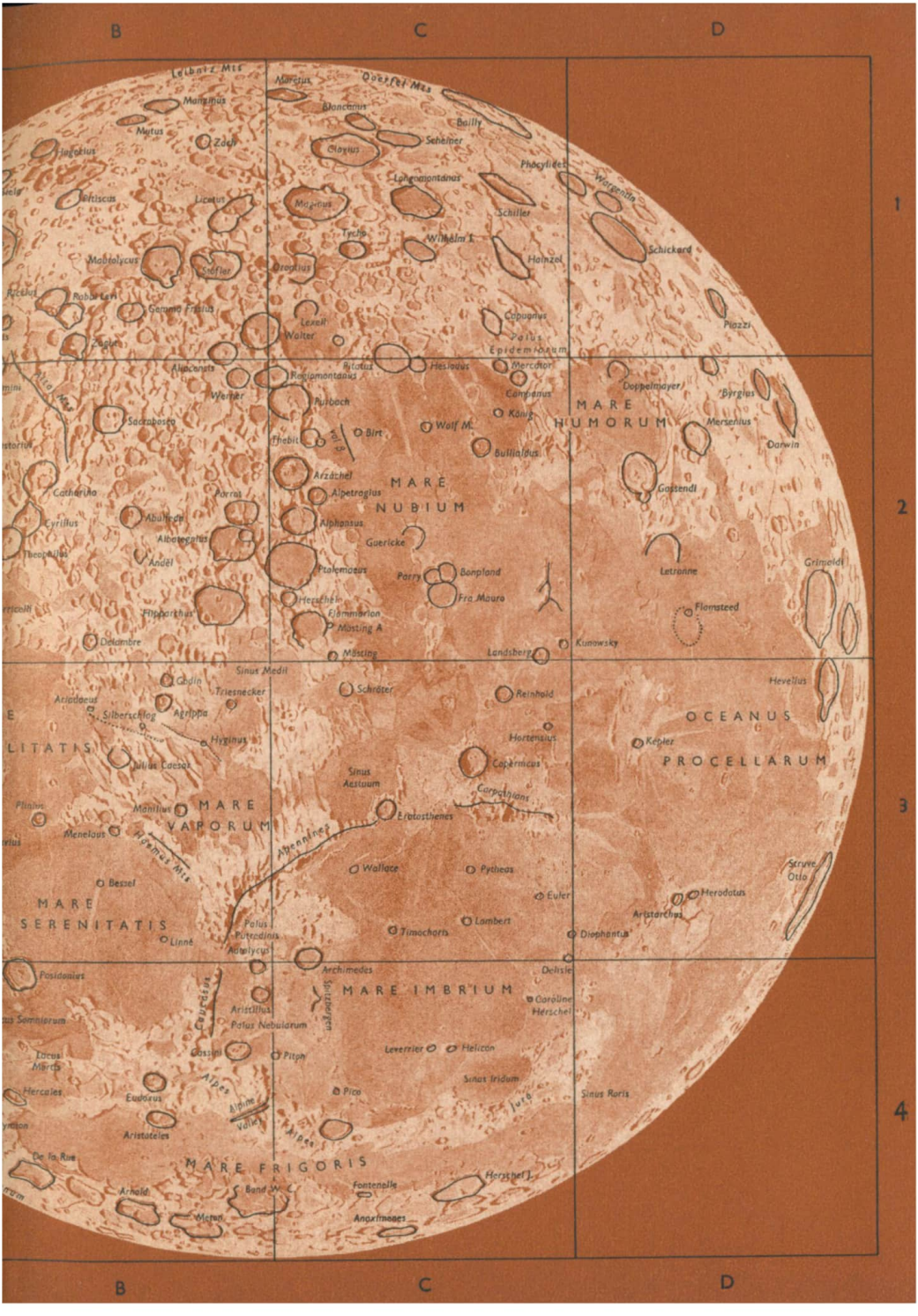


JOSEF SADIL

BLICK-PUNKT MOND



Bereits bei einer 100 fachen Vergrößerung mit einem kleinen Amateurfernrohr verringert sich die mittlere Entfernung des Mondes von etwa 384 000 km auf scheinbar 3840 km, so daß die Mondoberfläche deutlich zu sehen ist. Die Lage der wichtigsten Formationen kann auf unserer Karte mit Hilfe des Verzeichnisses am Schluß des Buches leicht bestimmt werden.


B
C
D
1
2
3
4
Leibnitz Mts
Queriel Mts
Maginus
Moretus
Blancanus
Bailly
Schelner
Cleavius
Phocylides
Wargentin
Schickard
Piazzi
Tycho
Wilhelm I.
Heinzel
Magnus
Longomontanus
Schiller
Clavius
Maskelyne
Lexell
Walter
Capuanus
Palus Epidemiarum
Hesiodus
Mercator
Campanus
Doppelmayer
Byrgius
Mersenius
Darwin
Wolf M.
König
Bullialdus
Birt
Thebit
Arzachel
Alpetragius
Alphonsus
Guericke
Ptolemaeus
Parry
Bonpland
Fra Mauro
Flammarion
Mösting A
Mösting
Landsberg
Kunowsky
Gassendi
Letronne
Grimaldi
Flamsteed
Catharina
Cyrillus
Theophilus
Abulfeda
Albategnius
Anaxagoras
Hipparchus
Delambre
Sinus Medii
Cabeus
Ariadaeus
Silberschlag
Agrippa
Hyginus
Julius Caesar
Manilius
Menelaus
Plinius
Bessel
Linné
Palus Putredinis
Archimedes
Aristillus
Autolycus
Palus Nebularum
Posidonius
Caucasus
Cassini
Pitatus
Alpes
Alpine Valley
Pico
Sinus Iridum
Sinus Roris
Hercules
Eudoxus
Aristoteles
Lacus Mortis
Lacus Somniorum
De la Rue
Arnold
Mare Frigoris
Fontenelle
Herschel
Anaximenes
Mare Imbrium
Caroline Herschel
Dechsle
Mare Serenitatis
Mare Vaporum
Mare Tranquillitatis
Mare Nubium
Mare Humorum
Oceanus Procellarum
Schröter
Reinhold
Hevelius
Kepler
Hortensius
Copernicus
Sinus Aestuum
Carpathians
Eratosthenes
Apennines
Harbinger Mts
Wallace
Pytheas
Euler
Lambert
Timocharis
Diophantus
Herodotus
Aristarchus
Struve
Otto

JOSEF SADIL

BLICKPUNKT MOND

URANIA-VERLAG
LEIPZIG/JENA/BERLIN

Originaltitel: Cíl Měsíc. Orbis. Praha 1960

Deutsch von Max A. Schönwälder

Gekürzte Ausgabe des tschechischen Originals

Lektor: Ewald Oetzel

1. Auflage 1962, 1.–5. Tausend

Alle Rechte vorbehalten

Copyright 1962 by Urania-Verlag, Verlag für populärwissenschaftliche Literatur Leipzig/Jena/Berlin

VLN 212-475/15/62. ES 18 D 1

Schutzumschlag und Einband: Hasso Seyferth

Zeichnungen (nach den Vorlagen des tschechischen Originals): Gerhard Pippig

Gesamtherstellung: H (1) VEB Druckerei der Werktätigen, Halle (Saale)

Printed in the German Democratic Republic

INHALT

VORWORT 7

EIN WENIG VORGESCHICHTE . . 9

DER MOND ALS HIMMELSKÖRPER . 17

Einleitung 17
Nehmen Erde und Mond an Gewicht zu? 18
Die Entfernung des Mondes 19
Die scheinbaren Veränderungen des Monddurchmessers . 22
Größe, Masse und Dichte des Mondes . 25
Die Anziehungskraft auf dem Monde . 27
Die Form des Mondkörpers 28
Die Mondphasen 37
Der Umlauf des Mondes um die Erde . 43
Die Libration des Mondes 47
Die Ungleichmäßigkeit der Mondbewegung 55
Die Umlaufperioden des Mondes 59
Der Einfluß der Anziehungskraft des Mondes auf die Erde 62
Sonnen- und Mondfinsternisse 69

GEOGRAPHIE DES MONDES (SELENOGRAPHIE, SELENODÄSIE UND MONDKARTOGRAPHIE) 77

Eine Welt mit Bergen und Tälern 77
Meere . 81
Krater 89
Berge und Gebirge . 98
Rillen und Täler 105
Helle Streifen und Flecken 110
Karten der Mondoberfläche 115

DIE PHYSIKALISCHEN VERHÄLTNISSE AUF DEM MONDE (SELENOPHYSIK) . 131

Die „Mondkunde" 131
Dichte und wahrscheinliche Zusammensetzung der Mondatmosphäre 132
Die Temperatur auf dem Monde 148
Struktur und Zusammensetzung der Mondoberfläche 157

DIE ENTSTEHUNG DER OBERFLÄCHENFORMATIONEN (SELENOLOGIE). 188

Gibt es eine Universaltheorie? 188
Morphogenetische Analyse der Mondoberfläche . 188
Die Blasenhypothese von Hook, Leitich und Suess 191
Die Vulkanhypothese 193
Die Lakkolithhypothese Tomkins' und die Hypothese Moores 207

