

# WILHELM FOERSTER STERNWARTE $\frac{5}{V}$ MIT ZEISS-PLANETARIUM BERLIN

BERLIN 41 Munsterdamm 90 Insulaner Ruf: 796 20 29

## Protokoll

der

184. Sitzung der

GRUPPE BERLINER MONDBEOBACHTER

1974 Februar 11

Beginn: 20.05 Uhr.

Es sind erschienen die Damen Hessel, Kircher, Klische sowie die Herren Becker, Borsche, Breuer, Dressel, Engel, Flöting, Frenzel, Gwiazdowski, Hänig, Hopp, Klische, Kreidler, Kunert, Kunze, Mind, Mothes, Paech, Paul, Sebetowski, Stadler, Völker, Wichmann und Witzel.

Herr Kunert eröffnet die Sitzung und dankt allen Teilnehmern für ihr/trotz Erscheinen, der durch Streik erschwerten Anfahrt.

Er stellt fest, daß Herr Giebler, der am Vormittag sein Erscheinen zugesagt hat, offensichtlich durch den zusätzlichen S-Bahn-Streik nicht kommen konnte. Er dankt Herrn Frenzel für die Bereitschaft, über die Zeitschrift "Icarus" berichten zu wollen. Im Anschluß daran referiert Herr Kunert über einen in der Zeitschrift "Umschau" vom 1. Februar 1974 (74. Jahrgang, Heft 3) erschienenen Übersichtsartikel von Prof. Rudolf Meißner vom Institut für Geophysik an der Universität Kiel unter dem Titel "Stand der Mondforschung nach Apollo". Er empfiehlt die ausführliche Lektüre dieses Artikels.

Den Inhalt faßt er folgendermaßen zusammen:

"Die Apollo-Astronauten brachten insgesamt 400 kg Mondmaterial zur Erde. Die sowjetischen Sonden Luna 16 und 20 brachten ebenfalls Mondproben von anderen Landeplätzen zur Erde. Nur zwei Fundorte, die von Apollo 16 und Luna 20, liegen auf dem Mond in reinen Terra-Gebieten, den kraterreichen hellen Hochländern des Mondes; die Landeplätze von Apollo 14, 15 und 17 lagen in Übergangsgebieten, die von Apollo 11, 12 und Luna 16 in reinen Mare-Landschaften, dunklen Tiefebene des Mondes.

Keine der Mondproben stammt von sogenanntem anstehenden Gestein. Alle Proben wurden kleineren, gelegentlich auch größeren Felsbrocken oder losem Material des Regulith entnommen, der komplexen Oberflächenbedeckung aus Gesteinsbruchstücken, "Staub" und Glas. Beim Meteoriteneinschlag auf der Mondoberfläche wurde Material losgelöst, emporgeworfen und zerbrochen und fiel dann auf die Mondoberfläche zurück. Die Oberfläche wurde durch Erosion von Mikro-Meteoriten und Strahlung geprägt. Weitverbreitete Arten von Regulithpartikeln sind Gläser und Mikrobrekzien. Die Gläser, durch viele weitverbreitete Abbildungen bekannt, treten im allgemeinen als bunte und ebennmäßige Kügelchen von goldgelber bis oranger und brauner Farbe auf und sind chemisch titanreiche Basalte. Mikrobrekzien bestehen aus kleinen Gesteinstrümmern und Gläsern, die durch die Stoßenergie einschlagender Kleinmeteorite und/oder die hierbei entstehende Wärme zusammengeschweißt wurden.

Alle gefundenen Mondproben verdanken ihre Entstehung den magmatischen<sup>en</sup> Differenzierungsprozeß, das bedeutet, alle Fundorte waren in der Frühzeit des Mondes schmelzflüssig. Die Mondproben lassen also nicht die Bedingungen bei der Formung des Mondes, aber den ersten Teil seiner Entwicklung erkennen.

Der Mond ist also weder ein kalter Großmeteorit noch ein verkleinertes Abbild unserer Erde. Da er nur ein Viertel so groß wie die Erde ist, war und ist er viel weniger aktiv und enthält auch relativ ältere und einfachere Gesteine. In den Terragebieten finden wir die ersten erkennbaren Stufen der Entwicklung des Mondes. Die Proben aus diesen Gebieten sind die ältesten und lassen den Beginn der Entwicklung unseres Mondes erfassen, obwohl Veränderungen durch spätere intensive Meteoriteneinschläge mit umfangreichem sekundärem Auswurfmaterial die Gesteinseigenschaften beeinflusst haben und die Altersbestimmung zum Teil erschweren. Der Mond zeigt kein nennenswertes Granitvorkommen, nur kleine Graniteinschlüsse waren in einigen Mare-Basalten zu finden.

