

# WILHELM FOERSTER STERNWARTE <sup>5</sup>/<sub>4</sub> MIT ZEISS-PLANETARIUM BERLIN

BERLIN 41 • Munsterdamm 90 • Insulaner • Ruf 7962029

## Protokoll

der

236. Sitzung der

GRUPPE BERLINER MONDBEOBACHTER

1979 Oktober 8

Beginn: 20.05 Uhr

Es sind erschienen die Damen Busack, Hessdörffer, Kühne, Schmitz sowie die Herren Delfs, Ebeling, Ehlert, Erfurth, Freitag, Greitzke, Hänig, Hilz, Jobsky, Käckell, M. Kummrow, Kunert, Leder, Liebold, Meyer, Nehls, Neugebauer, Neye, Pinkow, Reimann, Schirdewahn, Sydow u. Voigt.

Herr Kunert begrüßt die Anwesenden und gibt die Referenten der heutigen Sitzung bekannt. Er übermittelt dann Grüße der Herren Dietmar Böhme und Rolf Henkel. Anschließend vergibt Herr Kunert ein Referat an Herrn Neugebauer aus der Zeitschrift "The moon and the planets" (Okt. 79). Außerdem wird Herr Liedtke in der nächsten Sitzung über Impact-Krater auf der Erde referieren. Herr Freitag wird dazu ein Korreferat halten.

Herr Hänig macht darauf aufmerksam, daß zur Zeit das Mare Crisium, bedingt durch die Libration des Mondes, fast "kreisförmig" zu beobachten ist. Herr Kunert bittet nun Herrn Freitag, sein Referat zu halten. Er führt aus zum Thema

"Subsolides Convective Cooling - Histories of Terrestrial Planets" von G. SCHUBERT, P. CASSEN, R. E. YOUNG aus Icarus, Vol. 38, Nr. 2, May 79:

"Die Autoren sind erfahrene Theoretiker auf dem Gebiet der terrestrischen Planeten und beschäftigten sich schon ausgiebig mit Modellen der Planetenentwicklung (speziell der Abkühlungsphase). Diesmal legten sie sich die Frage vor: Wie schnell erkalten Mantel u. Kruste eines Planeten, wenn sie zu einem Startzeitpunkt glutflüssig (1500-3300 K) waren?

Erkaltungstheorie:

Ist das Mantelmaterial noch "flüssig", so reichen die Konvektionsströme bis an die Planetenoberfläche, dadurch ist eine schnelle Abkühlung gesichert.

Ist das Mantelmaterial nur noch "fast flüssig" (subsolidus, vielleicht an eine fast-erstarrte Schmelze, wie in einer Glasscheibe, denken), so gibt es sehr zähe Konvektionsströme und es bildet sich eine Kruste (in der Kruste geschieht der Wärmetransport durch Wärmeleitung).

Um dieses geologische Modell auch auf andere Planeten und den Mond anwenden zu können, suchten die Autoren nach einer simplen Formel, die nur wenige Parameter aufweist.

## Eingabewerte:

D: Dicke des Mantels zum Startzeitpunkt

T(0): Temperatur " " "

V(T): Viskosität des Mantels (abhängig von der Manteltemperatur

V(T) ist ein Ausdruck der Gestalt

 $V(T) = P \exp(A/T)$ 

P, A physikalische Konstanten des Mantelgesteins

## Ergebnis:

T(x): Temperatur des Mantels nach xJahren

l(x): Dicke der Kruste " xJahren

Um das Modell und die gesuchten Formeln so einfach wie möglich zu halten, wählte man noch folgende Vereinfachungen:

1. Es genügt für den Mantel eine Temperatur festzulegen (daraus resultiert genau ein Wert für die Viskosität, die ja die Flußgeschwindigkeit der Konvektion steuert).
2. An der Oberfläche des Mantels bildet sich sofort die Kruste. (Analogie: Eis auf einem -plötzlich strengem Frost ausgesetzten- Gewässer.  
Fehler in der Analogie: Mit dem Übergang des Materials vom Mantel zur Kruste ist kein Wechsel des Aggregatzustandes verbunden, daher kein Wärmegewinn).
3. Mantel + Kruste ist gleich D; die Kruste wächst beim Erkalten auf Kosten des Mantels.
4. Die Oberflächentemperatur auf der Kruste ist konstant (z.B.  $0^{\circ}\text{C}$  für Erde, Mond, Mars).
5. Der Mantel enthält keine radioaktiven Elemente, er kann also nur seine Startwärme abstrahlen.
6. Der Kern des Planeten beeinflusst die Abkühlungsvorgänge nicht, er isoliert lediglich die Mantelunterkante.
7. Geometrische Aspekte sind vernachlässigbar (Kugelgestalt der Planeten); es genügt, einen Standardzylinder Mantelmaterial zu betrachten.
8. Sonderfaktoren bleiben unberücksichtigt (z.B. Riesenmeteoriteneinschläge, Gebirgsbildung, Kontraktion des Planeten führt an Durchmesseränderungen, Plattentektonik).