Die Gezeitenhypothese von Ebert und Pickering . . 211
Die tektonische Hypothese . 212
Die Meteoritenhypothese . . 220
Die Kompromißidee Quirings . 236
Von Bülows Hypothese . . 242

ALLGEMEINE UND AKTUELLE FRAGEN . 247

Vor der Landung auf dem Monde 247
Veränderungen auf dem Monde 249
Die Entdeckung Kosyrews. 258
Ist auf dem Monde Leben möglich?. . 268
Die Entstehung des Mondes . 273
Ziel Mond . . . 285

Literatur 311
Mondformationen, die auf der Mondkarte von P. Příhoda verzeichnet sind . 316
Topographisches Register . . 327
Personenverzeichnis . 329
Bildquellen . 332

VORWORT

Als ich zu Beginn des Jahres 1953 meinen „Měsíc" (Mond) schrieb, ahnte ich keineswegs, daß das Interesse an diesem uns nächsten kosmischen Körper in wenigen Jahren so zunehmen und daß man auf den ersten Seiten der Tagespresse der ganzen Welt über ihn schreiben würde. Der technische Fortschritt hat uns heute den Mond „auf Reichweite" nahegebracht. Wir haben bereits erfolgreiche Versuche zur Aussendung kosmischer Raketen zum Mond erlebt, und weitere Versuche werden vorbereitet. In unserer Zeit hat der Mond aufgehört, ein unerreichbarer Himmelskörper zu sein, für den sich nur die Astronomen interessieren. Schon in nächster Zeit wird er Gegenstand unmittelbarer Forschung sein. Zuerst werden automatisch arbeitende „Mondsonden" auf seine Oberfläche befördert, und erst nach ihnen betritt der erste Mensch den Mond. Vorläufig allerdings stehen wir noch in den ersten Anfängen dieser neuen Ära zur Erforschung des Mondkörpers...

Die Mondkunde wird sich jetzt in immer schnellerem Tempo entwickeln. Die Leser populärwissenschaftlicher Zeitschriften und auch der Tagespresse werden immer häufiger über den Mond lesen und über die verschiedensten Probleme, die mit seiner Erforschung verbunden sind. Aus diesem Grunde erachte ich es für nützlich, unseren Lesern diese kleine Zusammenfassung unserer gegenwärtigen Kenntnisse über den Mond vorzulegen. Ich hoffe, daß „Blickpunkt Mond" all denen ein wirksamer Helfer sein wird, die sich für aktuelle wissenschaftliche Probleme der Gegenwart interessieren und weitgehend über die neuesten Forschungen und Entdeckungen informiert werden möchten.

Prag 1961

Josef Sadil

Vorsitzender der Sektion „Mond und Planeten"
der Tschechoslowakischen Astronomischen Gesellschaft

„Das Kind entdeckt unter den Himmelskörpern zuerst den Mond", schreibt Professor Dittrich in dem Buch Zrození astronomie (Stará Ďala 1935). „Es schaut nach ihm, wenn es im Kinderwagen gefahren wird... Das Kind entdeckt die Sonne als Himmelskörper um vieles später. Es hört zwar ständig von der Sonne reden... sie ist für das Kind aber vor allem Licht und Wärme, niemals ein Himmelskörper wie der Mond..."

Professor Dittrich hat recht, wenn er sich vorstellt, daß es der ganzen Menschheit einstmals so ähnlich erging und daß der Mond offensichtlich der erste Himmelskörper war, dem systematische Aufmerksamkeit gewidmet wurde und mit dem später auch die ersten primitiven religiösen Vorstellungen verknüpft wurden. Im übrigen muß man nur die Bibel aufschlagen und dort nachlesen, was über die Erschaffung der Welt gesagt wird (Genesis 1, 16):

„Und Gott machte zwei große Lichter: ein groß Licht, das den Tag regiere, und ein klein Licht, das die Nacht regiere, dazu auch Sterne..."

Es ist verständlich, daß der Schreiber hier aus Anschauungen schöpfte, die der Geburt der Astronomie vorausgingen, und daß hier eine Erinnerung an das älteste – wir können sagen „kindliche" – Stadium der Entwicklung der menschlichen Ansicht über die Welt vorliegt, als Sonne und Tag noch zwei völlig getrennte Begriffe waren, zwischen denen keinerlei ursächlicher Zusammenhang gefunden war.

Die Wichtigkeit, die dem Mond bis heute nicht nur von Kindern, sondern auch von vielen primitiven Völkern zugeschrieben wird, entspringt natürlich vor allem dem Umstand, daß der Mond neben der Sonne der einzige kosmische Körper ist, den wir schon mit bloßem Auge deutlich als Scheibe beobachten können. Der am klaren Nachthimmel leuchtende Vollmond stellt mit seiner Erscheinung nicht nur die Sterne, sondern ebenso alle anderen



Sonnenidol aus dem alten Mexiko

Himmelskörper in den Schatten und verleitet unwillkürlich zu der Hypothese von seiner besonderen „übergeordneten" Stellung. Nur der blutrote Ball der untergehenden Sonne, der Beherrscherin des Tages, hat etwas von jenem imposanten Eindruck an sich, den der orangefarbene Ball des aufgehenden Mondes auf uns macht...
Wenn wir den Mond länger beobachten, überzeugen wir uns bald auch von seinen weiteren „außergewöhnlichen" Eigenschaften.

Der Mond bewegt sich, und dabei wechselt er ständig sein Aussehen. Einmal sehen wir ihn am frühen Abend im Westen als schmale Sichel, als „gehörnten" Mond, ein andermal im Süden als halbkreisförmige Scheibe, als erstes Viertel, und ein andermal wieder im Osten als Vollmond. Dann beginnt er abzunehmen; er erscheint immer später am Himmel, bis er eines Tages dem Gesichtskreis entschwindet. Das dauert aber nicht lange, gewöhnlich nur etwa drei Tage, und dann erblicken wir ihn, wenn wir nur ein wenig aufmerken, im Westen als dünne Sichel wieder. Darum sahen schon die ältesten Völker im Mond ein Symbol der Ewigkeit: Der Mond wird geboren und wächst wie der Mensch, und ebenso wie dieser „vergeht" er und stirbt – aber im Gegensatz zum Menschen erscheint er kurze Zeit danach wieder auf der Bildfläche, es kommt zu seiner „Wiedergeburt". Es scheint, daß mit diesem alten Glauben, wie Professor Dittrich meint, die Gewohnheit zusammenhängt, die Toten mit dem Kopf nach Westen zu bestatten.

In zahlreichen urzeitlichen Gräbern wurde der Tote so bestattet, daß er auf der rechten Seite liegt, mit dem Kopf nach Süden, mit den Beinen nach Norden; er „blickt" also in die aufgehende Sonne. Hier haben wir zweifellos einen Zusammenhang mit dem Sonnenkult; die Sonne soll den Verstorbenen auch nach dem Tode Licht und Wärme spenden.

In Gräbern aus ältesten Zeiten begegnen wir aber auch der Orientierung nach Westen. Nach C. Schuchhardt (1935) wurden zum Beispiel in Bayern in den Ofnethöhlen mesolithische Gräber festgestellt, in denen die Schädel in konzentrischen Kreisen so angeordnet waren, daß sie ihre Gesichtspartien dem Westen zukehrten, also dorthin, wo die Sonne zu scheinen aufhört und den Toten nicht mehr „erwärmen" kann. F. Soják (1959) meint darum ebenso wie Professor Dittrich, daß diese und ähnliche Bestattungen mit dem Kopf in westlicher Richtung, dem neuen Mond entgegen, der Hoffnung auf „Auferstehung" Ausdruck geben, daß es sich hierbei also um eine Äußerung eines altertümlichen Mondkultes handelt, mit dem wahrscheinlich auch die uralte Verbindung des Mondes mit

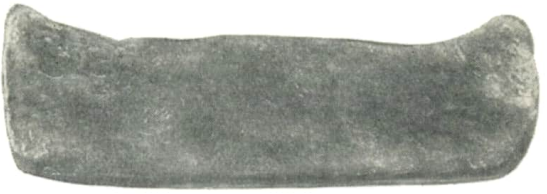


Altägyptisches Relief mit Stieren und Widdern aus Sakkara aus der Zeit der 26. Dynastie (5.—4. Jahrhundert v. u. Z.)

gehörnten Tieren zusammenhängt. Zu dieser Verknüpfung kam es offenbar zuerst irgendwo im Süden, denn dort erscheint die Mondsichel am Himmel grundsätzlich anders als bei uns; sie kann, besonders wenn sie niedrig über dem Horizont steht, die Vorstellung von tierischem Gehörn erwecken. In den religiös-magischen Anschauungen der Primitiven wird von einer besonderen Beziehung zwischen Mond und Zeugungskraft, zwischen Mond und Hornvieh (Stier und Widder gelten als zeugungskräftig) gesprochen. Schon in der Morgendämmerung der menschlichen Zivilisation wird erkannt, daß der Zyklus der „geheimnisvollen" Veränderungen des Mondes am Himmel, die Mondphasen, mit seiner Länge sehr gut auch dem weiblichen Menstruationszyklus entspricht.