Auf dem Mond wurde bisher keinerlei Wasser, keine Flüsse und keine im Wasser abgelagerten Sedimente gefunden. M e i B n e r betont, der Mond habe sie nie besessen. Ob nennenswerte Mengen von Granit aus basaltischem Magma, dem Hauptprodukt tiefer Vulkane, selbst nach magmatischem Aufschmelzen entstehen können, scheint fraglich. Folgende Arten von Gesteinen kan man auf dem Mond unterscheiden:

1. Die Basalte der Mondmaria.
2. Stark feldspatreiche Gesteine, besonders die anorthositischen der Terrae mit sehr hohem Aluminiumgehalt.
3. Die KREEP-Gesteine, mit einem großen Gehalt an radioaktiven Elementen. Der Name Kreep stammt von ihrem Gehalt an Kalium (=K), seltenen Erden, englisch: rare earth elements (= REE), und Phosphor (= P). Diese Gesteine wurden im Mare Imbrium und im Oceanus Procellarum entdeckt, finden sich aber auch in Terra-Gebieten.
4. Ein Basalt-Typ VHA (= Very High Aluminium), vor allem im Terra-Gebiet um Descartes (A 16) und Apollonius (L 20).

Die Unterscheidungen sind etwas willkürlich und beruhen nicht auf strukturellen oder texturellen Merkmalen, die in Brekzien nicht vorhanden sind, sondern auf chemischen Unterscheidungsmerkmalen, die sich teilweise überlappen. Einiges über das Material der Maria: eisenreiches, siliziumarmes, basaltisches Magma drang in einer Periode zunehmender Erwärmung aus einigen 100 km Tiefe durch Spalten nach oben und füllte die durch gewaltige Einschläge entstandenen Hohlformen und andere Tiefflächen. Lavaflüsse bis zu 350 km Länge bei nur 1° Neigung zeigen, wie dünnflüssig derartige Lavamassen gewesen sind. Mare-Basalte von fünf Fundorten besitzen ein Alter von 3,15 bis 3,85 Milliarden Jahre. Diese relativ kleine Zeitspanne gibt uns die Hauptzeit magmatischer Aktivität auf dem Mond an. Zahlreiche einander überlappende Lavaflüsse können nachgewiesen werden, von denen jeder neue Ausbruch auf bereits erstarrte Oberfläche stieß. Die letzten großen Ausbrüche fanden offensichtlich an den Rändern der Mare statt und folgten gelegentlich axialen unterirdischen Kanälen, die später zusammenbrachen. Seismische Messungen haben gezeigt, daß die Maria in ihrer Mitte eine Dicke von etwa 20 bis 50 km haben.

Zur Zeit der Entstehung der Mare-Basalte war nicht einmal so viel Wasser verfügbar, daß OH-Verbindungen in den Basalten gebildet werden konnten. Der hohe Anteil von Titan machte manche der Apollo-11-Proben mit ihrem hohen Gehalt an Ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ) schwerer als es der mittleren Dichte des Mondes entspricht. Ohne Zweifel sind alle Mare-Basalte durch partielles Schmelzen entstanden.

Das dunkle Material an den Rändern der Maria war vor den Apollo-Flügen als von jüngeren Ascheströmen stammend aufgefaßt worden. Vor allem im Nord-Ost-Teil der sichtbaren Mondhälfte findet man viele dieser dunklen Stellen, aber auch am Landeort von Apollo 17, dem Taurus-Littrow-Gebiet, sind sie zu finden. Die dunkle Färbung stammt nach Untersuchungen vieler Proben eindeutig nicht von Ascheströmen, sondern von einem höheren Gehalt von Titan und Eisen des Untergrundes, dessen chemische Zusammensetzung sich jedoch nicht grundsätzlich von anderen Typen des Mare-Basaltes unterscheidet. -3-



Das Alter dieser Proben war mit 3,8 Milliarden Jahre verhältnismäßig hoch.

Viel Diskussion gab es wegen der Entdeckung orangefarbenen "Bodens" in der Nähe des Kraters "Shorty", einem jungen Krater in der Nähe des Apollo-17-Landegebiets. Es wurde die Möglichkeit jüngerer Fumarolen mit Wasserbeimengungen, Eisenoxiden und Schwefel diskutiert. Die Untersuchungen der mitgebrachten Proben zeigten aber, daß es sich um gewaltig viele mikroskopisch kleine Kügelchen und andere Gebilde orangefarbenen Glases handelte, die aus titanreichem Basalt bestehen. Das Alter wurde auf 3,7 Milliarden Jahre bestimmt. Auf der Erde würden solche Gläser bereits nach 100 Millionen Jahren verwittert sein. Auf der trockenen Mondoberfläche konnten sie sich fast 4 Milliarden Jahre erhalten. Schwierig ist es, die starke Anreicherung an solchen Gläsern zu erklären, die hier eine dicke Schicht bilden. Möglicherweise schlug ein Meteor in einen Lavasee und verspritzte eine große Menge der sich schnell zu Glas formenden Tropfen, bevor diese von einer anderen Schicht überdeckt und so vor weiteren chemischen Umsätzen verschont wurden. Ein weiterer Meteorit, der vor nur etwa 30 Millionen Jahren den Krater Shorty erzeugte, legte dann offenbar die ursprüngliche Oberfläche wieder frei. Solche Überlegungen lassen sich aus dem festgestellten Altersunterschied zwischen dem Wert der Argon-Argon-Methode (= 3,7 Milliarden Jahre) und dem sogenannten Strahlungsalter ableiten.