Im Artikel wird ausführlich begründet, warum diese Annahmen zulässig sind oder zumindest das Ergebnis nur unwesentlich beeinflussen, also lediglich die Formeln vereinfachen.

Für den Vortragenden sind die Ergebnisse der hier ausgewerteten Rechnungen verblüffend:

Objekt	D	Oberfl.- beschl.	Oberfl.- temper.	T(0)	T(4,5 Mrd J.)	l(x)= 1 km 1000 Jahre	l(x)= 10 km Mio Jahre
Name	km	cm/s <sup>2</sup>	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$		
Merkur	640	370	100	1800	*	2,5	8
Mars	2030	375	0	2300	1283	6	160
Mond	1740	160	0	1300	1204	1	1
Erde	3000	1000	0	3000	1307	35 000	280
Erde	3000	1000	0	1500	1275	nicht in der Tabelle enthalten	

\* voll erstarrt nach 1,62 Mrd Jahren, daher keine Manteltemperatur.

Die Anfangstemperatur, sofern nur größer als  $1500^{\circ}\text{C}$ , beeinflusst also nicht entscheidend die heute (errechnete) erreichte Manteltemperatur. Diese jedoch läßt zwingend auf einen Wärmefluß zur Planetenoberfläche schließen, der also im Augenblick gemessen werden kann.

Danach gehen für den Mond allein  $0,15 \mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$  auf das Konto "historische Wärme"; bei den Apollo-Flügen wurden  $0,5$  und  $0,38 \mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$  gemessen. Ähnlich ist das Verhältnis bei der Erde:  $0,35$  zu  $1,5 \mu\text{cal}/\text{cm}^2\text{s}$

Die Restwärme aus der Entstehungszeit der Planeten kann also zu einem erheblichen Anteil den heute meßbaren Wärmefluß speisen; nur mit größter Vorsicht sollte man in Zukunft von Wärmeflußmessungen auf den Gehalt an radioaktiven Elementen in einem Planeten schließen." ---

Herr K u n e r t dankt Herrn F r e i t a g und bittet um Diskussionsbeiträge.

Anschließend referiert Frau S c h m i t z über das Thema:

"10 Jahre nach der ersten Mondlandung" - Fazit der Mondforschung -

Referat über 3 Artikel von Hermann-Michael H a h n, Autor der Zeitschrift BILD DER WISSENSCHAFT

- 1) "Mond und Erde sind von derselben Mutter", und ein Interview mit dem Kieler Planetologen Dr. Alan BINDER, beides aus der Zeitschrift, sowie ein Artikel aus der Zeitung DER TAGESSPIEGEL v. 29.7.79 "Stammt der Mond doch von der Erde?"
- 2) Zusätzlich aus "b.d.w." "Mondkrater unterm Mikroskop, Altersbestimmung durch Fotos" von Hugo FECHTIG u. Wolfram KNAPP und als Ergänzung: "Gesteine u. Mineralien des Mondes" von Wolf v. ENGELHARDT vom Mineralogischen Institut der Universität Tübingen, veröffentlicht in den Zeiss-Informationen v.15.4.70.

Es gibt 3 Theorien um die Entstehung unseres Erdtrabanten

- 1) Die selbständige Entstehung des Mondes in Erdentfernung zur Sonne.
- 2) Die selbständige Entstehung in einem anderen Bereich des Sonnensystems und nachträglichem Einfang durch das Schwerfeld der Erde. Diese Möglichkeit war 1969 von dem amerik. Wissenschaftler Martin BAILEY durchgerechnet worden. Danach müßte der Mond früher ein Planet zwischen MERKUR und VENUS gewesen sein, der - bedingt durch Bahnstörungen dieser beiden Planeten - ziemlich abrupt weiter nach draußen geschleudert wurde und dann allmählich von der Erde eingefangen werden konnte.
- 3) Mond und Erde waren mal eine Einheit.