Der Mond wurde zweifellos schon in alten, prähistorischen Zeiten als Gottheit verehrt oder wenigstens als allmächtiges, offensichtlich fruchtbares „Naturprinzip". Davon zeugen auch zahlreiche archäologische Funde. So finden wir zum Beispiel in den Ansiedlungen der neolithischen Ackerbauer und der Menschen der späten Jung-

steinzeit, des Äneolithikums (Volutenkeramik, Stichbandkeramik, mährisch-slowakische bemalte Keramik und äneolithische kannelierte Keramik), neben zahlreichen Frauenfigürchen mit betonten Geschlechtsmerkmalen – offensichtlich Göttinnen der Fruchtbarkeit – und zahlreichen Tierfigürchen hauptsächlich Stierköpfe mit mächtigen Hörnern. Auch weibliche Figürchen, deren Köpfe in besonderen Mondausschnitten enden, sogenannte Idole mit Mondköpfchen, sind abgebildet. Der Direktor der archäologischen Abteilung des Nationalmuseums in Prag, Dozent Dr. J. Neustupný



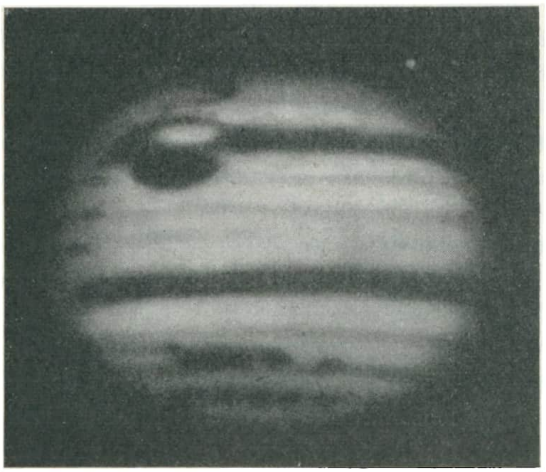
Irdenes „Mondidol" der schlesisch-platenitzer Kultur aus dem 9. Jhdt. v. u. Z.

(1941) ist der Meinung, daß diese besonderen Idole, deren Abbilder auch die markanten mondförmigen Enden an den Henkeln verschiedener, vielleicht kultischer Gefäße aus dieser Zeit (ansa cornuta, lunata) sind, offenbar Bilder des Mondgottes darstellen. Neustupný verweist hier auf eine interessante Analogie – auch wenn er sich der Gefahr eines solchen Vergleiches bewußt ist – mit der altbabylonischen (sumerischen) Göttin der Fruchtbarkeit namens Nana (Ischtar, Astarte), der Tochter der Mondgottheit En-zu (Sin), die im alten Babylon von schwangeren Frauen angerufen wurde...

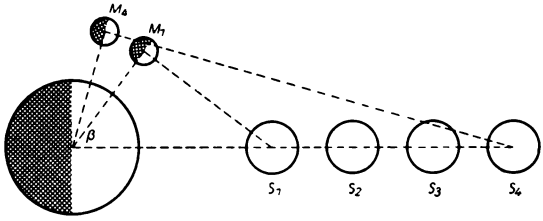
Es ist nicht unsere Aufgabe, die Frage zu lösen, welche Rolle der Mond in den Anfängen menschlicher Religion spielte. Wir wollten nur zeigen, daß er den Menschen schon seit dem Anfang seiner Existenz auf diesem Planeten interessierte und daß wir dem Interesse am Mond und dem Bestreben, seine Aufgabe und Bedeutung in der Welt zu erklären, schon am Beginn menschlicher Zivilisation und Kultur begegnen. Der Mond war von Anfang an für den

Menschen eine gewohnte, ja auch bedeutsame Naturerscheinung, und mit der weiteren Entwicklung der menschlichen Psyche tritt er als Gottheit in sein Bewußtsein ein. Erst nachdem weitere Jahrzehntausende vergangen waren, als der Mensch allmählich wissenschaftlich zu denken lernte, trat der Mond von seinem göttlichen Piedestal ab, wurde er wieder zu einem Himmelskörper, und seine Bedeutung sinkt ständig, je mehr Fakten über das ihn umgebende All entdeckt werden. Wenn der Mond am Beginn der Geschichte der Menschheit gleichwertiger Partner der Sonne war, so zeigt die spätere Zeit immer deutlicher, daß diese Partnerschaft nur eine scheinbare war und auf der Unkenntnis vom tatsächlichen Stand der Dinge beruhte. Soweit bekannt, bewies dies als erster der altgriechische Philosoph Aristarch von Samos (320 bis 250 v. u. Z.), der auf der Grundlage von Erwägungen, die sich auf Beobachtungen stützten, zu dem Schluß kam, daß die Sonne von uns viel weiter entfernt als der Mond und daß darum der tatsächliche Sonnendurchmesser weitaus größer als der Monddurchmesser sein müsse. Aristarch hatte allerdings schon bedeutend reichere Kenntnisse

Der Planet Jupiter. Rechts oben sein größter Mond Ganymed



über das Weltall als irgendeiner seiner Vorgänger und Zeitgenossen, die noch in den Vorstellungen der zahlreichen Religions- und Philosophiesysteme befangen waren. So wußte er schon, daß der Mond nicht mit eigenem Licht strahlt, sondern ebenso wie unsere Erde von der Sonne beleuchtet wird. Damit erläuterte er schon im Geiste der modernen Wissenschaft die Entstehung der Mondphasen. Er wußte auch, daß der Mond um die Erde kreist, und folgerte richtig, daß die Erde selbst sich mit dem Mond um die Sonne bewegt. Er wußte allerdings nicht, wie groß Mond und Sonne in Wirklichkeit und wie weit sie von uns entfernt sind. Während er darüber nachdachte, entdeckte er eine interessante Methode, wie man das feststellen kann.



Bestimmung der relativen Entfernung von Sonne und Mond

Wenn die Sonne (S) in einer unendlichen Entfernung von uns läge, müßte die Winkelentfernung von Sonne und Mond am Himmel (β) zu der Zeit, wenn die Grenze zwischen Licht und Schatten am Mond die Mondscheibe genau halbiert, 90 ° betragen. Je näher uns die Sonne ist, desto kleiner wäre dieser Winkel. Aristarch versuchte diesen Winkel genau zu messen. Er stellte fest, daß er 87 ° betrug. Auf dieser Grundlage rechnete er dann aus, daß die Sonne von uns neunzehnmal weiter entfernt ist als der Mond. Da der scheinbare Durchmesser von Sonne und Mond am Himmelsgewölbe annähernd gleich ist – er beträgt etwa 0,5 ° –, ist es klar, so schloß Aristarch weiter, daß der Sonnendurchmesser ebenfalls etwa neunzehnmal größer als der Durchmesser des Mondes sein muß. Später löste Aristarch auch die Frage, wie groß der Mond tatsächlich ist. Er kam zu dem richtigen Schluß, daß der Monddurchmesser etwa

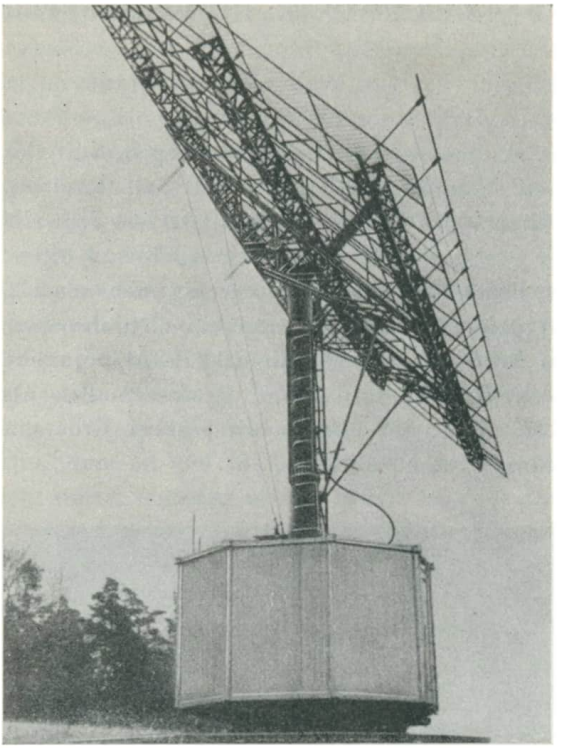
dreimal kleiner als der Erddurchmesser ist. Daraus ergibt sich nach Aristarch, daß die Sonne, die neunzehnmal größer als der Mond ist, in ihrer Größe die Erde nur etwa sechsmal übertrifft. Das ist bedeutend mehr, als vor ihm ein anderer altgriechischer Philosoph, Anaxagoras, annahm, der der Meinung war, die Sonne sei etwa so groß wie die Halbinsel Peloponnes. Die von Aristarch gefundene Methode zur Bestimmung der relativen Entfernung und Größe von Sonne und Mond war richtig; aber genau den Augenblick zu bestimmen, an dem der Terminator – die Grenze zwischen Licht und Schatten – gerade die Mondmitte passiert, ist sehr schwierig. Aristarch maß deshalb im ersten Viertel eine Winkelentfernung zwischen Sonne und Mond von 87 °, obwohl der richtige Wert dieses Winkels nach modernen Messungen 89 ° 51′ 10″ beträgt.
Die Sonne ist von uns in Wirklichkeit mehr als dreihundertneunzigmal weiter entfernt als der Mond, und ihr Durchmesser ist deshalb dreihundertneunzigmal größer als der Monddurchmesser und etwa hundertneunmal größer als der Erddurchmesser.

