The Apollo 15 lunar samples: a preliminary description, *Science* 175 (1972), 363.
- McKay D. S. and D. A. Morrison, Lunar breccias, *J. Geophys. Res.* 76 (1971), 5658.
- Meyer C. Jr., R. Brett, N. J. Hubbard, D. A. Morrison, D. S. Mc Kay, F. K. Aitken, H. Takeda, and E. Schonfeld, Mineralogy, chemistry, and origin of the KREEP component in soil samples from the Ocean of Storms, *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, MIT-Press, 1971, vol. 1, 393.
- Reid A. M., W. I. Ridley, J. Warner, R. S. Harmon, R. Brett, P. Jakeš, and R. W. Brown, Chemistry of highland and Mare-basalts as inferred from glasses in the lunar soils, 3rd Lunar Science Conf., Houston 1972.
- Vinogradov A. P., Preliminary data on lunar ground brought to Earth by automatic probe „Luna-16“, *Proc. Second Lunar Sci. Conf.*, MIT-Press 1971, vol. 1, 1.
- Warner J. L., Lunar crystalline rocks: petrology and geology, *Proc. 2nd Lunar Sci. Conf.*, vol. 1, p 469, MIT-Press, Cambridge, Mass. 1971.
- Wasserburg G. J., Turner G., Tera F., Podosek, F. A., Papanastassion D. A., Huneke J. C., Comparison of Rb-Sr, K-Ar and U-Th-Pb ages; Lunar chronology and evolution, 3rd Lunar Sci. Conf., Houston 1972.