Das Material der Terrae ist älter, uneinheitlicher und zerbrochener als das Mare-Material. Während die Maria-Gebiete hauptsächlich basaltische Gesteine mit nur geringen Unterschieden enthalten und nur etwa 4 % des Mare-Materials aus den umgebenden Hochländern stammt, lassen uns die Proben aus den Terra-Gebieten den Beginn der Konsolidierung der Mondkruste erkennen. Terra-Proben bestehen im wesentlichen aus Brekzien, was bei dem hohen Zerstörungsgrad der Terra-Gebiete durch Einschläge nicht überrascht. Bereits aufgrund der etwa 4 % helleren Bestandteile der Apollo-11-Proben hatte man diese als kalziumreiche Plagioklas-Feldspäte mit einigen Prozent Olivin und Pyrexen erkannt. Man nannte sie Anorthosite, da sie entsprechenden Mineralien auf der Erde sehr ähnlich sind. Spätere Apollo-Flüge bestätigten, daß diese Gesteinsart Hauptbestandteil der Hochländer ist. Das war für die Mondforscher eine große Überraschung und von niemandem vorhergesagt worden. Aufgrund dieser Tatsache bringt man jetzt den Erd-Anorthositen größeres Interesse entgegen.

Altersbestimmungen an typischen Terra-Gesteinen zeigte ein scharfes Häufigkeitsmaximum zwischen 3,9 und 4 Milliarden Jahre. Man meint, daß der Mond in dieser Zeit eine katastrophenartige Epoche erlitten haben muß, welche die Zeituhren für die Oberflächengesteine neu einstellte und die Brekzien entstehen ließ. Möglicherweise war es ein sehr intensives Meteoritenbombardement, das in den gewaltigen Einschlägen des Mare Imbriums und Mare Orientale seinen Höhepunkt fand. Ohne Zweifel ist der Mond wie Erde und Meteoriten etwa 4,6 Milliarden Jahre alt. Man hatte eine größere Streuung des Alters bei den Terra-Proben vermutet. Jetzt scheint es so, als ob der letzte große Einschlag, der das Mare-Orientale-Becken entstehen ließ, das dortige Material über den ganzen Mond verspritzte und die Schicht der Terra-Gesteine entstehen ließ. Ihr Alter entspricht deshalb dem letzten großen Einschlag.

#### Das Mondinnere aufgrund geophysikalischer Messungen

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Geräte auf der Mondoberfläche und in umkreisenden Subsatelliten lassen uns etwas über das Innere des Mondes oder seine Umgebung erfahren und senden zum Teil immer noch Informationen zur Erde.

Hier die wichtigsten Geräte:

- \* drei aktive seismische Stationen, mit deren Hilfe Angaben über die oberen 100 m der Mondkruste erhalten wurden;
- \* vier passive seismische Stationen, die weiterhin Mondbeben und Meteoritenaufschläge registrieren;
- \* drei Subsatelliten mit Meßgeräten für Sonnenwind, kosmische Strahlung, Magnetfeld und Schwerfeld des Mondes;
- \* vier stationäre Magnetometer zur Messung von Änderungen des Magnetfeldes;
- \* ein Gravimeter (Apollo 17) zur Untersuchung von Gezeiteneffekten;
- \* drei Wärmeflußmeßgeräte, welche Temperaturen in verschiedenen Tiefen angeben;
- \* Laser-Reflektoren, die Laser-Impulse zur Erde zurückwerfen, zur Messung von Abständen, Drehungen und Bewegungen auf Mond und Erde;
- \* weitere Geräte zur Analyse des Sonnenwindes, lunarer Gase, Ionen und Meteoriteneinschlägen.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Messungen sollen im folgenden betrachtet werden. Die obersten Schichten des Mondes in der Nähe der Landeplätze von Apollo 14 (Fra Mauro), Apollo 16 (Descartes) und Apollo 17 (Taurus Littrow) sind mit Hilfe refraktionsseismischer Verfahren untersucht worden. Als Anregung für seismische Wellen dienten kleine Explosionen, ausgelöst durch Schüsse der Astronauten, aber auch eine Art Granatwerfer und Einschläge des Aufstiegssteils der Landefähren. Der Regolith hat in allen drei Gebieten eine Kompressionswellengeschwindigkeit von etwa 100 bis 115 m/s. Darunter zeigen sich bis in etwa 400 m Tiefe Schichten mit rasch zunehmender Geschwindigkeit von 300, 1100 und 4000 m/s. Die gemessenen Geschwindigkeitswerte sind mit dem nach unten abnehmenden Zerstörungsgrad basaltischer Gesteine verträglich und schalten die Möglichkeit des Vorhandenseins einer früher vermuteten Permafrostschicht aus. Angaben über tiefere Strukturen des Mondes kamen und kommen von den vier "passiven seismischen Stationen". Vor allem waren es die künstlichen Anregungen seismischer Wellen, die von sechs Einschlägen der Saturn-IV b-Raketenstufe 3 und von sechs Einschlägen der nicht mehr benutzten Aufstiegssteile der Landefähren stammten, die an den Stationen gut lesbare Seismogramme erzeugten. Zum Unterschied gegenüber vielen registrierten Mondbeben und Meteoriten sind bei den künstlichen Einschlägen Ort und Zeit der Anregung genau bekannt. So wurden nach und nach die Laufzeit-Kurven immer mehr verdichtet und in recht zuverlässige Geschwindigkeits-Tiefenkurven umgewandelt.

Nach einem schnellen Anstieg seismischer Geschwindigkeiten bis zu etwa 10 km Tiefe, wie er aus dem aktiven seismischen Experiment berechnet wurde, erhalten wir ab etwa 25 km Tiefe Werte von etwa 7 km/s, wie sie nach Labormessungen dem unzerstörten Material der ANT-Gesteine, z.B. den gabbroiden Anorthositen bei Apollo 16 entsprechen. Zwischen 50 und 65 km Tiefe scheint sich ein recht plötzlicher Anstieg der Geschwindigkeiten auf etwa 7,8 km/s zu vollziehen. Hier beginnt also, ähnlich wie entsprechende Geschwindigkeiten auf der Erde es anzeigen, der Mantel, der vermutlich aus Olivinen, Peridotiten und Pyroxenen besteht, wie es sich auch aus petrologischen Befunden andeutet. Eine so starke Ähnlichkeit mit terrestrischen Verhältnissen war zunächst nicht vermutet worden. Eine Differenzierung in Kruste und Mantel scheint ein allgemeiner Prozeß terrestrischer Himmelskörper zu sein.

Um Informationen über noch tiefere Schichten des Mondes zu gewinnen, reichen die Entfernungen zwischen Stationen und Einschlagorten der Raketenstufen nicht aus, Durch das Netz der jetzt arbeitenden vier seismischen



Stationen ist es allerdings möglich geworden, Entfernungen zu Mondbeben und Meteoriteneinschlägen hinreichend genau zu messen, um daraus Laufzeitkurven zu verlängern und tiefer in den Untergrund hineinzuleuchten. Es zeigt sich hieraus, daß mindestens die äußeren 1000 km des Mondes starr sind und daß hier keine Schmelzen größeren Ausmaßes mehr vorhanden sein können. Anzeichen, wie abnehmende Energie von Scherwellen bei weit entfernten Beben und Einschlägen der Rückseite, deuten darauf hin, daß in den inneren 700 km des Mondes partielles Schmelzen wahrscheinlich ist. Es ist zu hoffen, daß weitere größere Ereignisse auf der Mondrückseite noch während der Lebensdauer der seismischen Stationen diese Vermutungen bestätigen werden.