DER MOND ALS HIMMELSKÖRPER

Einleitung

Wenn Sie heute einem Astronomen die Frage vorlegen, was der Mond ist, wird er Ihnen sicherlich antworten, daß der Mond ein Satellit (Begleiter, Trabant) des Planeten Erde ist. Der irdische Mond ist im Vergleich zur Erde ein keineswegs kleiner Körper. Wenn auch die gesamte Masse des Mondes nur wenig mehr als 1% der Erdmasse ausmacht (genau 0,0123), so kommt sein Durchmesser doch einem Drittel des Erddurchmessers nahe (0,272274). Manche Astronomen fassen deshalb Erde und Mond gewissermaßen als Doppelplaneten auf. Der Mond ist ebenso wie unsere Erde ein Bestandteil des sogenannten Sonnensystems.





Radargerät der Sternwarte in Ondřejov zur Beobachtung von Meteoren

Nehmen Erde und Mond an Gewicht zu?

Wenn auch auf der Erdoberfläche im Tagesdurchschnitt nur etwa 5 bis 6 größere Meteorite mit einem Gesamtgewicht von weniger als 1 Tonne auftreffen, so ist doch die tägliche Gewichtszunahme der Erde, die durch den ununterbrochenen Aufprall von Meteoritenmaterial hervorgerufen wird, ziemlich groß. Zusammen mit den kleinen Meteoren, die heller als 6^m sind[1] – das sind die üblichen mit bloßem Auge noch sichtbaren Sternschnuppen –, beträgt dieser

[1] Helligkeit: siehe Brockhaus ABC der Astronomie. Leipzig 1960, S. 111 ff.

Zuwachs täglich um 1,1 Tonnen. Wenn wir aber auch den feinsten Meteorstaub einkalkulieren, kommen wir zu einem täglichen Zuwachs von 1000 bis 10000 Tonnen. Auf die gesamte Erdoberfläche verteilt, bedeutet das einen jährlichen Zugang von etwa 1 kp auf 1 km^2, also eine ziemlich große Menge. In ähnlicher Weise muß natürlich auch das Gewicht des Mondes ständig zunehmen.

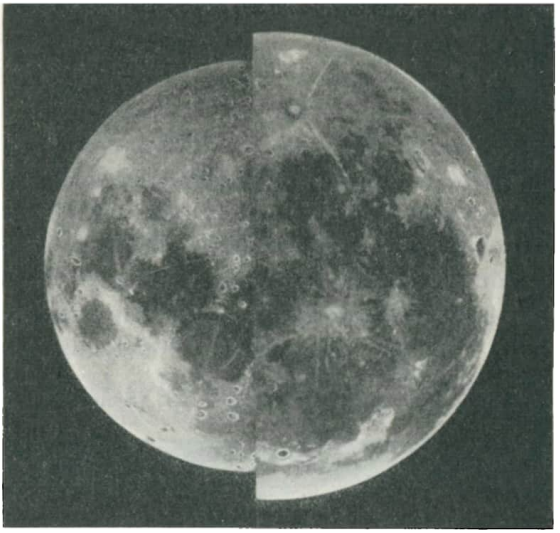
Die Entfernung des Mondes

Aus dem bisher Gesagten geht klar hervor, daß der Mond für uns beständig der nächste kosmische Körper ist. Die mittlere Entfernung des Mondes von der Erde beträgt 384400 km. Wir sagen ausdrücklich mittlere Entfernung, denn die Mondbahn um die Erde ist nicht kreisförmig, sondern hat die Form einer leicht länglichen Ellipse mit einer Exzentrizität von 0,0549, in deren einem Brennpunkt der Mittelpunkt unserer Erde liegt; darum ist die Entfernung des Mondes von der Erde nicht konstant, sondern sie wechselt periodisch. Am nächsten ist uns der Mond im sogenannten Perigäum (Erdnähe). Er ist von uns dann 363300 km entfernt. Befindet er sich dagegen am entgegengesetzten Punkt seiner Bahn, dem sogenannten Apogäum (Erdferne), so beträgt seine Entfernung von uns 405500 km. Durch den Einfluß von Störungen der Mondbahn, die einerseits durch die Anziehungskraft der Erde und andererseits auch durch die der Sonne hervorgerufen werden, besonders durch die Wirkung der sogenannten Evektion und Variation, von denen wir später noch sprechen werden, verändert sich zeitweise die Entfernung des Mondes sowohl im Perigäum als auch im Apogäum. Diese Störungen bewirken, daß sich die Entfernung des Mondes im Perigäum im Laufe eines Vierteljahres um 328 km verändern kann. Demgegenüber ist dieser Einfluß im Apogäum weitaus geringer, nur etwa 31 km.

Bei der Messung der Mondentfernung sind wir heute nicht mehr nur auf astronomische Berechnungen angewiesen. Den gleichen Dienst

erweist uns heute das Messen der Zeit, die notwendig ist, damit von der Erde zum Mond gesandte Funksignale, von der Mondoberfläche reflektiert, wieder auf der Erde eintreffen. Die erste Funkortung oder Funkmessung des Mondes mit Hilfe des Radar führte im Jahre 1946 der Ungar Z. Bay durch; im gleichen Jahre lösten die gleiche Aufgabe Militärfunker der USA (de Witt und Stodola). Die hierdurch gefundene Entfernung des Mondes entsprach dem durch astronomische Beobachtung gewonnenen Wert. Ein besonders interessantes Ergebnis dieser Versuche war die Feststellung, daß das Funkecho vom Mond zu bestimmten Zeiten sehr gut „hörbar" ist, während man es zu anderen Zeiten fast gar nicht wahrnehmen kann. Diese Variationen dauern, wie J. Budějický (1958) anführt, manchmal mehrere Minuten, manchmal auch ganze Tage. Kurzzeitige Variationen gleichen sich den schwankenden Bewegungen an – Libration des Mondkörpers genannt, über die wir noch hören werden –, wodurch sich der Einfallswinkel auf die verschiedenen Einzelformationen der Mondoberfläche ändert. Damit verändern sich die zeitlichen Beziehungen zwischen den von den einzelnen Stellen der Mondoberfläche reflektierten Wellen, was manchmal zu merkwürdiger Verstärkung, manchmal zur Abschwächung führt. Langwährendes Schwanken hat seine Ursache augenscheinlich in der Erdatmosphäre, nämlich in der Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit der hohen Schichten der irdischen Lufthülle.

Infolge der ständigen Veränderungen der Entfernung zwischen Mond und Erde schwankt selbstverständlich ebenso ununterbrochen der scheinbare Durchmesser am Horizont, und zwar zwischen 33,3 und 29,2 Bogenminuten. Daß der tatsächliche Monddurchmesser 3476 km beträgt, geht daraus hervor, daß ein bestimmter Gegenstand auf der Mondoberfläche, der uns bei der Beobachtung von der Erde scheinbar unter dem Gesichtswinkel von einer Bogenminute erscheint, im Perigäum tatsächlich eine Größe von 1,7 km hat, im Apogäum jedoch fast 2 km. Das bedeutet, daß wir im Perigäum auf der Mondoberfläche bedeutend kleinere Einzelheiten als im Apogäum beobachten können, und die erfahrenen Mondbeob-



Scheinbarer Monddurchmesser im Perigäum (rechts) und Apogäum (links)

achter sind sich dieser Tatsache wohl bewußt. Beobachten wir aber den Mond mit bloßem Auge oder mit nur schwach vergrößerndem Fernrohr, so sehen wir im Perigäum allerdings nicht mehr als im Apogäum. Die Schwankung des Monddurchmessers, dessen Wert etwa die Hälfte eines Bogengrades beträgt, ist nämlich an und für sich unbedeutend. Er entspricht etwa dem gleichen Gesichtswinkel, unter dem sich uns ein Zentimeterteilchen eines Lineals aus einer Entfernung von 1,1 m vor unserem Auge zeigt. Im übrigen können Ihnen hier die Photoamateure viel von ihren Erfahrungen erzählen, die sie gesammelt haben, wenn sie den Vollmond mit seinem scheinbar „großen" Durchmesser zu photographieren versuchten. Der Monddurchmesser ist auf dem Negativ eines gewöhnlichen Photoapparates meist kaum ein Millimeter lang. Da der scheinbare Monddurchmesser am Himmel etwa ein halbes Grad beträgt und das menschliche Auge zwei voneinander eine Bogenminute entfernte Punkte zu unterscheiden vermag, bedeutet das,

daß wir mit freiem Auge theoretisch etwa tausend Details auf dem Mond unterscheiden müßten. Wie wir aber aus der Erfahrung wissen, ist dies nicht so.