Auch über diese 3. Entstehungsart gab es verschiedene Meinungen:

- a) Schon 1897 meinte George H. DARWIN, der Sohn des berühmten Naturforschers Charles DARWIN, auf Grund von Rechnungen über Ebbe und Flut, daß sich der Mond aus einem gewaltigen Flutberg, hervorgerufen durch die Anziehungskraft der Sonne, gelöst habe.
- b) Der Berliner Geologe Heinrich QUIRING nahm an, daß der Mond durch einen riesigen Meteoriten aus der Erdkruste herausgeschlagen worden sei. "Beweis": Das Loch des Pazifiks, dessen Randbezirke ja noch heute Zonen verstärkter Erdbebentätigkeit sind. Er beachtete aber nicht, daß, wenn man den gesamten in der Drehbewegung von Erde u. Mond enthaltenen Drehimpuls zusammenrechnet, dieser nicht ausreicht, um eine Materienmenge von der Masse des Mondes aus der schon fertigen Erde herauszureißen.
- c) Die neue Abspaltungs-Hypothese, die sich auf die Erkenntnisse der Mondforschung gründet, geht davon aus, daß die Entstehung der Erde zum Zeitpunkt der Mondabspaltung noch nicht abgeschlossen war. Zwei amerik. Wissenschaftler (John O'KEEFE u. Edward SULLIVAN vom Goddard Space Flight Center der amerikanischen Weltraumbehörde, NASA) haben inzwischen sogar ein mathematisches Modell für die Abtrennung des Mondes vorgelegt. Sie gehen davon aus, daß die Erde - wie auch die anderen Planeten - durch Anlagerung kleinerer Brocken (sogenannter Planetesimale) entstand und das Material durch den Aufprall immer weiterer Brocken beständig aufgeheizt wurde, man nimmt  $2-4000^\circ\text{C}$  an, also sehr dünnflüssig gewesen sein muß. Unter solchen Voraussetzungen führt eine rasche Rotation (im Bereich von 2 Std.) zu einer enormen Abplattung.

Mit neuerlicher Gravitationsenergie, die frei wurde, als die schweren Materialien - besonders das Eisen - zum Erdmittelpunkt absanken und somit den Erdkern bildeten. Damit müßte nach dem amerik. Mondforscher Donald WISE die Mondabspaltung ausgelöst worden sein.

Oder:

Mit zunehmender Abkühlung wird das Material zäher, die Abplattung ging zurück. Winzige Störungen, etwa hervorgerufen durch die Gezeitenkräfte der Sonne, können dabei zu einer solch großen Verformung geführt haben, daß der Urkörper schließlich eine zigarrenähnliche Form annahm, deren Längsachse rund 2,8 x so groß gewesen sein mag wie der heutige Erdradius. Damit liegt der äußere Rand aber jenseits der Rocheschen Grenze - eine Einschnürung und Abtrennung der "Zigarrenspitze" ist unvermeidbar.

Mit dieser Abtrennung geht Drehimpuls verloren, so daß die Rotationsgeschwindigkeit der Erde abnimmt und auch die Abplattung zurückgeht. Abschätzungen ergeben eine neue Rotationsgeschwindigkeit von rund 3,5 Stunden, während die Umlaufzeit des gerade geborenen Mondes in 2,8 Erdradien bei etwa 6,5 Std. liegt. Der Mond war also von Anfang an außerhalb der synchronen Bahn und hat daher, aufgrund der sofort stark einsetzenden Gezeitenwirkung zwischen Erde und Mond, die Erdrotation weiter abgebremst. Dadurch wuchs der Abstand Erde-Mond rasch an.

Das müßte ca. 3 Mill. Jahre nach der Entstehung der Ur-Erde geschehen sein. Der Mond war aber sehr heiß, so heiß, daß er zu sieden begann. Er müßte also eine Atmosphäre aus verdampftem Material entwickelt haben, vor allem aus solchem Material, das bereits bei niedrigen Temperaturen in die Gasphase übergeht, aus den leichtflüchtigen Elementen also.

Das trifft zwar auch für die Erde zu, aber das Schwerfeld der Erde ist natürlich sehr viel stärker als das des Mondes. Die Erde konnte daher ihre heiße Atmosphäre aus verdampftem Material behalten, nicht aber der Mond. Es ist sogar anzunehmen, daß ein Großteil der Mondatmosphäre sofort zur Erde überströmte, wie man das bei engen Doppelsternen beobachten kann.