Auch Tiefe und Orte der viel diskutierten Mondbeben konnten durch das Stationsnetz wesentlich genauer angegeben werden, als dies vorher möglich war. Die meisten Mondbeben haben Tiefen zwischen 800 und 1200 km, darunter treten offenbar keine Beben mehr auf, ein weiteres Anzeichen für mögliches partielles Schmelzen im Mondinnersten. Im Hinblick auf frühere Abschätzungen konnte also vor allem die Tiefe der Beben besser angegeben werden. Alle anderen Eigenschaften der Beben, insbesondere die starke Ähnlichkeit vieler Bebengruppen, ihre gleiche Polarität und ihr Auftreten bei Perigäum (erdnächste Entfernung des Mondes) wurden durch die neueren Untersuchungen bestätigt. Die Ursachen dieser Beben, von denen viele vom gleichen Ort herkommen, sind immer noch ungeklärt. Möglicherweise kommen Gezeitenkräfte auch für die Energieauslösung in Frage, oder etwa die laufende Forthbewegung des Mondes von der Erde, schwache Konvektionsbewegungen oder ein Tiefvulkanismus, jedenfalls Prozesse die längs Spalten und Orten von Inhomogenitäten als bebenauslösend wirksam werden. Die gezeitenbedingte Verformung des Mondes beträgt an der Oberfläche je nach Annahmen über die Elastizität des Mondkörpers zwischen 40 cm und 3 m. Sie ist damit von der gleichen Größenordnung wie die der Erde. Zwar sind die gezeitenenerzeugenden Kräfte auf dem Mond stärker, doch wirkt diesem Effekt die größere Starrheit des Mondkörpers entgegen. Zeitlich besteht eine gute Korrelation zu den Beobachtungen von Dunstschleiern und kurzzeitigen Leuchterscheinungen. Auch räumlich scheinen diese Beobachtungen sowie die Tief-beben die Ränder der Maregebiete zu bevorzugen, in denen, wie erwähnt, die Häufigkeit von dunklen, titan- und eisenreichen Basalten besonders groß ist. Möglicherweise sind hier tiefreichende Spalten oder Verwerfungen vorhanden. Die anscheinend weiche innerste Schicht des Mondes ab etwa 1000 bis 1200 km entspricht also etwa der Asthenosphäre unserer Erde zwischen etwa 100 und 200 km. Auch Druck und Temperatur sind hier etwa gleich groß. Ein Eisenkern des Mondes, ob fest oder flüssig, existiert sehr wahrscheinlich nicht.

Eine der ganz unerwarteten Entdeckungen des Apollo-Programms waren die hohen Magnetisierungswerte der Basalte und Brekzien. Während Satellit Explorer 35 nur ein bescheidenes Dipolfeld von maximal  $5 \gamma$  ( $1 \gamma = 10^{-5}$  Gauß =  $10^{-9}$  Tesla) festgestellt hatte, wurden am Boden von den Astronauten mit fest installierten und tragbaren Magnetometern Felder bis über  $300 \gamma$  gemessen. Die Stärke dieser lokalen Felder scheint mit der Mächtigkeit der Brekzien zusammenhängen, die mehr freies Eisen als die Basalte besitzen. Im Hochland bei Apollo 16 wurde mit  $313 \gamma$  das stärkste Feld gemessen, im Apollo-15-Mare-Gebiet mit  $4 \gamma$  das kleinste. Die Magnetometer der in etwa 100 km Höhe kreisenden Subsatelliten zeigen ähnliche Unterschiede zwischen der marebedeckten Vorderseite und der aus Hochland-Brekzien bestehenden Rückseite.

Die Magnetisierung der Mondoberfläche ist also zweifellos ein globales Phänomen. Durch Labormessungen läßt sich die Stärke des Feldes, welches die Gesteine vor 3,2 bis 4,1 Milliarden Jahre magnetisiert hat, als sie aus der Schmelze erstarrten, auf 1000 bis 10 000 $\gamma$  abschätzen. Das Erdfeld hat heute etwa 40 000 $\gamma$ . Die relativ hohen berechneten Werte des alten Mondfeldes sprechen zunächst für seine Entstehung im Innern des Mondes. Doch müssen von den möglichen Theorien zur Erklärung des alten Mond-Magnetfeldes diejenigen, die das Feld aus einem Dynamoprozeß im Mondinnern zu erklären versuchen, angezweifelt werden, da Temperaturberechnungen für die Zeit zwischen 3,1 und 4,3 Milliarden Jahre auf zu kleine Werte führen und größere Eisenmengen im Zentrum offenbar nicht vorhanden sind. Einflüsse eines anfänglich starken Sonnenfeldes können nach Beobachtungen an ähnlichen Sternen nicht so stark sein, wie es zur Magnetisierung erforderlich wäre. Doch könnte ein anfänglich kaltes Mondinneres durch ein kurzzeitiges starkes Magnetfeld isotherm magnetisiert worden sein. Vor zwei Jahrhunderten glaubte man, daß das Erdfeld von einer Permanentmagnetisierung seines Innern herrühre, merkte aber bald, daß der Curie-Punkt bereits in 25 km Tiefe überschritten wird. In der Anfangszeit des Mondes können aber solch niedrige Temperaturen im Innern vorgeherrscht haben.

Neue Informationen über die Figur des Mondes und sein Schwerfeld erbrachte die Verfolgung der Subsatelliten von Apollo 15, 16 und 17 sowie Höhenmessungen mit Lasern von den umkreisenden Apollo-Raumschiffen. Mit Hilfe der Laser-Reflektometer wurde der mittlere Monddurchmesser auf 3471,826 km neu festgelegt. Der Schwerpunkt des Mondes fällt nicht mit dem Mittelpunkt seiner Figur zusammen, sondern ist mehr als 2 km nach Osten und mehr als 1 km nach Norden verlagert. Da das Mondinnere nach seismischen und anderen geophysikalischen Messungen "weich" ist, kann der Unterschied nur von Inhomogenitäten im äußeren Teil des Mondes herrühren.