Die scheinbaren Veränderungen des Monddurchmessers

Viele Leser erinnern sich vielleicht beim Lesen dieser Zeilen der allgemein bekannten Tatsache, daß uns der Mond, wenn er gerade auf- oder untergeht, also dann, wenn er niedrig über dem Horizont steht, um vieles „größer" erscheint, als wenn er direkt über un-

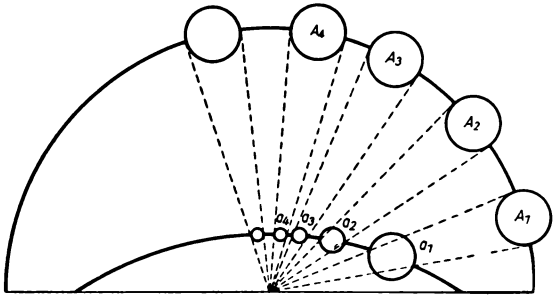
Aufnahme des Mondes am 24. Mai 1957 (Sonneberg/Thür.)



serem Haupte leuchtet. Über diese seltsame Erscheinung dachten schon manche Philosophen und Astronomen des Altertums nach, wie Aristoteles, Ptolemäus und andere, und noch viele Gelehrte des 19. Jahrhunderts vermochten sie nicht einleuchtend zu erklären. Diese merkwürdigen Veränderungen des Monddurchmessers sind aber nur scheinbar, und sie hängen nicht mit der tatsächlichen Veränderung des scheinbaren Monddurchmessers zusammen, der durch die Schwankungen der Entfernung zwischen Mond und Erde bewirkt wird. Davon kann sich übrigens jeder überzeugen. Machen Sie einmal eine Mondaufnahme kurz nach seinem Aufgang, also dann, wenn er Ihnen abnorm groß erscheint, und nehmen Sie ihn noch einmal auf, wenn er schon hoch am Himmel steht. Ich kann Ihnen das Ergebnis voraussagen: Der Mond wird auf diesen beiden Aufnahmen den gleichen Durchmesser haben. Wie ist das möglich?

Wenn wir in freier Natur den Himmel betrachten, so hat er nicht die Form einer Halbkugel, sondern eines flachen Gewölbes. Wir überzeugen uns leicht davon, wenn wir versuchen, mit dem Auge die halbe Entfernung zwischen dem Zenit (Scheitelpunkt) und dem Horizont zu finden, wenn wir den Punkt am Himmel zu bestimmen versuchen, der 45 ° über dem Horizont liegt. Messen wir nämlich dann die Höhe eines so gefundenen Punktes mit einem Winkelmesser, so stellen wir fest, daß seine tatsächliche Höhe nicht 45 °,

Die scheinbaren Veränderungen des Monddurchmessers in der Nähe des Horizonts



sondern nur etwa 22 ° sein wird. Der Beobachter überschätzt gewöhnlich die Höhe eines Gegenstandes über dem Horizont. Wenn zum Beispiel eine Wolke, wie N. N. Kalitin (1952) anführt, in einer Höhe von 5 ° steht, verzeichnet der Beobachter eine Höhe von 13 °; beträgt die Höhe der Wolke 15 °, schätzt der Beobachter 34 ° und so weiter. Aus den gleichen Gründen scheint uns die Sonne in mittleren geographischen Breiten mittags im Zenit zu stehen, auch wenn ihre tatsächliche Höhe über dem Horizont nur etwa 60 ° beträgt.

Stehende große Gegenstände und überhaupt alle Gegenstände, die wir von unten nach oben betrachten, erscheinen uns kürzer als solche, die in horizontaler Richtung postiert sind. Ein gefällter Baum erscheint uns immer länger als der stehende. Außerdem wirkt in horizontaler Richtung die sogenannte Luftperspektive. Die von Nebel verhüllten Gegenstände erscheinen uns weniger beleuchtet und darum entfernter, während in senkrechter Richtung die Luft weitaus durchsichtiger ist. Beim Blick nach oben sieht das Auge gewöhnlich auch keine Gegenstände, während es in horizontaler Richtung ihrer immer eine ganze Anzahl sieht, denn die näheren

Tatsächliche und scheinbare Höhe einzelner Punkte des Himmelsgewölbes
Nach N. N. Kalitin (1952)

Tatsächliche Höhe	Beobachtete Höhe	
	Tageshimmel	Nächtlicher Sternhimmel
5 °	13°	10°
10	25	18
15	34	26
20	42	33
25	50	39
35	60	50
45	67	60
55	74	68
65	79	74
75	84	81
85	88	87

Gegenstände projizieren sich uns auf die weiter entfernten. Daher entsteht der Eindruck einer großen Entfernung des Horizontes und die Vorstellung von einer flachen Himmelskuppel.
Die Beobachtungen erweisen, daß uns der Mond am Horizont wesentlich größer erscheinen kann als in seiner höchsten Lage.

Größe, Masse und Dichte des Mondes

Der Mond hat ungefähr die Form einer festen Kugel mit einem Durchmesser von 3476 km, was etwa 27 %, also nicht ganz ein Drittel des Durchmessers unseres Planeten ausmacht. Demnach ist das Volumen des Mondes etwa 50 mal kleiner als das Volumen der Erde. Die Oberfläche des Mondes mißt 38 254 286 km^2, also nur etwa ein Dreizehntel der Erdoberfläche. Die Mondoberfläche hat also eine Ausdehnung, die mehr als 299 mal größer ist als die Fläche der ČSSR. Demgegenüber ist die Mondmasse etwa 81 mal kleiner als die Erdmasse. Hieraus ergibt sich, daß die durchschnittliche Dichte des Mondkörpers bedeutend niedriger als die Durchschnittsdichte der Erde sein muß. Die Berechnungen ergeben, daß sie 3,33 g/cm^3 beträgt, während die durchschnittliche Erddichte 5,52 g/cm^3 ist. Nach H. C. Urey (1952) kommt das daher, daß dem Mond augenscheinlich der Eisen-Nickel-Kern mit der Dichte von 8 bis 11 g/cm^3 fehlt, der nach übereinstimmender Meinung vieler Astronomen und Geophysiker im Inneren unseres Planeten existiert. Dieser Umstand könnte vielleicht, wie auch B. J. Levin (1957) meint, damit erklärt werden, daß der Mond offenbar zu Beginn seiner Existenz kein Stadium inneren „Umschmelzens" durchgemacht hat, so daß es bei ihm zu keiner Trennung des Nickel-Eisens von den Silikaten kam. Ein solcher Vorgang war aber, so nimmt K. E. Bullen (1955) an, auf der Erde mit einem völligen Verschwinden der leichten Elemente verbunden. Auf der gesamten Oberfläche des Mondes jedoch blieb das Eisen verstreut, wahrscheinlich so, wie das heute in den steinernen Hüllen des Erdkerns



Größenvergleich Erde—Mond

der Fall ist, wo insgesamt etwa 8% metallischen Eisens enthalten sind.

Demgegenüber erklärt W. H. Ramsey (1948, 1949, 1952), der die Existenz eines Eisen-Nickel-Kerns nicht nur im Inneren der Erde, sondern auch im Inneren aller anderen erdähnlichen (terrestrischen) Planeten ablehnt und der die Ansicht verteidigt, daß diese Körper eine im wesentlichen gleichartige (homogene) chemische Zusammensetzung haben, den Unterschied zwischen der Durchschnittsdichte der Erde und des Mondes vor allem durch die verschiedene

Masse dieser beiden Körper. Die Erde hat eine viel größere Masse als der Mond, und aus diesem Grunde herrscht in ihrem Inneren ein bedeutend größerer Druck als im Mondinneren. Dieser Druck zerstört teilweise die normale Molekularstruktur des Materials im Erdinneren, erhöht dessen Dichte und führt es in einen besonderen Zustand über, den wir als metallische Phase bezeichnen. Der kleine Mond hätte dann einen sehr kleinen Kern oder vielleicht gar keinen, und damit ließe sich auch seine verhältnismäßig sehr kleine Durchschnittsdichte erklären.

Die Anziehungskraft auf dem Monde

Da der Mond eine bedeutend geringere Masse besitzt als unsere Erde, ist auch die Anziehungskraft auf dem Monde bedeutend kleiner als auf der Erde. Ein 60 kp schwerer Gegenstand, den man von der Erde auf den Mond bringt, würde dort nur 9,96 kp wiegen, also nur etwa ein Sechstel seines irdischen Gewichtes. Wir müßten ihn allerdings auf einer Federwaage wiegen. Auf einer gewöhnlichen Hebelwaage könnten wir keine Veränderung feststellen, weil nicht nur der Gegenstand, sondern auch die Gewichte auf dem Mond sechsmal leichter wären. Eine kleinere Anziehungskraft hat zur Folge, daß auch alle Gegenstände auf dem Mond, die man herabfallen läßt, mit einer bedeutend geringeren Geschwindigkeit fallen als auf der Erde. In unserer geographischen Breite ($\varphi = 50\,°$) beträgt die Schwere- oder Gravitationsbeschleunigung 981,08 cm · sec^{-2}. Das bedeutet, daß ein frei fallender Körper in unseren Gegenden in der ersten Sekunde eine Geschwindigkeit von 9,81 m/s erreicht und in jeder weiteren Sekunde des Falles um 9,81 m/s mehr. Die in der Fallzeit t zurückgelegte Strecke s berechnen wir nach der Gleichung

$$s = \frac{g \cdot t^2}{2}$$

In 1 Sekunde legt der Körper einen Weg von 4,91 m zurück, nach 2 Sekunden 19,62 m, nach 3 Sekunden 44,15 m usw. Auf dem Mond beträgt demgegenüber die Fallbeschleunigung nur 1,63 $m \cdot sec^{-2}$. Das bedeutet, daß ein frei fallender Körper auf dem Mond nach der ersten Sekunde nur eine Strecke von 0,82 m zurückgelegt hat, nach 2 Sekunden 3,26 m und nach 3 Sekunden 7,34 m. Ein Fall aus einer Höhe von 32 m auf dem Mond gleicht in seiner Wirkung einem Fall auf der Erde aus einer Höhe von fast 5 m.