Ob die Abspaltung nun nach diesem oder jenem Modell wirklich vor sich gegangen ist, werden wir nie erfahren. Wichtig ist aber, diese Modellrechnungen zu beweisen, was durch die Mondforschung geschieht.

Beide Körper sind nach der Trennung verschiedene Entwicklungswege gegangen. Dabei zeigen die heutigen Unterschiede im Erscheinungsbild von Erde u. Mond, daß sich der Erdtrabant - wohl aufgrund seiner kleineren Masse - bei weitem nicht so stark verändert hat wie die Erde.

Auf der Erde sind durch ihre innere Energie tektonische Prozesse über Milliarden von Jahren bis heute in Gang. Die Atmosphäre, Wind und Wasser haben die Erdoberfläche immer wieder umgestaltet. Nirgends ist Gesteinsmaterial im ursprünglichen Zustand. Das älteste Gestein, das wir kennen, ist rund 600-700 Mill. Jahre jünger als die Erde insgesamt. Diese beständige Umwandlung hat auf dem Mond nicht stattgefunden: Sowohl die Mare-Gebiete als auch die Hochländer bestehen aus Basaltgesteinen. Wir können also annehmen, daß der Mond heute noch das Aussehen eines Ur-Planeten hat, eines primitiven, wenig entwickelten Himmelskörpers. So aber dürfte die Erde vor mehr als 4 Milliarden Jahren auch ausgesehen haben - nach ihrer Erkal tung.

Einen sehr interessanten Indizienbeweis für den gemeinsamen Urkörper haben auf Grund des auffallend geringen Gehaltes von Wolfram im Mondgestein Prof. Heinrich WÄNKE vom Max-Planck-Institut für Chemie, Abt. Kosmochemie in Mainz und seine Mitarbeiter erbracht.

Wolfram schmilzt unter irdischen Normalbedingungen bei etwa 3400°C und verdampft bei 5560°C, ist also ein schwerflüchtiges Element. Trotzdem tritt es auf dem Mond im Verhältnis zu anderen schwerflüchtigen Elementen etwa 20 x seltener auf. Das jedenfalls kann man durch den Vergleich mit ursprünglichen Mengenverhältnissen einzelner Elemente erkennen.

Dieses ursprüngliche Mengenverhältnis findet man bei den chondritischen (= aus kleinen Körpern aufgebauten) Meteoriten, die als weitgehend unveränderte Überreste der Brocken angesehen werden, aus denen sich vor mehr als 4,5 Mill. Jahren die Planeten gebildet haben.

Ein vergleichbares Wolfram-Defizit ist im irdischen Krustengestein und in achondritischen Meteoriten zu beobachten - in Meteoriten also, die eine gewisse chemische Differenzierung aufweisen und somit nicht mehr die ursprüngliche Mengenverteilung der Elemente widerspiegeln.

Der auffallend geringe Wolfram-Gehalt in Mond- und Erdkruste wird dadurch erklärt, daß W ein siderophiles (=eisenliebendes) Element ist, sich also weniger in oxidischer Form in Gesteinen bindet und dafür eher in einem metallischen Kern zu finden ist.

Der sogenannte Verteilungskoeffizient für Wolfram hängt von den Umweltbedingungen während der Frühphase eines Himmelskörpers ab, also von der Temperatur, der Zusammensetzung und dem Sauerstoff-Partialdruck. Es zeigte sich, daß der Wolfram-Verteilungskoeffizient für eine vernünftige Temperatur-Annahme (1300°C, nahe der Erstarrungstemperatur von Silikatgestein) bei 53 liegt. Auf die Verhältnisse des Mondes übertragen heißt dies, daß der Erdtrabant einen großen metallischen Kern haben müßte, um das Wolfram-Defizit im Krustengestein "aus eigener Kraft" herbeizuführen. Dieser metallische Kern müßte etwa 26% der Mondmasse in sich vereinen. Bei der Erde entspricht dieser Wert etwa dem Verhältnis von Kernmasse zur Gesamtmasse - beim Mond aber nicht.

Der Kern des Mondes ist aber zu klein; denn der Mond kann nur einen Kern von höchstens 2% seiner Masse haben. Das heißt aber: Dieser - wenn überhaupt vorhandene - winzige metallische Mondkern kann gar nicht genügend Wolfram "mit nach unten" genommen haben, um das Wolfram-Defizit an der Mondoberfläche zu erklären. Dies ist also nur einem Körper der Größe der Erde möglich. Noch andere Gemeinsamkeiten von Mond und Erde könnte man bereits durch die Untersuchungen von Mondgestein feststellen. So haben beide z.B. einen noch unerklärt hohen Gehalt an oxidiertem Nickel und Kobalt sowie eine auffallende Verarmung an Mangan und Chrom.

