

Forschung, Wissenschaft

Radiochemische Untersuchungen von Prozessen auf der Mondoberfläche *

H.R. von Gunten

Anorganisch-chemisches Institut, Universität Bern, CH-3000 Bern 9, und
Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, CH-5303 Würenlingen

U. Krähenbühl

Anorganisch-chemisches Institut, Universität Bern, CH-3000 Bern 9, Switzerland

Abstract

After a general short survey of results of lunar investigations, our own contributions are reviewed. It is shown, that volatile trace elements are considerably enriched on surfaces of grains of the lunar regolith. Non volatile trace elements as well as major elements show no surface enrichment. The observed enrichment is due to evaporation and condensation processes initiated by impacting meteorites and micrometeorites, and also by solar heating of the surface of the moon. The concentrations of volatile (e.g. Zn, Cd) and siderophile (e.g. Au, Co) trace elements are distinctly higher in soils as compared to basalts. The following sources are recognized for this fact: Meteorites, micrometeorites and evaporation from the interior of the moon. The contribution of the individual mechanisms could be quantified by mixing model calculations. Heating experiments permitted the deduction of relative volatilities of elements and/or compounds in lunar samples.

Einleitung

Der Mond - bis dahin nur astronomischen Beobachtungen zugänglich - ist im Verlaufe der letzten 20 Jahre zu einem Objekt verschiedenster Forschungsrichtungen geworden. Die Ergebnisse finden sich in vielen Publikationen zusammengefasst, z.B. [1, 2, 3].

Schon von blosserem Auge können auf dem Mond helle und dunkle Gebiete unterschieden werden. Es sind die von Galilei benannten *Hochländer* und *Maria*. Die oft kreisrunden dunklen Maregebiete wurden durch Einschläge von grossen Planetoiden und Asteroiden in der Frühgeschichte des Mondes, d.h., vor etwa 4 Milliarden Jahren, gebildet. Später wurden diese durch Magma aus dem Mondinnern aufgefüllt. Die Maregebiete bedecken etwa einen Drittel der erd zugewandten Mondoberfläche. Die Hochländer, die hohe Gebirge aufweisen, bilden die älteste Kruste des Mondes. Die Einschlagskrater liegen hier besonders dicht. Man schätzt die Zahl der Krater mit Durchmesser zwi-

schen 1 - 200 km für die sichtbare Seite des Mondes auf etwa 300'000. Neben Einschlagskratern wurden auch Vulkankrater festgestellt, erkennbar an ihrem analog zur Erde geordneten Auftreten entlang linearer Gräben.

Die *Oberflächengesteine* wurden primär durch vulkanische Prozesse gebildet und anschliessend durch das oben erwähnte intensive Bombardement durch Meteoriten und Asteroiden ständig zerkleinert. Aus dieser Einwirkung entstand eine Trümmerschicht mit z.T. feinstem Erosionsstaub: *der Regolith*. Seine Mächtigkeit beträgt einige Meter in Maregebieten, bis zu zehn in Hochländern.

Aus den Resultaten der Laboruntersuchungen, den Ergebnissen von unbemannten Sonden und Röntgenfluoreszenz- und Radioaktivitätsmessungen durch die Apollo-Mutterschiffe während ihres Umkreisens des Mondes konnte ermittelt werden, dass die

Table 1: Vergleich der mittleren Element-Gehalte (Gewichtsprozente) typischer Mondgesteine mit Konzentrationen in der Erdkruste und in chondritischen Meteoriten.

	Mondproben		Erdkruste %	chondritisches Material (Meteoriten) %
	Mare %	Hochland %		
SiO ₂	45,4	45,5	55,2	38,3
TiO ₂	3,9	0,6	1,67	0,11
Al ₂ O ₃	14,9	24,0	15,3	2,72
FeO	14,1	5,9	8,36	11,95
MgO	9,2	7,5	5,14	23,9
CaO	11,8	15,9	8,39	1,90
Na ₂ O	0,6	0,6	2,96	0,90
K ₂ O	-	-	1,92	0,10

*Nach einem Vortrag von H.R. von Gunten, gehalten am 8.2.1983 bei der Chemischen Gesellschaft Fribourg.

Zusammensetzung der Mondoberfläche sehr gleichartig ist. Die Elementhäufigkeiten in Mondproben sind deutlich verschieden von irdischen Gesteinen und von meteoritischer Materie (s. Tabelle 1).

Eine Besonderheit der Mondgesteine liegt in ihren niedrigen Gehalten an flüchtigen Elementen wie K, Na, S, Te und hohen Konzentrationen an refraktären Elementen wie Ti, Zr oder seltenen Erden. Zudem sind wegen dem Fehlen von Wasser keine Sekundärformationen wie Sedimente oder Tonminerale anzutreffen. Die *erstarren Gesteine*, z.B. Anorthosite oder Basalte sind am einfachsten aufgebaut und weisen eine relativ unkomplizierte Geschichte auf. Bei den *Brekzien* handelt es sich um Gesteine, die durch Einschläge von Meteoriten gebildet worden sind. Durch weitere Einschlagsereignisse können Gebilde entstehen, die gleichzeitig Teile verschiedener Generationen von Brekzien enthalten. Der *Mondstaub* (s. Abb. 1) ist das Verwitterungsprodukt von Gesteinen und Brekzien. Meistens enthält er zusätzlich Agglutinate (Abb. 1 b+c) und Gläser. Glas kann durch Erhitzen des Gesteins beim Einschlag von Mikrometeoriten oder durch Auswurf flüssiger Lava gebildet werden. *Agglutinate* entstehen im Mondstaub durch einschlagende Mikrometeorite. Das beim Aufschlag aufgeschmolzene Material klebt Mineral- und Glasfragmente zusammen. Die Zusammensetzung und die Geschichte von Staubproben sind ausserordentlich kompliziert. Bis heute sind daher meistens Untersuchungen an Gesteinen oder Brekzien vorgenommen worden. Aussagekräftige Experimente mit Staubproben können nur an aufgetrennten Fraktionen vorgenommen werden und sind immer sehr aufwendig.