Auch die Entweich- oder parabolische Geschwindigkeit, die zur endgültigen Überwindung der Anziehungskraft erforderlich ist, ist auf dem Mond bedeutend geringer als auf der Erde. Bei uns beträgt sie 11,2 km/s, während sie auf dem Mond nur 2,3 km/s beträgt. Ein Körper, dem wir diese Geschwindigkeit verleihen würden, verließe endgültig die Mondoberfläche und entfernte sich auf einer parabolischen Bahn in den Raum. Hieraus ist zu sehen, daß die Astronauten auf dem Mond in Zukunft eine relativ leichte Aufgabe zu lösen haben, wenn sie zur Erde zurückkehren oder vom Mond aus weitere Flüge in den interplanetaren Raum unternehmen wollen. Und nicht nur die Astronauten, sondern auch die Sportler werden auf dem Mond zu ihrem Recht kommen. Setzen wir voraus, daß der Schwerpunkt beim Menschen durchschnittlich in einer Höhe von etwa 0,9 m über der Erde liegt und ein bestimmter Mensch (Sportler) auf der Erde fähig ist, diesen Schwerpunkt mit Hilfe seiner eigenen Muskeln auf die doppelte Höhe zu heben, also bis zu dessen doppelter Höhe zu springen (0,9 m + 0,9 m = 1,8 m). Auf dem Mond würde die Leistung desselben Sportlers $6 \cdot 0{,}9$ m + 0,9 m = 6,3 m betragen.

Die Form des Mondkörpers

Auch wenn es uns im ersten Moment erscheint, daß das Profil des Mondes am Himmel genau kreisförmig ist und der Mond dementsprechend die ideale Form einer Kugel hat, zeigen uns nähere Un-

tersuchungen dieser Frage doch deutlich, daß dem nicht so ist. Zum Beispiel geht schon aus älteren Beobachtungen Hartwigs, Banachiewiczs, Jakowkins und Belkowitschs hervor, daß der Halbmesser der Krümmung des östlichen Mondrandes um 0″, 14 ± 0,03 größer als der des westlichen ist oder daß der Mondball in einem bestimmten Maße unsymmetrisch ist (Asymmetrie des Mondes). Moderne geodätische oder besser selenodätische Messungen zeigen, daß der Mond genaugenommen keine Kugel ist, sondern ein Körper von ziemlich unregelmäßiger Form – weitaus unregelmäßiger als unsere Erde –, und zwar ohne Berücksichtigung der „kleinen" Unebenheiten der Mondoberfläche, die durch jedes übliche Fernrohr beobachtet werden können (Krater, Gebirge, Mulden, „Meere" und ähnliches).

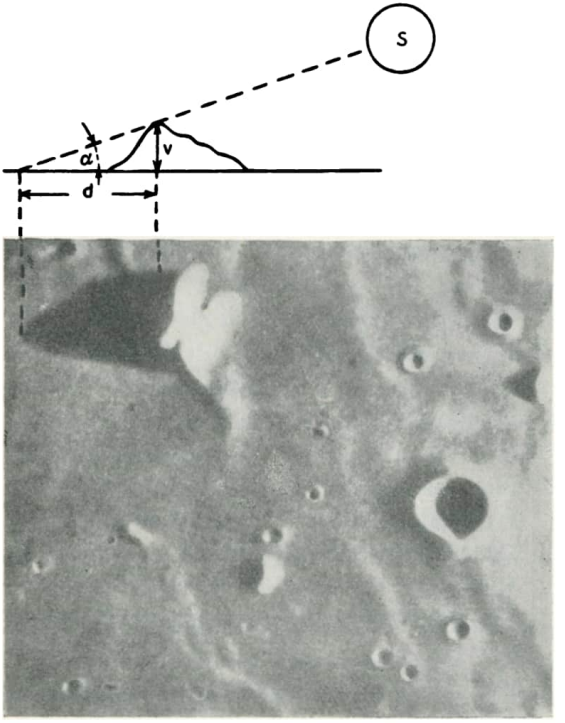
Die Grundfrage der selenodätischen wie auch der geodätischen

Form und Größe von Erde und Mond

	Erde	Mond
Äquatordurchmesser (a)	12755776 m	3473340 m
Poldurchmesser (b)	12713823,8 m	
Relative Abplattung $\left(\frac{a-b}{a}\right)$	1 : 275	
Absolute Abplattung ($a - b$)	42952,2 m	
Äquatorquadrant (Viertelkreis)	10019148,44 m	2728309 m
Meridianquadrant	10002288,29 m	
Äquatorgrad	111323,87 m	30315 m
Mittlerer Meridiangrad	111136,54 m	
Oberfläche	510100933,5 km²	38665580 km²
Volumen	1083319780000 km³	21991391334 km³
Masse	$5{,}97 \cdot 10^{21}$ (5970 Trillionen) Tonnen	$7{,}3 \cdot 10^{19}$ (73 Trillionen) Tonnen

Messungen ist die Vermessung der relativen und absoluten Höhen verschiedenster Stellen auf der Mondoberfläche. Menschen, die von der Astronomie nur wenig wissen, halten es oft für rätselhaft, wie man die Höhe eines Berges auf dem Mond messen kann, ohne zu diesem Zweck die Erdoberfläche zu verlassen. Und darum halten sie diese Messungen für bloße Vermutungen. Wir dürfen nicht vergessen, daß wir auch auf der Erde Höhen und Entfernungen kaum direkt, sondern indirekt messen, wie das fast täglich in der Natur und in den Städten die Ingenieure der Landvermessung tun. Auf der Abbildung ist in vereinfachter und gekürzter Form die Methode dargestellt, mit der man die Höhe bestimmter Mondberge messen

Höhenmessung der Mondberge



kann. Der auf dem Bilde dargestellte Berggipfel wird von rechts durch die Sonne (S) beleuchtet und wirft deshalb nach links einen langen, dunklen Schatten, der für unser Auge auf der anschließenden Mondebene erscheint. Stellen wir uns an dieser Stelle ein rechtwinkliges Dreieck vor, dessen einer Schenkel die maximale Höhe des Berges (v) und dessen zweiter Schenkel die Länge des vom Berg geworfenen Schattens (d) bildet, dann kann man die gesuchte Höhe v des Berges, also die Länge des anliegenden Schenkels des rechtwinkligen Dreiecks, sehr leicht ausrechnen, wenn wir die Länge des zweiten Schenkels, das heißt die Schattenlänge d und den anliegenden Winkel α kennen. Es genügt, wenn wir hierzu die ganz einfache trigonometrische Formel verwenden, nach der eine Kathete eines rechtwinkligen Dreiecks gleich ist der zweiten Kathete desselben Dreiecks mal dem Tangens des der ersten Kathete gegenüberliegenden Winkels, oder

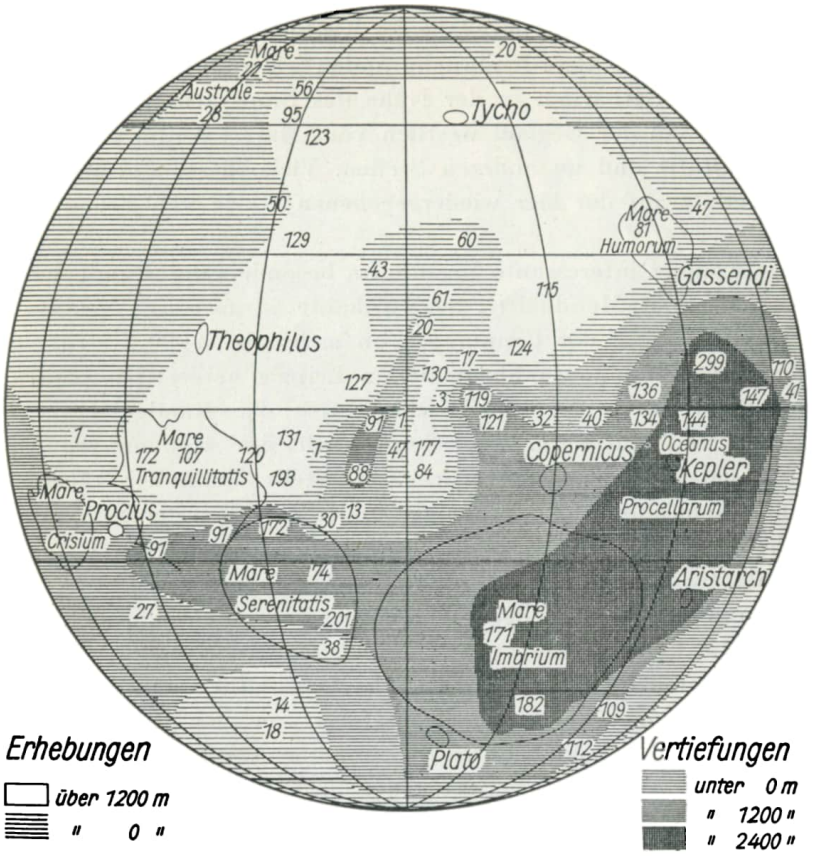
$$v = d \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Die Länge des Schattens messen wir also mit dem Okularmikrometer. Wir dürfen sie allerdings nicht vom Fuß des Berges an messen, sondern von der gedachten Senkrechten durch den Gipfel, dessen relative Höhe über dem umgebenden Niveau wir feststellen wollen. Der Winkel α entspricht, wie wir aus der Abbildung ersehen, der gegenwärtigen Winkelhöhe der Sonne über dieser Gegend der Mondoberfläche. Weil die Winkelhöhe der Sonne an einer bestimmten Stelle der Mondoberfläche gleich der Winkelentfernung dieser Stelle vom Mondterminator ist, können wir auch den Wert des Winkels α verhältnismäßig leicht feststellen. Mit der beschriebenen Methode wurde die Höhe vieler tausend Punkte der Mondoberfläche vermessen. Man stellte fest, daß die Höhe der Berge auf dem Mond der Höhe der höchsten irdischen Gebirge gleichkommt. So messen zum Beispiel die höchsten Gipfel der Apenninen auf dem Mond nach Ph. Fauth (1936) 4615 m (Mt. Hadley), 4870 m (Mt. Bradley) und 5500 m (Mt. Huygens); die höchsten Gipfel der Alpen auf dem Mond sind 3600 m und 4200 m; das Altai-Gebirge