Auch das von der Temperatur abhängige mengenmäßige Verhältnis verschiedener Sauerstoff-"arten" (sogenannter Isotope) ist bei Mond- und Erdgesteinen nahezu identisch. Durch Wärmefluß-Messungen an 2 Stellen auf dem Mond hat man z.B. auch festgestellt, daß im Mondinneren rund 1/4 der Wärme-Energie vorhanden sein muß, die im Erdinneren zu finden ist. (Schließlich hat der Mond nur  $\approx 1/80$ tel der Erdmasse.) Die Wärme ist hauptsächlich auf den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium zurückzuführen, und so kann man abschätzen, daß der mengenmäßige Anteil dieser Elemente in Mond- u. Erdmantel sehr ähnlich ist. (Bei den Meteoriten herrschen ganz andere mengenmäßige Zusammensetzungen.)

Die von APOLLO 11 mitgebrachten Proben bestanden aus lockerem Mondboden und einzelnen in ihm vorkommenden größeren Gesteinsstücken. Man unterschied 3 Haupttypen analog zu irdischen Gesteinen: lunare Basalte, Anorthosite und Breccien. Die Korngröße der im Dia abgebildeten Mondgesteinsfragmente beträgt 1/4 - 1/2 mm.

Die basaltischen Gesteine haben eine schwarze bis graue Farbe.

Ihre Hauptbestandteile sind

Pyroxene = siliziumhaltige gesteinsbildende Mineralien ( $\text{Mg Si O}_3$ ,  $\text{Ca Si O}_3$ ,  $\text{Fe Si O}_3$ ), meist mittelgrau

ein calciumreicher Feldspat, ein Aluminium-Silikat = Plagioklas ( $0-20\% \text{ NaAlSi}_3\text{O}_8 + 100-80\% \text{ CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ), meist dunkelgrau

und Ilmenit, ein Titan-Eisen-Oxid ( $\text{FeTiO}_3$ ), meist hellgrau

Einige Basalte enthalten auch Glas.

Im Dünnschliff erkennt man auf dem gezeigten Dia das eng ineinander verzahnte Gefüge aus Pyroxen, Plagioklas und Ilmenit, das dem irdischen Basalte oder Diabase ähnlich ist und durch Kristallisation aus flüssigem Magma entstand. Einige lunare Basalte enthalten runde Blasen, ein Anzeichen dafür, daß das Magma flüchtige Bestandteile (Gas?) enthielt und an der Mondoberfläche oder in geringer Tiefe erstarrte.

Irdische Gesteine ähnlicher Zusammensetzung zeigen fast immer verschiedene Zersetzungserscheinungen der Mineralien. Wegen der Abwesenheit von Wasser u. aller Verwitterungseinflüsse auf der Mondoberfläche sind die lunaren Basalte trotz ihres hohen Alters von 3,5 bis 4,5 Milliarden Jahren so frisch, als seien sie eben erst entstanden.

Sehr viele Gesteinsfragmente des Mondbodens sind dunkelgraue verfestigte Trümmergesteine oder Breccien. Die Breccien sind Mondboden, der durch einen meist nur geringen Anteil von Glasmatrix verfestigt ist. Im Dünnschliff (Dia) erkennt man, daß sie aus scharfkantigen Fragmenten von Gesteinen u. Mineralien, Glasbruchstücken u. rotationssymmetrischen Glaskörpern in einer glasigen Grundmasse bestehen. Die Gesteinsfragmente sind vorwiegend Basalte verschiedener Korngröße, seltener helle Anorthosite u. Bruchstücke älterer Breccien. Als Mineralfragmente kommen in der Hauptsache Plagioklas, Pyroxen u. Ilmenit vor. Seltener sind Körner nickelhaltigen Eisens, deren Struktur anzeigt, daß es sich um Bruchstücke von Eisenmeteoriten handelt.