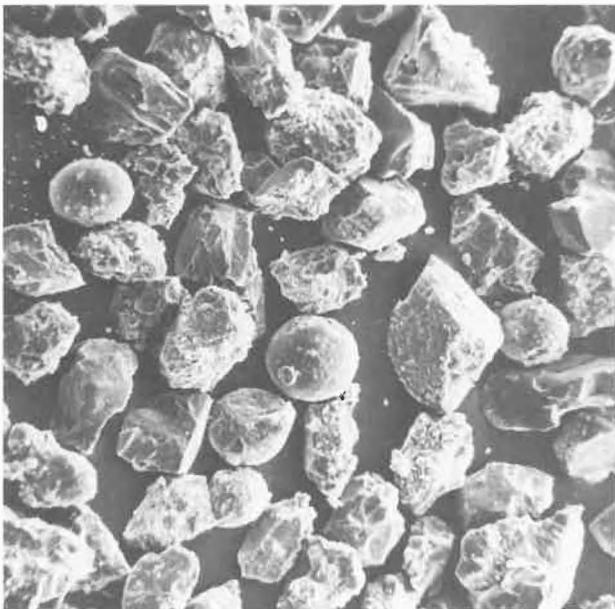
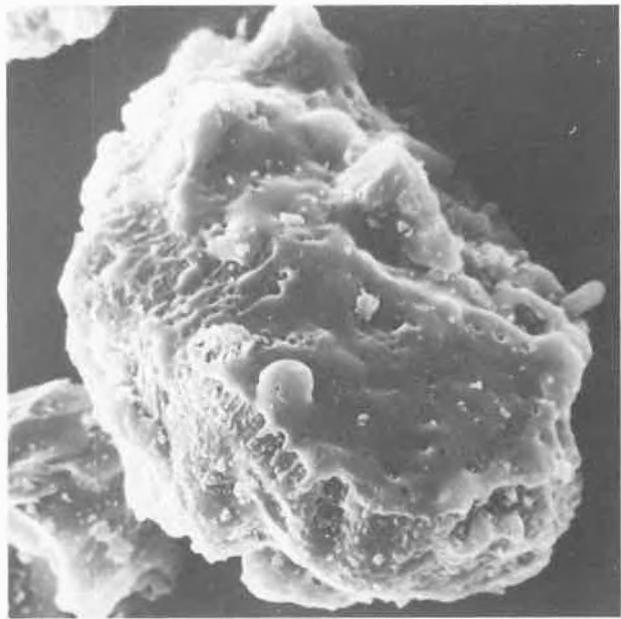
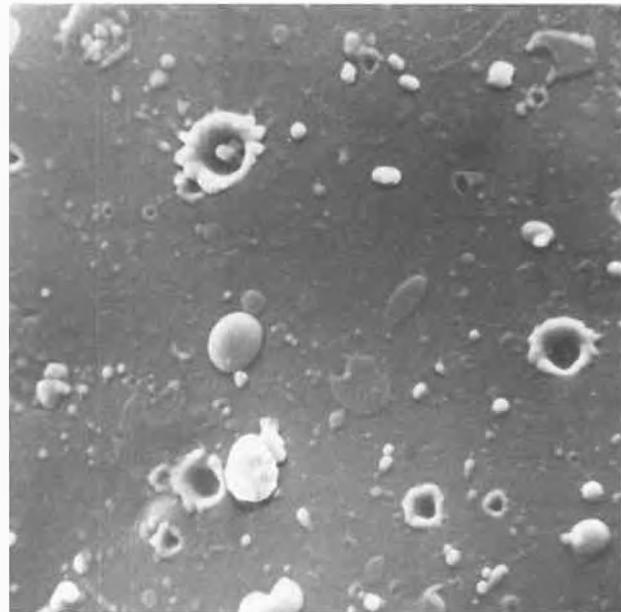


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Mondstaubproben (Geologisches Institut der Universität Bern).
a) Siebfraction bestehend aus Mineralkörnern, Glaskugeln und Agglutinaten (Vergrößerung 150 ×)



b) Agglutinat Korn bedeckt mit Glasschmelze (Vergrößerung 1400 ×)



c) Ausschnitt aus Agglutinat Korn mit Einschlagskratern von Mikrometeoriten (Vergrößerung 8000 ×).

Wenn die Gehalte von *Spurenelementen* in Mondstaub und Mondgesteinen verglichen werden, stellt man fest, dass einige von ihnen im Staub wesentlich angereichert sind. In unseren Untersuchungen, die sich in den letzten fast zehn Jahren auf Staubproben mit Korndurchmessern ≤ 1.5 mm beschränkten, wurde versucht, Ursachen, Quellen und Mechanismen, die zur diesen Anreicherungen im Mondstaub führten, zu ermitteln.

Die im Mondstaub festgestellten Anreicherungen an Spurenelementen können durch Zumischen von Material aus extralunaren Quellen (Meteorite, Mikrometeorite, Sonnenwind) oder aus dem Mondinnern ver-

ursacht worden sein. Wenn es sich um flüchtige Elemente handelt, werden sich diese wahrscheinlich via «Mondatmosphäre» ausbreiten. Unter flüchtigen Elementen verstehen wir Elemente, die bei dem auf dem Mond herrschenden Druck von $\sim 10^{-15}$ bar bei $T \leq 1200^\circ \text{C}$ (= Schmelzpunkt von Basalt) mobil werden. Das Auskondensieren dieser Elemente muss zu einer Anreicherung auf Oberflächen von Gesteinen und Mondstaub führen. Oberflächenanreicherungen können durch chemisches Ablösen der Oberflächenschichten, durch Korngrößenabhängige Gehaltsbestimmungen oder, bei flüchtigen Elementen, durch Ausheizexperimente ermittelt werden. In unseren Untersuchungen sind die beiden letztgenannten Techniken angewandt worden.