4045 m. Als höchste Punkte der Mondoberfläche werden einerseits einige Gipfel des Leibnizgebirges (Leibniz Mts.) und des Doerfelgebirges (Doerfel Mts.) in der Nähe des Südpols am Mond angegeben, andererseits einer der Gipfel am südöstlichen Hang des Kraters Curtius, dessen Höhe nach Fauth 8740 m beträgt.

Auf dem Mond fehlt aber eine entsprechende ebene Fläche, wie sie auf der Erde die Oberfläche einiger Meere darstellt. Darum kann man die angegebenen Höhen der verschiedenen Punkte der Mondoberfläche nicht als absolute Höhen auffassen, die man gegenseitig vergleichen kann, wie die verschiedenen absoluten Höhen auf der Erde, sondern nur als relative, das heißt als Höhen in bezug auf bestimmte Punkte der Umgebung. Die Abbildung zeigt verschiedene „Ebenen" auf der Mondoberfläche nach den Messungen von J. Franz (1906). Franz wählte als „Nullebene" die durchschnittliche Höhe der Gegend um den Nord- und Südpol des Mondes. Gegenden, die tiefer als diese Ebene liegen, sind auf der Karte von Franz stufenweise dichter schraffiert. Wir stellen fest, daß das relativ tiefste Niveau am Mond die Gegend des östlichen Teiles des Oceanus Procellarum und Mare Imbrium aufweist, die im Durchschnitt mehr als 1600 m unter der Nullebene der Mondpole liegen. Die höchstgelegenen Gegenden auf dem Mond finden wir annähernd um die Mondmitte (weiße freie Stellen auf der Karte). Diese Gegenden liegen im Durchschnitt in einer Höhe von mehr als 1200 m über der genannten Nullebene.

In neuerer Zeit veröffentlichte H. Ritter (1934) eine neue hypsometrische Mondkarte, die in vieler Beziehung die alten Messungen Franz' ergänzt und präzisiert. Die Karte gibt positive und negative Abweichungen der einzelnen Stellen der Mondoberfläche von der sogenannten mittleren Mondkugel an, einer Analogie zum irdischen Rotationsellipsoid. Die extremen Abweichungen erreichen 0,0097 bis −0,008 mittlere Mondhalbmesser oder 16,9 und −13,9 km. Die Rittersche Karte zeigt uns also etwa folgende charakteristische Besonderheit der Mondoberfläche: Der südwestliche, sehr gebirgige Quadrant des Mondes liegt vollkommen über der mittleren Kugel,



Höhenschichtenkarte des Mondes nach J. Franz

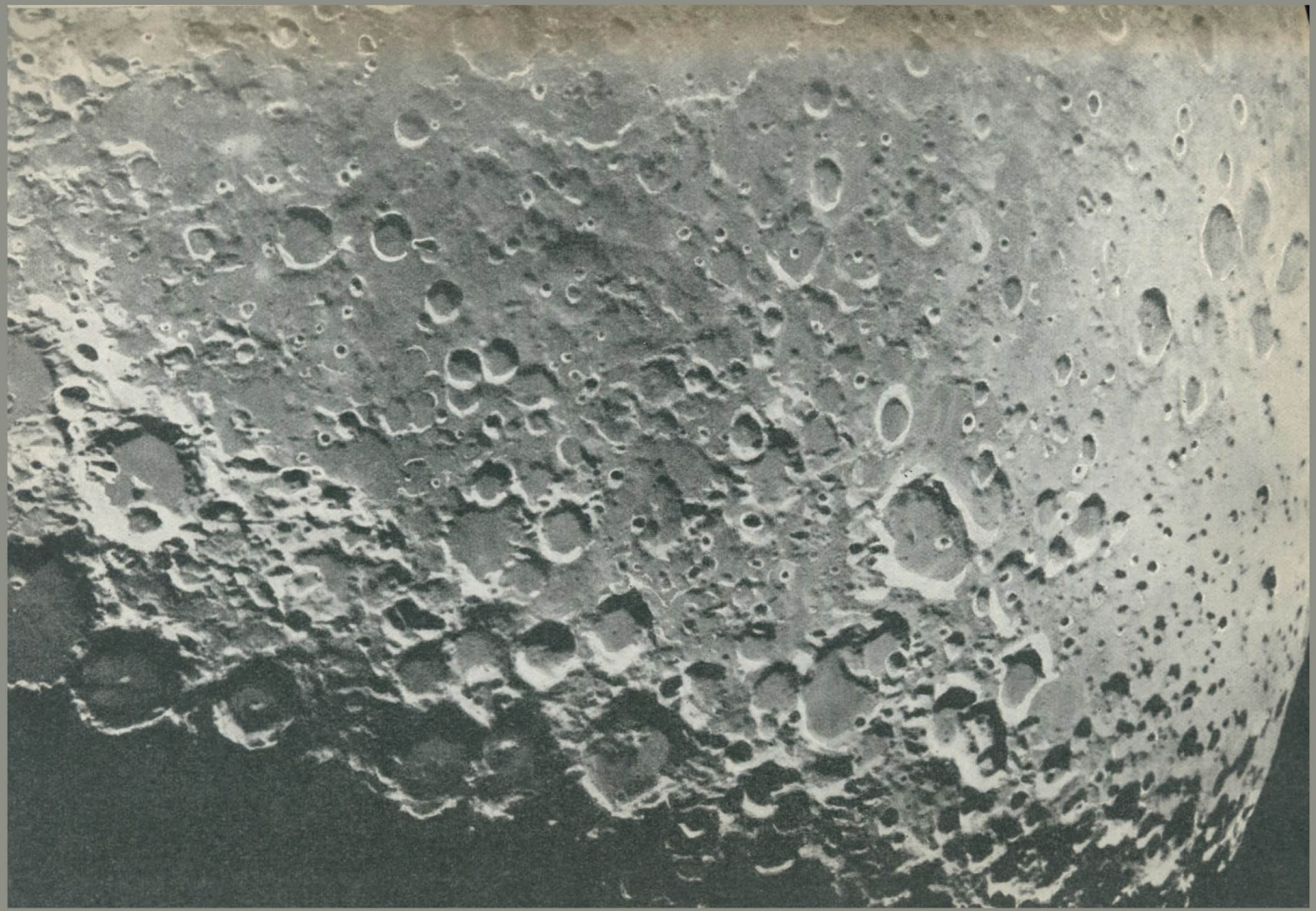
dagegen liegt der nordöstliche Quadrant völlig unter dem Niveau der mittleren Kugel. Auch der nordöstliche Mondquadrant zeigt eine überwiegend negative Höhe. Die Null-Isohypse (eine Linie, die die Punkte mit der Höhe Null verbindet) verläuft etwa in folgender Richtung (beim Krater Grimaldi am östlichen Mondrand beginnend): Landsberg – Ukert – Apenninen – Kaukasus – Posidonius – Hahn. Auffallende und einzeln isolierte Erhebungen finden wir zum Beispiel südlich der Apenninen, im Mare Serenitatis und

Mare Tranquillitatis, in der Nähe der Krater Clavius, Gassendi und anderer. Einzelne tiefe Einbrüche finden wir zum Beispiel östlich des Kraters Catharina, in der Nähe des Sinus Iridum, im Mare Serenitatis, in der Gegend westlich vom Mare Crisium und Mare Foecunditatis und an anderen Stellen. Viele dieser Formationen sind bereits auf der hier wiedergegebenen Karte von Franz dargestellt...