Von besonderem Interesse sind die verschiedenen Glasfragmente und regelmäßig geformten Glaskörper, wie sie fest eingebettet in den Breccien und lose im Mondboden vorkommen. Unter den regelmäßigen Glaskörpern sind Kugelformen am häufigsten. Die größten Kugeln haben  $\phi$  bis zu 2 mm, die kleinsten sind von submikroskopischer Größe. Neben Kugeln kommen längliche Gebilde von etwas ellipsoidischer Gestalt vor und hantelförmige Gebilde mit einer Einschnürung in der Mitte. Alle diese Körper sind rotationssymmetrisch und offenbar aus Tropfen flüssiger Schmelze entstanden, die durch das Vakuum der Mondoberfläche geschleudert wurden. Unter dem Einfluß der Oberflächenspannung nahmen sie ideale Kugelgestalt an, durch Rotationsbewegungen wurden sie zu länglichen und hantelförmigen Gebilden deformiert.

Die regelmäßig geformten Glaskörper und die sehr viel häufigeren unregelmäßigen Glasfragmente haben verschiedene Farben und Lichtbrechung: Braun, Braunrot, Rotgelb bis Hellgelb, violette Farben, sie sind auch grün bis farblos. Wie Analysen mit der Mikrosonde zeigten, entspricht die Zusammensetzung der dunklen Gläser der der Basalte, die der hellen der Anorthosite.

Während Basalte und Anorthosite magmatischer Herkunft sind u. vulkanischen Prozessen an der Mondoberfläche ihre Entstehung verdanken, zeigt eine genauere Untersuchung der Bestandteile des Mondbodens und der Breccien, daß diese Trümmermassen nicht durch endogene (= von innen kommende) vulkanische Kräfte, sondern durch den Aufprall von Meteoriten entstanden, welche auch die vielen Krater der Mareoberflächen erzeugten.

Wenn man die Oberfläche von Mondproben unter dem Mikroskop betrachtet, findet man eine Fülle von winzigen Kratern. Auch diese Krater sind von kleinen Projektilen durch Einschläge erzeugt worden. Solche kleinen Projektilen - von feinem Staub bis zu Millimeter-Körnchen - werden im Labor mit Höchstgeschwindigkeit auf verschiedene Material-Oberflächen geschossen, um Mikrokrater zu imitieren. Auf glatten Silikat-Oberflächen oder auf mit Glas überzogenen Silikaten fand man um viele Krater herum eine weiße Zone. Bei hoher Vergrößerung wurde sichtbar, daß hier Material herausgehoben war. Offenbar entstehen diese "Spallationszonen" nur auf glasigen Oberflächen, aber nicht auf Metallen.

Die auf den Gläsern entstandenen Gebilde sehen den "echten", denen vom Mond, zum Verwechseln ähnlich. Auf einem Dia wird in den oberen Bildern ein 1,2 mm dickes Eisen-Geschoß gezeigt mit 1 km/s auf Fensterglas (das Geschoß steckt noch in der Delle), und eins mit 2,5 km/s auf Quarzglas. In weiteren Bildern ist das Geschoß 4 mm dick, einmal ein Aluminium-Projektil mit 5 km/s auf Quarzglas, bei einem anderen Bild ein Eisenprojektil mit 8 km/s ebenfalls auf Quarzglas.

Bei 1 km/s bleibt nur die Einschlagsdelle zurück. Bei 2 bis 3 km/s entstehen um die Einschlagstelle Risse. Ab 5 km/s wird Material um den Einschlagskrater herum abgesprengt: Es entsteht die Spallationszone, wie man sie bei den Mondproben sieht. Daraus lassen sich jetzt Schlüsse ziehen auf die Projektile des Weltraumes, auf ihre Anzahl, Größe und Geschwindigkeit.

Neben den Auswertungen der Mikrokrater auf den Mondproben wurden dazu auch Experimente im Weltraum gemacht. Meist sind das Sensoren, die den Moment des Einschlags registrieren und zur Erde funken. Außerdem werden die beim Einschlag erzeugten Ionen und Elektronen gemessen.

Bei den Experimenten muß man bei einer Entfernung von der Sonne von 1 AE (Astronomische Einheit) in der Regel jeweils bis zu einer Woche bis zum nächsten Einschlag warten (bei 100 cm<sup>2</sup> Sensorfläche).

Aus diesen Experimenten hat man sehr viel über den Staub im Sonnensystem gelernt. Die kleinsten Teilchen - unter 1 mm  $\varnothing$  - kommen aus Richtung Sonne mit Geschwindigkeiten über 50 km/s.

Eine Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg hat sich mit den Mondkratern befaßt - von den submikroskopisch kleinen bis hin zu den großen Ringgebirgen, wie man sie schon mit einem Feldstecher auf dem Mond sehen kann. Aus statistischen Untersuchungen der Kratergrößen und ihrer Verteilung auf dem Mond haben die Physiker eine Methode entwickelt, das Alter einer Mondgegend zu bestimmen, auch wenn davon nur ein Foto vorliegt. Auf ihm müssen allerdings genug Krater sichtbar sein.