Experimentelles Vorgehen

Die für die Gehaltsbestimmungen zu wählende Analysemethode muss mindestens die folgenden Bedingungen erfüllen:

- Hohe Nachweisempfindlichkeit, z.T. müssen Spurenelemente mit Gehalten $< 10^{-9}$ g/g (= ppb) ermittelt werden.
- Möglichst unempfindlich gegen Kontaminationen; die in den Mondproben zu bestimmenden Elemente weisen zum Teil wesentlich kleinere Konzentrationen auf als irdisches Material (z.B. Staub in der Laborluft).

- Mullelementbestimmungen müssen möglich sein, da die Mondproben ausserordentlich wertvoll sind.

Diese Bedingungen werden in idealer Weise durch die *Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)* erfüllt. Die NAA besitzt für viele Elemente sehr hohe Nachweisempfindlichkeiten, zudem sind die Proben nach der Bestrahlung unempfindlich gegen Kontaminationen (nur Radionuklide können stören). Mullelementbestimmungen sind ohne weiteres möglich, zum Teil sogar instrumentell ohne chemische Bearbeitung. Nachteilig wirken sich bei der NAA die durch die oft hohe Radioaktivität bedingten aufwendigen Bearbeitungstechniken aus. Zudem muss für die Bestrahlung der Proben ein Kernreaktor verfügbar sein.

Bei der NAA wird die zu analysierende Probe zusammen mit einer Standardprobe, deren Elementgehalte bekannt sind, mit Neutronen bestrahlt. Die Intensitäten der von den erzeugten radioaktiven Isotopen emittierten Strahlungen sind in Probe und Standard proportional den Elementkonzentrationen. Meist wird γ -Strahlung gemessen, die für jedes Radionuklid charakteristisch ist. Auf Grund der bekannten Gehalte im Standard können die Konzentrationen in der Probe auf einfache Weise ermittelt werden, wenn beide unter identischen Bedingungen bestrahlt und gemessen werden.

Etwa 500 mg der zu untersuchenden Mondstaubproben wurden unter staubarmen Bedingungen in vorbehandelte hochreine Quarzampullen eingeschmolzen

und während einer Woche in Gegenwart der Standardproben im Reaktor *SAPHIR* des Eidgenössischen Instituts für Reaktorforschung in Würenlingen mit thermischen Neutronen (Flux $\sim 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) bestrahlt. Da die Proben nach der Bestrahlung und dem Transport in unsere Labors Dosisleistungen von einigen R/h aufwiesen, mussten die weiteren Bearbeitungsschritte nach Möglichkeit ohne ständige Anwesenheit eines Operateurs durchgeführt werden.

Durch Sieben in Aceton wurden in einer halbautomatischen Siebkolonne [4] die folgenden Korngrößenfraktionen erhalten: $< 7 \mu\text{m}$, $7-15 \mu\text{m}$, $15-30 \mu\text{m}$, $30-45 \mu\text{m}$, $45-74 \mu\text{m}$, $74-149 \mu\text{m}$ und $149 \mu\text{m} - \leq 1.5 \text{ mm}$. Jede Korngrößenfraktion wurde dann, entsprechend ihren magnetischen Eigenschaften, in drei Mineralfraktionen unterteilt: 1. stark magnetisches Agglutinat und allfällige ferromagnetische Metallpartikel, 2. Material geringerer magnetischer Eigenschaften, z.B. Olivine und Pyroxene, 3. nicht magnetische Mineralien, vorwiegend Feldspat. Insgesamt resultierten aus dieser Trennung einer Probe 21 Fraktionen. Diese aufwendige Trennung ist notwendig, weil die Gehalte an Spurenelementen in den einzelnen Fraktionen sehr unterschiedlich sind (z.B. hohe Anreicherungen an flüchtigen und siderophilen Elementen in den Agglutinaten, an Zn bis zu 100-fach, an Au bis zu 25-fach). Analysen von Gesamtproben liefern meist nur wenig sinnvolle Resultate.

Durch Messung der γ -Strahlung der einzelnen Fraktionen auf einem Ge(Li)-Halbleiterspektrometer mit sehr guter Energieauflösung konnten die Gehalte von Ce, Co, Eu, Fe, Hf, La, Na, Sc, Sm, Tb, Ti, Yb gleichzeitig bestimmt werden.

Anschliessend wurden je nach Probe und Ziel der Untersuchung zwei verschiedene Wege eingeschlagen:

1. Chemisches Auflösen mit anschliessender radiochemischer Aufarbeitung und Messung der γ -Strahlung.
2. Ausheizen mit anschliessender gaschromatographischer Trennung der verflüchtigten Elemente und Messung der γ -Strahlung.

Zur radiochemischen Analyse [5] wurden die Proben mit Element-Trägerlösungen versetzt und in Teflon-Miniautoklaven über Nacht bei 85°C mit $\text{HF}/\text{HC10}_4$ (1:2) aufgelöst. Anschliessend wurden die interessierenden Spurenelemente, die instrumentell nicht erfasst werden konnten, durch Fällungsreaktionen und Ionentauscher abgetrennt und weiter gereinigt. Eine schematische Darstellung der Gruppentrennungen und Hauptreinigungsschritte ist in Schema 1 wiedergegeben. Am Schluss wurden Messpräparate hergestellt, die auf Ge(Li)- γ -Spektrometern gemessen wurden. Anhand der bekannten, zugesetzten Element-Trägermengen (je 10-20 mg) konnten die chemischen Ausbeuten der Trenn- und Reinigungsoperationen für Au, Cd, Ge, Hg, In, Ir, Te, U, Zn ermittelt werden. Bei den Heizexperimenten wurde eine in unserem Labor entwickelte Experimentiertechnik [6] verwendet:

Schema 1: Gruppentrennung der interessierenden Elemente

Element-Träger + 10 ml HF/HClO₄ (1:2)

Rückstand: z. B. KClO₄, CaF₂; falls dunkelgefärbt (metallisches Au) waschen mit 3 ml Königswasser: zu F1

F1: Au₂S, CdS, HgS, IrS₂, 40% TeS₂; auflösen in 3 ml Königswasser, vertreiben der Nitrate, auftrennen auf Anionenaustauschern

F2: GeS₂, 25% In₂S₃; auflösen des In₂S₃ mit 10 ml 6 M HCl, Destillation des GeCl₄

F3: Sb₂S₃, 25% In₂S₃; auflösen des In₂S₃ in 10 ml 3 M HCl, auflösen des Sb₂S₃ und Reduktion zum Metall mit CrCl₂

F4: ZnS, Rest In₂S₃, Rest TeS₂, auflösen in Königswasser, vertreiben der Nitrate, auftrennen auf Anionenaustauschern

15 h bei 85°C
Zugabe von 10 ml H₂O, zentrifugieren

Zugabe von 20 ml H₂O
sättigen mit H₂S, zentrifugieren

Zugabe von 1,5 g H₃BO₃
sättigen mit H₂S, zentrifugieren

Erwärmen der überstehenden Lösung auf 80°C, sättigen mit H₂S, zentrifugieren

Zugabe von NH₄OH bis pH 5.5-6,
sättigen mit H₂S, zentrifugieren

In einem Röhrenofen (Abb. 2) wurden die neutronenaktivierten und durch Sieben und Magnettrennungen hergestellten Probenfraktionen während Zeitdauern von 30 s bis 24 Std. auf Temperaturen von 100°C bis 1000°C aufgeheizt. Mit einem Gasstrom von He oder H₂ wurden die bei den einzelnen Temperaturen verflüchtigten Anteile in eine kalte Schicht aus Aktivkohle transportiert und sorbiert. Nachfolgend wurden sie in einem linearen Temperaturgefälle zwischen 1000°C und 10°C mit Hilfe von He-Trägergas in fünf Fraktionen aufgeteilt (Thermochromatographie). Die Elementanteile in den einzelnen Fraktionen wurden γ-spektrometrisch ermittelt. Oberflächlich abgelagerte flüchtige Elemente werden schon bei Heizzeiten von 30 s praktisch quantitativ freigesetzt, während Diffusion aus dem Innern noch vernachlässigt werden kann. Mit dieser Methode gelingt eine Unterscheidung in oberflächliche und in im Korninnern befindliche Anteile von Elementen.

Resultate

a) Korngrößenabhängigkeit der Elementverteilungen

Für nichtflüchtige Spurenelemente und für die Hauptelemente sind die Gehalte in den untersuchten Mineralfraktionen praktisch unabhängig von der Korngröße. In Abb. 3 ist als Beispiel die korngrößenabhängige Konzentrationsverteilung der Hauptelemente Fe und Na in Agglutinaten und Mineralien der Apollo-17 Probe 75080 wiedergegeben. Die Eisengehalte sind in den magnetischen Agglutinaten höher als in den Mineralien. Für Natrium ergibt sich das umgekehrte Bild. Die relativ geringen Konzentrationschwankungen für Fe und Na bei 60 μm in der Mineralfraktion können durch unterschiedliche Gehalte an Pyroxenen (Fe-haltig) und Feldspäten erklärt werden.

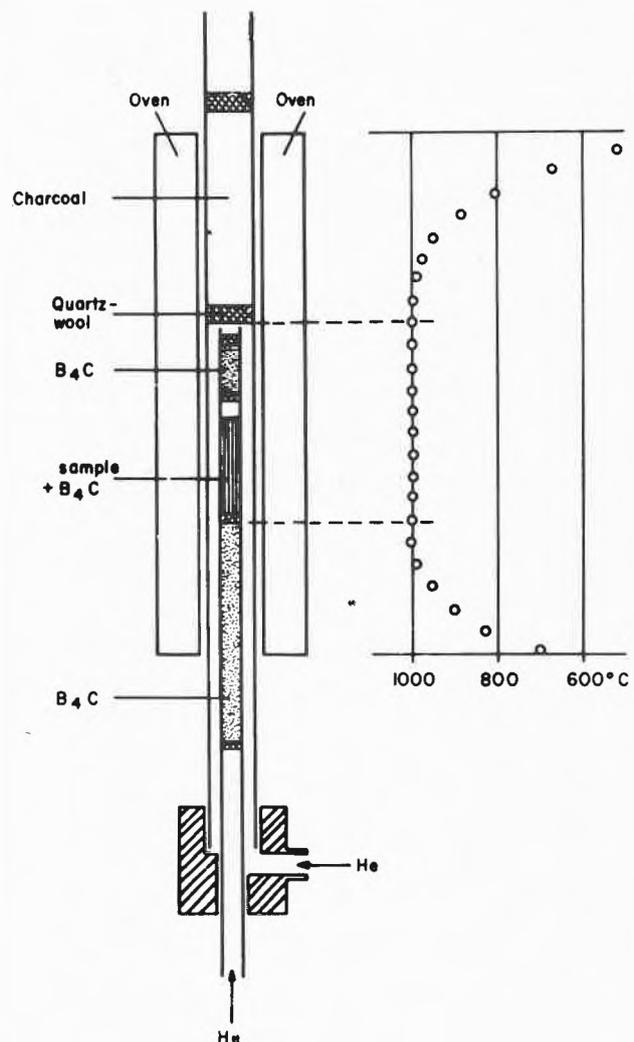


Abb. 2: Schematische Darstellung der Ausheizapparatur und der Temperaturverteilung im Röhrenofen bei 1000°C.