Die Höhenmessungen zeigten zunächst, daß die der Erde zugewandte Mondseite im Mittel fast 2 km tiefer, die abgewandte (Terra-)Seite 2 km höher liegt als der mittlere Mondradius. Die ringförmigen Maria liegen sogar 4,1 km tiefer, die übrigen etwa 2 bis 2,5 km unter "Normal-Null". Diese Höhenverteilung läßt sich nur dann mit der Verlagerung des Schwerpunktes in Richtung der tieferliegenden Mare-Gebiete erklären, wenn man in Hochländern der Rückseite eine etwa doppelt so mächtige Kruste annimmt wie auf der Vorderseite. Offenbar bestimmen also größere Massen mit dichter basaltischer Kruste die größere mittlere Dichte der Vorderseite, in denen die enormen Aufschläge in der Frühzeit des Mondes Material bis zur Rückseite geschleudert haben und durch Aushöhlung, Spaltenbildung und zusätzliche Erwärmung sowohl die Bildung als auch den Aufstieg von Magmen aus größerer Tiefe begünstigt haben. Wie erwähnt, flossen einige Millionen Jahre nach den Aufstürzen basische Lavaströme in die Becken, die bis zu mehr als 20 km mächtige Basalte schufen. Isostatische Hebungen gefolgt von zusätzlichen, letzten Ausbrüchen sowie eine mögliche Umwandlung von Basalt in Eklogit in tieferen Schichten müssen für den Schwereüberschuß (= Mascons) der ringförmigen Marebecken verantwortlich sein.

Aussagen, daß der innerste Teil des Mondes heute warm ist, kommen nicht nur von seismischen Messungen, sondern auch von der Beobachtung magnetischer Variationen und besonders von Wärmeflußmessungen. Die anfänglich aus den magnetischen Verfahren errechneten heutigen Temperaturen für das Mondinnere scheinen etwas zu niedrig gewesen zu sein. Die Wärmeflußmessungen, von 28 bis 30 erg/cm<sup>2</sup> s (2,8 Mikrowatt/cm<sup>2</sup>) bei den



Apollo-15- und -17-Landeplätzen deuten höhere Werte im Innern an, die zwischen 1000 und 1400°C liegen. Alle Berechnungen der Wärmegeschichte des Mondes führen auf anfänglich sehr hohe, Schmelzen bewirkende Temperaturen für die äußeren Hunderte von Kilometern. Die vermutlich 60 km dicke Feldspat-Kruste erfordert eine mehrere 100 km mächtige Schmelzzone in der Frühzeit.

Als weitere Randbedingungen in diese Rechnungen gehen ein: Die kalte, seit drei Milliarden Jahren starre Lithosphäre, die heutigen Grenzen der berechneten Temperatur im Mondinnern und die heutige Konzentration radioaktiver Stoffe an der Oberfläche. Alle thermischen Mondmodelle lassen zwar keine eindeutige Unterscheidung zwischen einem anfänglich kalten oder warmen Mond zu, doch überwiegen die Anzeichen, die für eine kalte Zusammenballung von Material sprechen. Die Beimengungen von Uran in den Oberflächengesteinen sind nicht überall die gleichen. An einigen Rändern der Maria sind starke Konzentrationen radioaktiver Elemente festgestellt worden. Die  $\alpha$ -Strahlen-Spektrometer von Apollo 15 und 16 beobachteten Radon 220 und das Tochterelement Polonium 210. Maxima wurden in der Nähe der Krater Aristarchus und Grimaldi gemessen, wo innerhalb der letzten Jahrhunderte eine starke Aktivität von Dunstschleiern und Leuchteffekten beobachtet wurde. Die Vorderseite mit ihren Maria erscheint allgemein radioaktiv "wärmer" als die Rückseite. Offenbar hat hier zusammen mit der Bildung und dem Aufstieg basaltischer Magmen auch ein stärkerer Transport radioaktiver Elemente an die Oberfläche stattgefunden. Untersuchungen der extrem dünnen Mondatmosphäre zeigen, daß diese hauptsächlich aus radiogenen Gasen besteht. Keine Moleküle von Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff, Kohlenstoff oder Chlor, die aus terrestrischen Vulkanen in großen Mengen in die Atmosphäre eindringen, sind in der Umgebung des Mondes zu finden. Ein Gasausbruch aus dem Mondinnern, der mit den Leuchterscheinungen zusammenhängen könnte, konnte bisher auf dem Mond nicht beobachtet werden.