Ein Bild des Vollmonds zeigt auffallend helle und dunkle Gebiete. Beim Blick durch das Fernrohr sieht man, daß die hellen Gebiete, die Hochländer, viel mehr große Krater haben als die dunklen Gebiete, die Mare. Vor den Mondlandungen - und teilweise auch noch später - hat man noch spekuliert, ob die Krater auf irgendwelche vulkanischen Ereignisse zurückgehen. Heute wissen wir, daß alle Krater durch den Einschlag von Meteoriten entstanden sind.

Aus den Beobachtungen kann man nun den Schluß ziehen, daß die hellen Gebiete mit der größeren Kraterzahl einem längeren Bombardement aus dem Weltraum ausgesetzt waren als die dunkleren - daß sie also älter sind. Denn es wäre unsinnig anzunehmen, daß die Projektile die hellen Gebiete des Mondes bevorzugt hätten.

In den Maren hat offenbar ein Oberflächen-Vulkanismus - besser gesagt, ein Oberflächen-Magmatismus - gewirkt: Zu einer späteren Zeit wurde die Kraterlandschaft von Magma überflutet, das von unten her an die Oberfläche kam und die tieferliegenden Landschaften überschwemmte.

Auf den ersten Nahaufnahmen von unbemannten Sonden aus entpuppten sich die scheinbar glatten Mare-Flächen ebenfalls von Kratern übersät, allerdings von viel kleineren als auf den Hochflächen. Die Aussage, daß nur die hellen Mondgegenden voller Krater sind, gilt also in erster Linie nur für die größeren Krater mit Durchmesser ab einigen Kilometern. Mit den kleineren Kratern ist die gesamte Mondoberfläche ziemlich gleichmäßig überdeckt.



Bei vielen Kratern - ab 30 km  $\emptyset$  - ragt genau in der Mitte ein Gebirge aus der runden Ebene heraus, besonders ausgeprägt bei den Kratern Tycho und Kopernikus. Die Entstehung dieses Zentralberges wurde bei Laborexperimenten nachgeahmt, die dabei auch bestätigten, daß die Krater durch Meteoriten-Einschlag entstanden. Auf einem Dia wird der Krater Tycho als typisches Beispiel für die größeren Mondkrater gezeigt. Tycho hat einen Durchmesser von 90 km und genau in der Mitte einen Zentralberg.

Der NASA-Physiker Donald E. GAULT erzeugte in langen Versuchsreihen die unterschiedlichsten Formen von Mondkratern, indem er Millimeter bis Zentimeter große Projektilen auf verschiedenen weichen Oberflächen schoß. Die Explosion einer Pulverladung komprimierte ein Gas, das die Körnchen nach vorn aus der "Leuchtgaskanone" herausschleuderte. GAULT erzeugte so Geschwindigkeiten bis 10 km/s. Mit ähnlichen Geräten wird auch am Ernst-Mach-Institut in Freiburg gearbeitet.

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - bis zu einer Million Bilder pro Sekunde - zeigen beim Aufschlag auf Wasser zunächst die Bildung des Kraterrandes, und anschließend wächst in der Mitte des Einschlages ein zentraler Kegel hoch.

Auch auf dem Mond wird das Material weiter außen zu einem runden Wall aufgeworfen, während das weiter innen liegende durch einen Rückstau in der Mitte aufgetürmt wird. Beim Krater Tsiolkovsky auf der Mondrückseite konnte anhand eines Fotos das Alter der Lavafüllung bestimmt werden: 3,3 Milliarden Jahre. Der Zentralberg zeigt auf dem Dia eine kraterübersäte Fläche, deren Altersbestimmung 3,9 Milliarden Jahre ergab. Das heißt, etwa 600 Millionen Jahre nach der Kraterentstehung drang von unten Lava hoch und überschwemmte den Kraterboden. Für diese neue Oberfläche war damit die "Uhr der Kraterstatistik" auf Null gestellt.

Einer der größten Krater des Mondes liegt auf seiner Rückseite: das etwa mit 1000 km  $\emptyset$  große Mare Orientale. Beim Einschlag des Meteoriten entstand vielleicht eine Art stehender Wellen in der Umgebung, die konzentrische Wälle aufwarfen. Dieses Zwiebelschalenmuster haben nur wenige Riesenkrater.