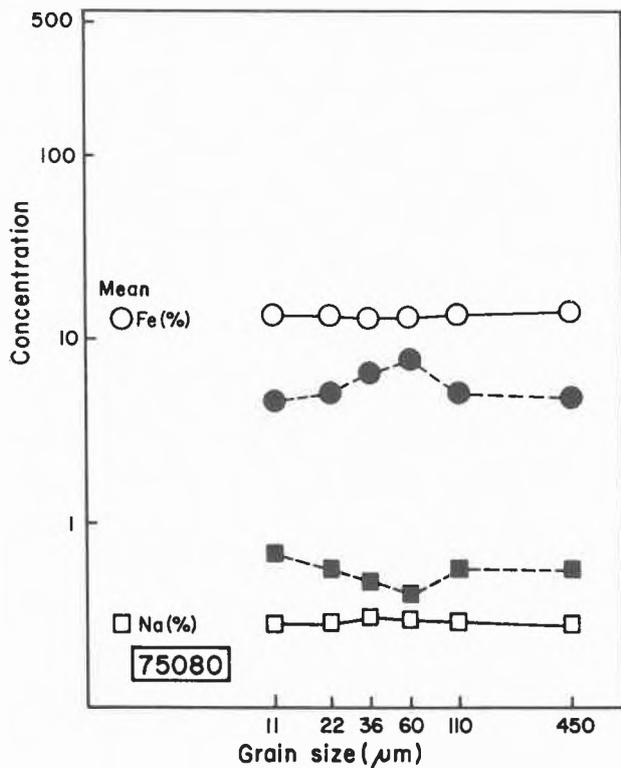


Abb. 3: Verteilung der Eisen- und Natriumgehalte in korngrossen- und magnetisch aufgetrennten Fraktionen von Agglutinaten (offene Symbole) und Mineralien aus Apollo-17 Probe 75080 (Ref. 7). «Mean» = gewichteter Mittelwert aus allen Fraktionen. Die Fehler (1 σ) betragen 5 %.

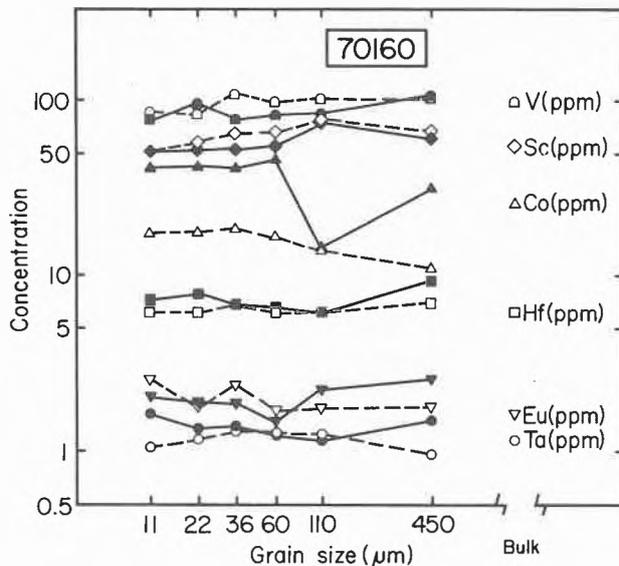


Abb. 4: Resultate der instrumentellen Aktivierungsanalysen an nach Korngrossen getrennten Mineral- und Agglutinatfraktionen der Mondstaubprobe 70160. Gebrochene Linien und offene Symbole: Mineralfraktion. Ausgezogene Linien und volle Symbole: Agglutinatfraktion. «Bulk» = Gehalt der unaufgetrennten Probe. Die Fehler (1 σ) liegen zwischen 5-15 % (20 % für Eu). (Ref. 8).

Abb. 4 zeigt die Resultate für die nichtflüchtigen Spurenelemente Co, Eu, Hf, Sc, Ta und V in der Probe 70160. Mit Ausnahme von Co sind nur geringe und wahrscheinlich nicht signifikante Korngrossenabhängigkeiten vorhanden. Die Gehalte an diesen refraktären Elementen sind in Agglutinaten und Mineralien sehr ähnlich. Die von diesem Muster abweichende, eigenartige Verteilung von Co kann nicht plausibel erklärt werden.

Für flüchtige Spurenelemente (s. Definition weiter oben) findet man dagegen eine ausgeprägte Abhängigkeit des Elementgehaltes von der Korngrösse. Die in Abb. 5 gezeigten Beispiele für 75080 machen deutlich, dass die Konzentrationen an Au, Ge, Cd, In, Zn gegen kleinere Korngrössen im allgemeinen zunehmen, wie auch die Oberflächen pro Gramm Material. Die Oberflächenabhängigkeit der Konzentrationen ist bei den Mineralien wesentlich stärker ausgeprägt als bei den Agglutinaten. Das abweichende Verhalten von Cd in den Mineralfraktionen mit Korngrössen > 60 μm kann von uns nicht erklärt werden.

b) Heizexperimente

Abb. 6 zeigt Verflüchtigungsmuster von Zn bei 1000°C in aufeinanderfolgenden Heizschritten von unterschiedlicher Dauer. Es ist ersichtlich, dass Zn sowohl in Mineralien als auch in Agglutinaten auf den Kornoberflächen deutlich angereichert ist. Aehnliche Verflüchtigungsmuster wurden auch für Br, Cd, Hg, In und Se erhalten. Tabelle 2 gibt die auf Grund dieser Experimente ermittelten prozentualen Oberflächenkonzentrationen für diese Elemente in unterschiedlichen Mineral- und Agglutinatfraktionen wieder. Die Oberflächenanreicherung für Hg ist besonders stark ausgeprägt.