#### Die Entwicklung des Mondes

Von Chemie und Alter der Gesteine und der Physik des Mondkörpers ausgehend, von Vergleichen mit Meteoriten, Mars und Erde, entwickelt sich das Bild der Evolution des Mondes und anderer Himmelskörper in unserem Sonnensystem. Wir wissen heute, daß der Mond nicht nur in seiner Dichte, sondern auch in seinem Chemismus sowohl von dem der Erde als auch von dem chondritischer Meteoriten abweicht, die wir als Repräsentanten der kondensierten Elemente unserer Sonne ansehen. Das heißt zunächst, der Mond entstand gegenüber Erde und Meteoriten entweder

- a) zu einer anderen Zeit,
- b) an einem anderen Ort oder
- c) in der Nähe eines größeren Planeten (Erde).

Dieser erste Beginn der Formung ist unklar. Mit einiger Sicherheit läßt sich nur sagen, daß der Mond weder ein eingefangener meteoritischer Körper des Asteroidengürtels noch ein Ausschleuderungsprodukt unserer Erde ist. Die Möglichkeiten a) und c) sind nach dem heutigen Stand unserer Erkenntnisse die weitaus wahrscheinlichsten, wobei a) durch Altersbestimmungen an Meteoriten und Mondmaterial eine enge Begrenzung auf etwa 100 Millionen Jahre erfährt. So widmet man zur Zeit der Möglichkeit c) die größte Aufmerksamkeit. Überlegungen und Rechnungen befassen sich mit dem Problem, wie zwei chemisch und physikalisch verschiedene Körper mehr oder weniger gleichzeitig und im gleichen Abstand von der Sonne aus dem planetaren Nebel heraus entstehen können. Wie wir von der dann beginnenden Geschichte des Mondes - nicht derjenigen der Erde - wissen, flogen vor 4,6 bis 4 Milliarden Jahren viele größere Körper in unserem Teil des Sonnensystems umher, wofür die gewaltigen Einschläge der Marebecken Zeugen sind. Vermutlich sind noch größere und noch mehr Körper auf die

Erde gefallen. Das Vorhandensein von Großmeteoriten und Kleinmonden läßt aber alle dynamischen Berechnungen über Einfang oder Entweichung des Mondes unrealistisch erscheinen.

Auch die anfängliche chemische Entwicklung der sich formenden Körper von Mond und Erde ist umstritten. Bisher vermutete man aufgrund des Eisenkerns unserer Erde, daß diese im Anfangsstadium völlig geschmolzen war und sich das flüssige Eisen als häufigstes, schwerstes Material im Innern festsetzte und einen Mantel von Eisen-Magnesium-Silikaten zurückließ. Für den Mond dürfen wir diese Entwicklung nicht annehmen. Weder besitzt er eine entsprechende Menge Eisen, noch hat er einen merklichen Kern. Neuerdings vermutet man, daß Erde und Mond bereits bei ihrer Entstehung unterschiedliche Materialien aufgesammelt haben. Die Erde begann vielleicht etwas früher aus dem Nebel heraus zu kristallisieren und die meisten schweren Elemente wie Eisen und Nickel sowie flüchtige Stoffe an sich zu ziehen, ohne unbedingt voll aufzuschmelzen. Für den Mond, der sich in Erdnähe formte, waren diese Stoffe nicht mehr verfügbar.