Auch die Theorie der Altersbestimmung der Mondkrater wurde durch Untersuchungen an Mondproben bestätigt; denn an ihnen läßt sich im Labor exakt das Alter bestimmen, man konnte also die Kraterstatistik eichen, was der Planetologe Gerhard NEUKUM in München getan hat.

So weiß man heute, daß alle Mond-Mare zwischen 3,2 und 3,8 Milliarden Jahre alt sind. Sämtliche Hochländer sind älter als 4 Milliarden Jahre.

Aussagen über die früheste Zeit sind unsicher, denn es ist noch nicht geklärt, wie fest die Mondoberfläche zu dieser Zeit war; denn in einer teigigen Oberfläche bleibt kein Krater erhalten.

Umgekehrt müßte es auch "jüngere" Gebiete geben: Krater wie Kopernikus, Tycho und Aristarch. Hier hilft die Erforschung der Erdoberfläche weiter, denn es gibt auf der Erde Gebiete, wo die Erosion viel geringer ist als anderswo; z.B. auf dem Kanadischen Schild. Hier kann man irdische Meteoritenkrater untersuchen, die in jüngerer Zeit entstanden. Die so erhaltenen Werte kann man wieder auf den Mond übertragen, auf seine letzten Milliarden Jahre.

Nun klafft eine Lücke zwischen 3 und 1 Milliarden Jahre, als ob das Bombardement 2 Milliarden Jahre ausgesetzt hätte. Man vermutet, daß das "1." Bombardement noch von der Bildung des Sonnensystems herrührte, das vor etwa 3 Milliarden Jahren erschöpft war. Nun aber ist vielleicht ein neuer "großer Brocken" durch Kollision mit einem anderen "Mutterkörper" auseinandergebrochen,



die heutigen Asteroiden, und noch kleinere Bröckchen, die Meteoriten sind neu entstanden. Vielleicht häuften sich in einem bestimmten Zeitraum - etwa vor 100 Millionen Jahren - diese Kollisionen.

Meteoriten-Untersuchungen, wobei das Alter durch Messungen des radioaktiven Zerfalls bestimmter Bestandteile bzw. durch die Ermittlung des sogenannten Bestrahlungs-Alters bestimmt wurden, halfen weiter.

Man fand für Eisenmeteorite Werte von einigen Millionen Jahren, bei Steine-  
meteoriten um 10 Millionen.

Mit dieser erweiterten "Krater-Uhr" stellte man bei Tycho ein Alter von etwas über 100 Millionen Jahre und bei Aristarch von 300 Millionen fest. Nur bei Kopernikus klappt die Methode nicht. Er liegt nämlich gerade zwischen dem älteren und dem jüngeren Bombardement. Er könnte 500 Millionen oder 3 Milliarden Jahre alt sein.

Zum Schluß erläutert Frau S c h m i t z zusammenfassend:

Die Artikel weisen noch darauf hin, daß es sehr bedauerlich war, daß SKYLAB nicht zur Erde zurückgeholt werden konnte. Die Platten z.B., die über 6 Jahre mit dem Himmelslabor durch den Weltraum flogen, waren präparierte Flächen verschiedener Art, und man hätte Durchmesser- und Tiefenverhältnisse von Meteoriten-Einschlägen genauestens messen können.

Aus den APOLLO-Ergebnissen hat man gelernt und kann jetzt gezielte Fragen stellen. Zwei Programme, POLO und SELENE, sind von europäischen Mondforschern formuliert worden. Was einst als sinnloses und verschwenderisches Prestige-Unternehmen galt, hat für die Mond- und Planetenforschung reiche Früchte getragen. Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus gesehen war auch die Erforschung des Mondes notwendig, wenn man etwas über die Vergangenheit der Erde in Erfahrung bringen wollte. Sie war aber auch aus wirtschaftlichen Gründen geboten - als experimentelle Vorbereitung für die viel weiterreichende Erkundung der übrigen Planeten. --

Herr K u n e r t dankt Frau S c h m i t z und stellt ihre Ausführungen zur Diskussion.

Die Sitzung endet um 21.35 Uhr.

gez. F r e i t a g      gez. H ä n i g      gez. S c h m i t z

gez. K u n e r t

Die nächste Sitzung der GRUPPE BERLINER MONDBEOBACHTER findet

am Montag, dem 12. November 1979, um 20 Uhr

im Zeiss - Planetarium am Fuße des Insulaners statt.

1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 2680, 26