Tabelle 2: Auf den Gesamtgehalt bezogene prozentuale Oberflächenkonzentrationen von Hg, Cd, Zn, Se, In und Br in Mondstaubfraktionen

Fraktion	Element					
	Hg	Cd	Zn	Se	In	Br
Minerale						
15-74 μm	98 \pm 3	74 \pm 15	64 \pm 3	43 \pm 6	-	39 \pm 10
Agglutinate						
15-74 μm	91 \pm 4	60 \pm 13	30 \pm 6	2.5 \pm 0.4	23 \pm 6	18 \pm 6
Agglutinate						
74-149 μm	88 \pm 6	60 \pm 14	46 \pm 4	19 \pm 4 ^a	35 \pm 4	53 \pm 8 ^a
Agglutinate						
149-350 μm	90 \pm 6	45 \pm 9	18 \pm 5	3.8 \pm 0.6	19 \pm 4	19 \pm 8

^aBildung von Hydriden beim Ausheizen mit H₂

Aus Heizexperimenten bei Temperaturen zwischen 100°C und 1000°C lassen sich Verflüchtigungstemperaturen für Elemente und Verbindungen in Mondstaubproben ermitteln. Die Heizexperimente (Zeit- und Temperaturverhalten) erlauben die Aufstellung

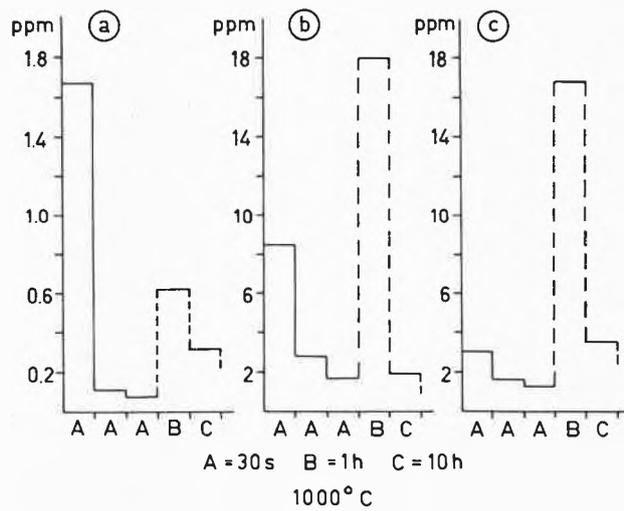
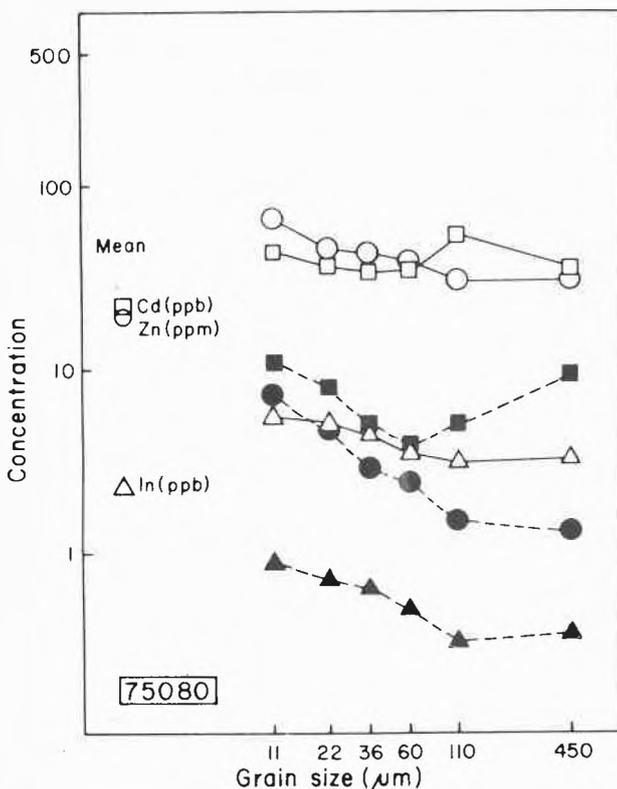
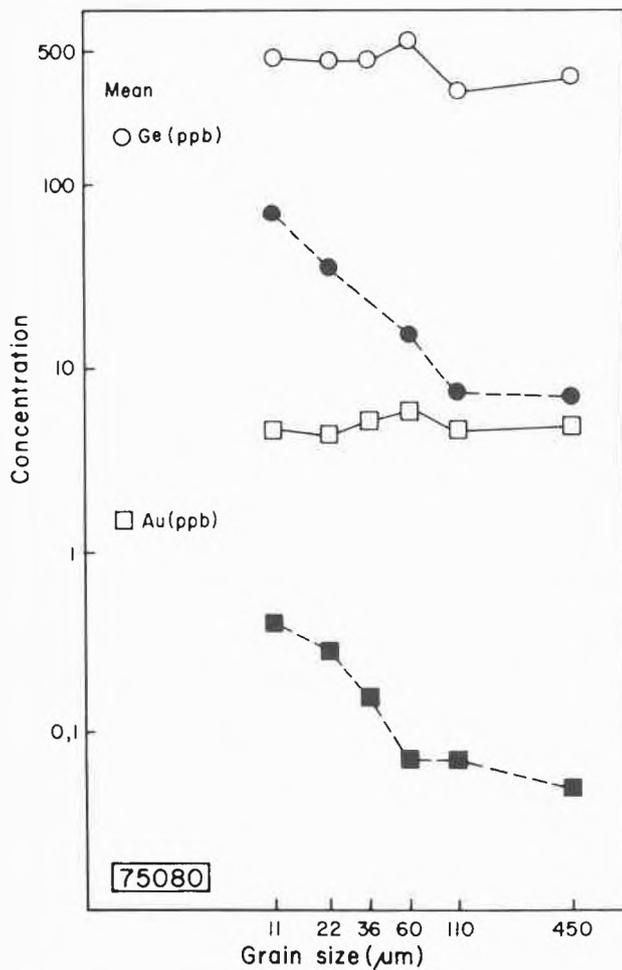