Der 1969 in Mexico gefallene "Allende"-Meteorit, der etwa eine Tonne Material verspritzte, brachte den Forschern, die eben mit der Analyse von Mondproben beschäftigt waren, eine weitere Überraschung: der kohlige Chondrit stellte sich als eine Mischung von Material dar, das teils bei hohen und teils bei tiefen Temperaturen kondensiert war, und mit den Elementen Kalzium, Aluminium, Titan, Uran, Thorium und den seltenen Erden genauso angereichert ist wie die Terra-Gesteine der Hochländer. Dies scheint ein weiteres Anzeichen dafür zu sein, daß die Hochländer als erste verfestigte Außenhaut des Mondes bei einem ersten, einfachen Aufschmelzprozeß vor 4,6 Milliarden Jahren entstanden sind. Von dieser Zeit an übersehen wir die Geschichte des Mondes besser. Obwohl kein festes Mondgestein mit 4,6 Milliarden Jahre Alter gefunden wurde, so zeigen doch die Brekzien der Terrae sowie die Schichtung der äußeren Teile mit ihren Auswurfstoffen, daß die gigantischen Einschläge zwischen 3,9 und 4,2 Milliarden Jahre eine zusätzliche Erwärmung und eine große Anzahl mächtiger Auswurfdecken schufen und die radioaktiven Uhren neu stellten. Das Eindringen der Temperaturwelle nach innen sowie die Erwärmung durch radioaktive Elemente ließen einige 100 Millionen Jahre später als zweiten Schmelzprozeß basaltische Laven in einigen 100 km Tiefe entstehen und durch Spalten in die Vertiefungen hochdringen, vorwiegend auf der Vorderseite mit ihrer dünnen und angeschlagenen Kruste. Etwa seit 3,1 Milliarden Jahren ist der äußere Teil des Mondes starr, starrer als Erde und Mars. Das Magnetfeld des Mondes wurde mit weiterer Erwärmung im Innern immer kleiner. Die sich mit schwerer basaltischer Lava füllenden Tiefgebiete machten diese Seite des Mondes schwerer. Manche Einschläge förderten KREEP-reiches Material zutage und verspritzten es strahlenförmig über die Mondoberfläche. Ein Rest Gasvulkanismus scheint sich bis heute gehalten zu haben. Einen Überblick über die magmatische Aktivität der ersten 1,6 Milliarden Jahre seit Formung des Mondes gibt die beigegefügte Abbildung. In Zusammenarbeit verschiedenster Fachrichtungen der Physik, Geophysik und Geologie wurden die Daten der absoluten Altersbestimmung der Proben durch Beobachtungen von Überlappungen und Auswurfstoffen, Fließersehinungen und Kraterrändern ergänzt. So wurde die traditionelle relative Altersskala in die physikalische, absolute Skala eingepaßt. - Es finden sich auf dem Mond keine nutzbaren Bodenschätze. Der Wert der Mondforschung liegt nicht in einer Exploration von Lagerstätten, sondern in der enormen Vertiefung des naturwissenschaftlichen Weltbildes. Wir erhielten Kenntnis von Perioden der Formung eines Himmelskörpers, die uns die Entwicklung unserer Erde nicht vermitteln kann. Gerade die vergleichenden Untersuchungen von Mond, Erde, Meteoriten und Mars sind es, die uns die unterschiedliche Evolution unseres Planeten und der Nachbarn im All verstehen lassen.

Ende der Sitzung 21.20 Uhr.

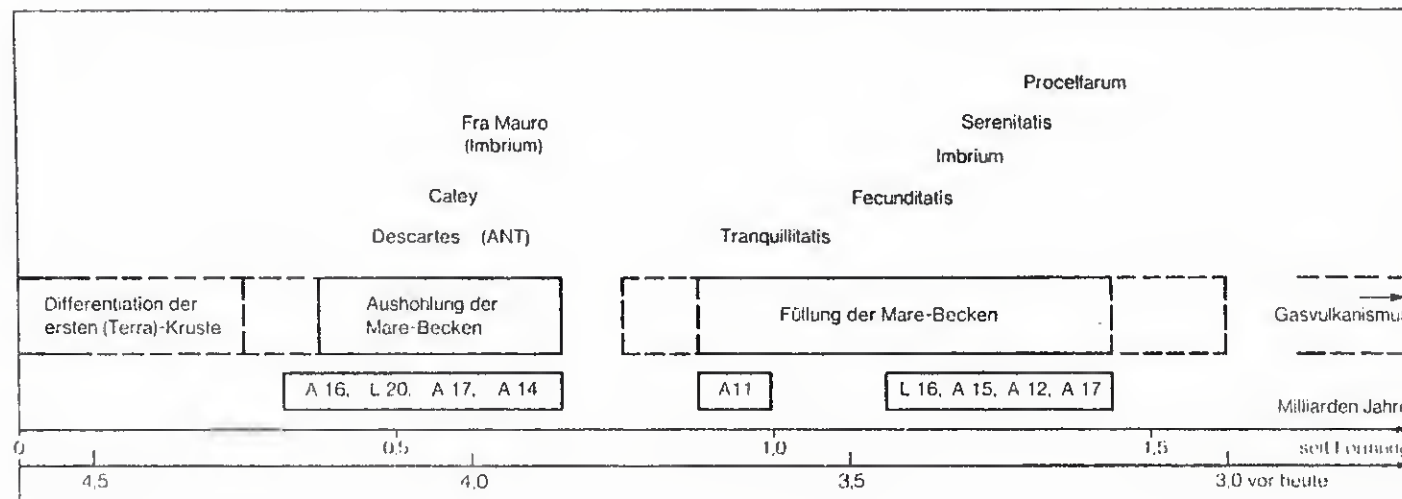
Gez. A. K u n e r t

Die nächste Sitzung der GRUPPE BERLINER MONDBEOBACHTER findet

am Montag, d. 11. März 1974, um 20 Uhr

im Zeiss - Planetarium (am Fuße des Insulaners) statt.





### Altersmäßige Entwicklung der Mondoberfläche

A 11 bis A 17 = Apollo-11- bis -17-Daten

L 16, L 20 = Luna-16- und -20-Daten