Abb. 6: Zeitabhängige Verflüchtigung von Zn aus verschiedenen Fraktionen der Probe 75080 bei 1000°C unter Helium.
 a) Mineralfraktion 15 - 74 μm
 b) Agglutinatfraktion 15 - 74 μm
 c) Agglutinatfraktion 149 - 350 μm
 Die Heizintervalle betragen: A = 30 s, B = 1h, C = 10h [9].

einer Reihe für die Flüchtigkeit von Elementen oder Verbindungen im Mondstaub:



Diese Laboruntersuchungen lassen sich allerdings nicht vorbehaltlos auf Mondbedingungen übertragen. Heizexperimente an Agglutinat- und Mineralfraktionen aus einer Probe (76240), die auf dem Mond ständig im Sonnenschatten eines 5x4x3 m grossen Steins gelegen hatte und an entsprechenden Fraktionen aus einer benachbarten, aber der Sonneneinstrahlung ausgesetzten Probe (76260) zeigten, dass die Hg- und Cd-Gehalte im Schatten wesentlich höher sind als an der besonnten Stelle (Abb. 7).

Diskussion

Die Korngrößenabhängigkeit der Gehalte an flüchtigen Elementen, die zuerst von Boynton und Mitarb. [11, 12] demonstriert wurde, und die Heizexperimente zeigen deutlich, dass diese Elemente auf Oberflächen von Körnern z.T. sehr stark angereichert sind. Ihre Ausbreitung und Verteilung auf dem Mond muss deshalb über die «Gasphase» («Atmosphäre») erfolgen. Die für die Verdampfung nötige Energie wird beim Einschlagen von Mikrometeoriten abgegeben, welche die Proben örtlich stark aufheizen. Die erreichten Temperaturen führen zweifellos zur Verflüchtigung von Elementen, die nachfolgend auf den kalten Oberflächen von Körnern wieder auskondensieren. Flüchtige Ele-

Abb. 5 (nebenstehend): Verteilung der Gehalte an Au, Ge, Cd, In und Zn in magnetisch getrennten Korngrößenfraktionen der Probe 75080. Offene Symbole und durchgezogene Linien: Agglutinate. Volle Symbole und gestrichelte Linien: Mineralfraktionen. Als «mean» ist der gewichtete Mittelwert aller Fraktionen eingezeichnet. Die Fehler (1 σ) betragen 5-10 %. [7].

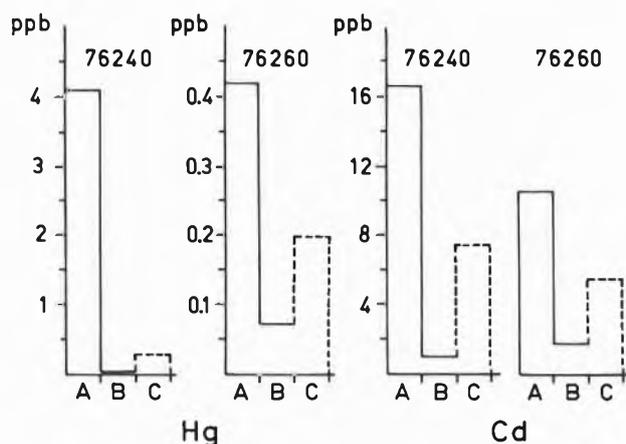


Abb. 7: Verflüchtigung von Hg und Cd aus den Mineralfraktionen 38-74 μm der Proben 76240 (Mondschatten) und 76260 (Referenz) bei 1000°C unter Wasserstoffatmosphäre.

A, B = Heizintervalle von 30 s

C = Konzentration im ausgeheizten Rückstand nasschemisch bestimmt. Beachten: unterschiedlicher Massstab für die Quecksilberkonzentrationen (Ref. 10).

mente können aber auch aus vulkanischer Tätigkeit auf die Oberflächen der Körner gelangen.

Die Heizexperimente und die Untersuchungen an einer beschatteten und an einer von der Sonne beschienenen Referenzprobe beweisen, dass sehr flüchtige Elemente, wie z.B. Quecksilber, bereits bei den Temperaturen von $\leq 130^\circ\text{C}$, die während des 14-tägigen «Mondtages» unter der Sonneneinstrahlung erreicht werden, verflüchtigt und mobilisiert werden können. Für die Verteilung und Umverteilung der leichtflüchtigsten Elemente auf der Mondoberfläche sind also nicht nur Meteoriteneinschläge und vulkanische Ereignisse von Bedeutung, sondern auch die jeden Monat zyklisch erfolgende Erwärmung der äussersten Mondoberfläche durch die Sonne.

Aus dem um etwa 5 ppb höheren Gehalt an Hg in der Probe 76240 (beschattet) gegenüber 76260 kann der während des Mondtages herrschende Hg-Fluss abgeschätzt werden. Thermolumineszenzmessungen ergaben für 76240 eine Zeitdauer der Beschattung von 5×10^4 Jahren [13]. Wenn man annimmt, dass die untersuchten Proben, die von den Astronauten mit grosser Sorgfalt gewonnen wurden, aus den obersten 2 cm der Mondoberfläche stammen, wo die Hg-Verteilung recht homogen ist [14, 15], enthalten 2 cm³ der Probe 76240 (1 cm², 2 cm tief) bei einem Gehalt von 5 ppb und einer Dichte von 1.6 g cm⁻³ zusätzlich 5×10^{13} Atome Hg. Wenn diese Menge während des Mondtages (total 2.5×10^4 Jahre) transportiert wurde, ergibt sich ein Hg-Fluss von ~ 60 Atomen cm⁻²s⁻¹. Falls der Gehaltsunterschied von 5 ppb einem Gleichgewichtszustand entspricht, können die Hg-Flüsse wesentlich grösser sein [16]. Analoge Flüsse herrschen natürlich auch zwischen besonnten Stellen, so dass während des Mondtages eine ständige Umverteilung von Quecksil-

ber und anderen leichtflüchtigen Elementen und Verbindungen stattfindet.

Auf Grund von Elementkonzentrationen im Mondstaub, in Mondgesteinen und in Meteoriten können mit Mischrechnungen Abschätzungen über die Quellen der Anreicherung von Elementen im Mondstaub gemacht werden. Die Anreicherung der siderophilen Elemente Au, Ge, Ir und Ni kann vollständig durch die Beimischung von meteoritischem Material mit kosmischer Elementhäufigkeit erklärt werden. Die Maregebiete enthalten davon 1 - 2 %, Staubproben aus den Hochländern, wo die Kraterhäufigkeit besonders gross ist, mehr als 4 %. Die Zumischung von meteoritischem Material in den Mondstaub bringt auch eine Anreicherung an flüchtigen Elementen wie Cd, In, Zn und anderen. Die meteoritische Komponente trägt aber für diese Elemente nur etwa 30 % der gemessenen Anreicherung gegenüber den Gesteinen bei. Die zusätzliche Anreicherung an diesen Elementen bedingt eine weitere Quelle und kommt wahrscheinlich durch ein Ausgasen aus dem Mondinnern während vulkanischer Tätigkeiten mit nachfolgender Kondensation auf Oberflächen zustande. Diese Annahme wird zusätzlich dadurch gestützt, dass Proben, z.B. oranges Glas, die sicher vulkanischen Ursprung haben, besonders hohe Gehalte an Zn und Cd aufweisen [17, 18].

Schlussfolgerungen

- Einschläge von Mikrometeoriten führen zur Agglutinatbildung und induzieren Verflüchtigungs- und Kondensationsprozesse. Gleichzeitig tragen sie zur Anreicherung siderophiler, aber auch flüchtiger Elemente im Mondstaub bei.
- Flüchtige Elemente wie Cd, In und Zn stammen zusätzlich zur meteoritischen Komponente aus der Kondensation vulkanischer Gase, die aus dem Mondinnern austreten oder früher ausgetreten sind.
- Flüchtige Elemente sind im Mondregolith auf den Oberflächen von Körnern stark angereichert. Sie werden auf dem Mond über die «Atmosphäre» verbreitet und ständig umverteilt.
- Aus unseren Laborexperimenten kann die folgende Reihe für die Flüchtigkeit von Elementen in Mondstaub abgeleitet werden:
Hg >> Cd > Zn > Se > In > Br >> Ag.
- Hg und wahrscheinlich andere leichtflüchtige Elemente oder Verbindungen werden durch die Sonneneinstrahlung verflüchtigt und zyklisch auf der Mondoberfläche verschoben.

Verdankung:

Die Autoren danken der National Aeronautics and Space Administration (NASA) für das Ueberlassen der untersuchten Proben, den Betreibern des Reaktors SAPHIR und der Abteilung Isotopenproduktion für die Bestrahlungen und dem Schweizerischen Nationalfonds für die Unterstützung der Arbeiten. Der Stiftung der Portlandzementfabrik Laufen werden Mittel für die Anschaffung eines Röntgendetektors verdankt.

Literatur

- 1 *L.H. Ahrens*: Chemistry of the Moon, Pergamon, Oxford 1981.
- 2 *W. v. Engelhardt*: Die Geologie des Mondes, Naturwissenschaften 69, 405 (1982).
- 3 *S.R. Taylor*, Lunar Science: A post Apollo view, Pergamon, New York 1975 p. 372.
- 4 *G. Meyer, A. Grütter, H.R. von Gunten, U. Krähenbühl* and *E. Rössler*: Rev. Sci. Instrum. 49, 326 (1978).
- 5 *U. Krähenbühl* and *F. Wegmüller*: Radiochem. Radioanal. Lett. 36, 31 (1978).
- 6 *J. Sørensen, F. Wegmüller*, and *U. Krähenbühl*: Rev. Sci. Instrum. 52, 1886 (1981).
- 7 *H.R. von Gunten, A. Grütter, D. Jost, U. Krähenbühl, G. Meyer*, and *F. Wegmüller*: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th, p. 1467, Pergamon Press (1979).
- 8 *H.R. von Gunten, U. Krähenbühl, A. Grütter, D. Jost, G. Meyer, K. Peng, F. Wegmüller*, and *A. Wytttenbach*: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th, p. 2269, Pergamon Press (1978).
- 9 *F. Wegmüller, J. Sørensen, U. Krähenbühl*, and *H.R. von Gunten*: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th, p. 1763, Pergamon Press (1980).
- 10 *F. Wegmüller, U. Krähenbühl, U. von Gunten*, and *H.R. von Gunten*: Lunar Planet. Sci. XIII, p. 847, Lunar and Planetary Institute, Houston (1982).
- 11 *W.V. Boynton, C.-L. Chou, R.W. Bild, P.A. Baedeker*, and *J.T. Wasson*: Earth Planet. Sci. Lett. 29, 21 (1976).
- 12 *W.V. Boynton* and *J.T. Wasson*: Geochim. Cosmochim. Acta 41, 1073 (1977).
- 13 *S.A. Durrani, K.A.R. Khazal*, and *A. Ali*: Proc. Lunar Sci. Conf. 7th, p. 1157, Pergamon Press (1974).
- 14 *S. Jovanovic* and *G.W. Reed*: Jr., Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th, p. 1425, Pergamon Press (1979).
- 15 *G.W. Reed, Jr.* and *S. Jovanovic*: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th, p. 1637, Pergamon Press (1979).
- 16 *H.R. von Gunten, F. Wegmüller*, and *U. Krähenbühl*: J. Geophys. Res. 87, Supplement, p. A279 (1982).
- 17 *U. Krähenbühl*: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 11th, p. 1551, Pergamon Press (1980).
- 18 *F.H. Cirlin* and *R.M. Housley*: Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th, p. 341, Pergamon Press (1979).