Nicht weniger interessante Messungen, besonders der Randgebiete der sichtbaren Mondhälfte, verwirklichte in neuerer Zeit auch F. Hayn, der auf der Grundlage von mehr als 12000 Messungen anhand von Mondaufnahmen, die in Leipzig hergestellt wurden, eine differenzierte hypsometrische Karte der Randgebiete des Mondes veröffentlichte. Die Genauigkeit der Höhenmessungen Hayns beträgt ± 400 m. Es wurde festgestellt, daß in der Nähe des Mondsüdpoles und auch an einigen anderen Stellen der Mondoberfläche ausgedehnte Gebirgsgürtel existieren, die stellenweise eine gleichlaufende Richtung aufweisen (etwa wie in Deutschland der Schwarzwald und die Vogesen). Sie erreichen eine Höhe von 6000 bis 8000 m. Hayns Messungen zeigen weiter, daß an den Mondrändern ziemlich ausgedehnte Hochflächen und Tiefebenen liegen, die sich auf einer Fläche von Tausenden von Quadratkilometern ausdehnen und bis zu mehreren Kilometern unter oder über der „mittleren Ebene" liegen. Dagegen kann man auf Hayns Karten nicht einen einzigen Krater und keine andere Einzelheit erkennen, die aus teleskopischen Beobachtungen bekannt sind. Die Krater, die bei der Beobachtung mit dem Fernrohr oder auf Photographien so auffallen, haben nämlich eine zu unerhebliche Höhe ihrer Hänge aufzuweisen und ebenso auch eine viel zu geringe Tiefe, als daß sie in der gesamten Morphologie der Oberfläche des Erdtrabanten eine größere Rolle spielen könnten.

Ritters Messungen der absoluten Höhe der Mondgegenden, die in

Der Südteil des Mondes mit seiner eindrucksvollen Krater„landschaft" (im umkehrenden astronomischen Fernrohr ist der Süden oben) ▶



der Nähe der Mitte der sichtbaren Mondhalbkugel liegen, wiederholte in neuester Zeit J. Hopmann (siehe Tabelle auf Seite 36), der die absolute Höhe – bezogen auf die mittlere Mondkugel – von etwa 100 Punkten auf dem Mond bestimmte. Die höchsten absoluten Erhebungen – bis zu 10000 m – stellte er im südwestlichen Quadranten des Mondes, die größte Tiefe im nordöstlichen Quadranten – bis zu 6000 m unter der mittleren Mondkugel – fest.

Die Mondoberfläche ist demnach völlig unregelmäßig und setzt sich aus ausgedehnten Hoch- und Tiefebenen zusammen, aus denen die sichtbaren Mondkrater und andere Oberflächenformationen nur als Sekundärerscheinungen aufsteigen. Die bekannten „Mondmeere" liegen nach Hopmann im Durchschnitt nicht tiefer als die „Kontinente". Manche davon scheinen stark geneigte Flächen zu sein, so daß man sie kaum als Orte ansehen kann, die von erstarrten Magmamassen ausgeglichen wurden (J. Hopmann 1952).

Nach F. Hayn (1923) hat der Mond ähnlich wie unsere Erde die Form eines dreiachsigen Ellipsoides. Der sichtbare Pol der großen Achse liegt demnach im südwestlichen Quadranten des Mondes, in der Nähe des Kraters Alphonsus. Der Pol der kleinen Achse liegt in der Nähe des nördlichen Mondpoles, in der Nähe des Kraters Pythagoras. Aus Hayns Messungen geht weiter hervor, daß die große Achse des Mondellipsoides um etwa 6,8 km länger, die kleine

Abweichung einiger Punkte auf der Mondoberfläche von der mittleren Mondkugel
Nach J. Hopmann (1952)

Punkt (Krater)	Abweichung in km	Punkt (Krater)	Abweichung in km
Aristarchus	3,0	W. C. Bond B	—2,1
Gassendi A	6,3	Triesnecker	7,3
Kepler	5,6	Hyginus	3,5
Landsberg A	9,2	Linné	3,1
Pythagoras A	—6,6	Eudoxus A	5,7
Lambert	5,9	Bessel	6,1
Mösting	8,2	Thales	—2,8
Thebit A	5,0	Proclus	7,1
Alphonsus A	9,1	Taruntius	—0,5

Achse um etwa 5 km kürzer als der mittlere Monddurchmesser ist. J. Hopmann nennt an Stelle dieser Zahlen 7,3 km und 5,6 km.
Der Mond hat also nicht Kugelform, sondern – bildhaft ausgedrückt – leichte Eiform, wobei seine längere Achse zur Erde weist. Auf diese Tatsache werden wir noch einmal zurückkommen, wenn wir über die Mondlibration sprechen. Der genannten „Ausbauchung" des Mondes in Richtung zur Erde wird eine besondere kosmogonische Bedeutung beigemessen. Viele Forscher halten sie nämlich für ein Ergebnis der Gravitations- (Gezeiten-) Wirkung unserer Erde auf den Mondkörper zu einer Zeit, als die Masse des Mondes noch plastisch war und der Mond unseren Planeten in bedeutend größerer Nähe umkreiste, als das heute der Fall ist. Nach Hopmann (1952) und K. Koziel (1948) widersprechen aber diese Meinungen sowohl den gemessenen selenodätischen Werten als auch der Dynamik der Mondumdrehung (vergleiche Näheres auf Seite 276). Hopmann hält übrigens die Existenz dieser beschriebenen Ausbuchtung des Mondes in Erdrichtung selbst für recht problematisch. Man muß sich darüber nicht wundern, sagt Hopmann, daß der Schwerpunkt des Mondes, wie auch durch Positionsmessungen festgestellt wurde, etwa 500 m südlich vom geometrischen Mondmittelpunkt liegt. Wenn die tatsächliche Form des Mondes so unregelmäßig ist, wie das die selenodätischen Messungen ergaben, kann man auch nichts anderes erwarten; dieser Tatsache kann man dann auch keine besondere kosmogonische Bedeutung in bezug auf die Erde beimessen. Der Mond hatte offensichtlich schon zu Beginn seiner Existenz die heutige Form, und die Gravitationswirkung der Erde hat an ihm gar nichts verändert.

Die Mondphasen

Die periodischen Veränderungen des Aussehens des Mondes am Himmel, der sogenannte Phasenwechsel, waren noch zu Beginn unserer Zeitrechnung für viele Gebildete ein ungelöstes Rätsel. So



Mondphasen

gibt es zum Beispiel im Werk des römischen Dichterphilosophen Titus Lucretius „De rerum natura" (Von der Natur der Dinge) aus dem Jahre 55 v. u. Z. insgesamt drei „mögliche" Auslegungen für die Entstehung der Mondphasen:

Nach der ersten wird der helle und kreisrunde Mondball periodisch von einem dunklen Trabanten beschattet. Wenn der Mond völlig verdeckt ist, ist Neumond. Zu dieser Zeit sehen wir den Mond am Himmel überhaupt nicht. Dann beginnt der dunkle Trabant den Mond langsam wieder zu enthüllen. Zuerst sehen wir eine schmale Sichel, und schließlich, wenn der Mond wieder völlig „enthüllt" ist, können wir ihn als Vollmond am Himmel betrachten.

Man stellt fest, daß Lucretius die tatsächliche Form der Mondsichel niemals näher studierte und daß er dem gleichen Irrtum unterlag, dem auch heute noch sehr häufig Maler unterliegen, die die Mondsichel mit Hilfe zweier sich gegenseitig durchdringender Kreise zu konstruieren versuchen. Ein solches Beginnen ist aber im voraus zum Mißlingen verurteilt, weil die Innenseite der Mondsichel nicht der Teil eines Kreises, sondern der einer Ellipse ist. Die Grenze von Licht und Schatten auf dem Mond – der Mondterminator – hat zwar tatsächlich die Form eines Kreises oder, besser gesagt, Halbkreises. Da wir von der Erde aus aber nur eine

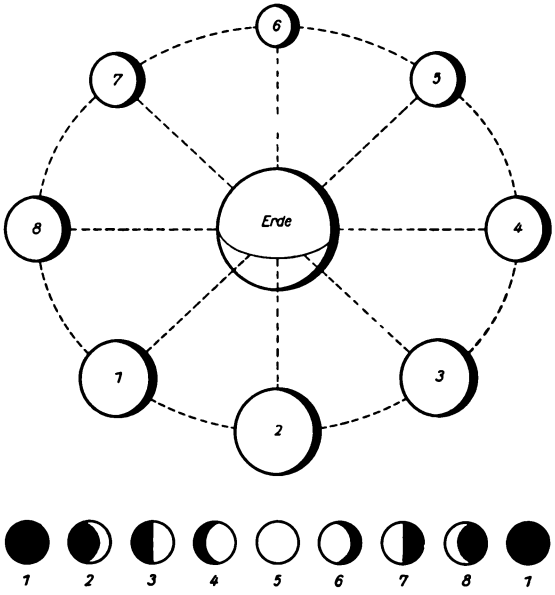
Hälfte des Mondes sehen und demnach auch nur eine Hälfte des Mondterminators und da der Mond eine Kugel ist, kommt es hier zu einer perspektivischen Verzeichnung der tatsächlichen Form des Terminators. Er erscheint uns deshalb von der Erde aus als Halbellipse, die um so länger ist, je mehr sich der Terminator der Mitte der sichtbaren Mondhälfte nähert.

Nach der zweiten von Lucretius angeführten Hypothese ist der Mond eine aus einer hellen und einer dunklen Hälfte bestehende Kugel, die sich gegen uns dreht. Es ist interessant, daß wir den ersten Spuren dieser Auslegung schon im alten Babylon begegnen.

Nach der dritten Version ist eigentlich der ganze Mond dunkel, und die „helle" Mondhälfte entsteht nur durch Beleuchtung durch die ferne Sonne.

Heute muß man wohl nicht mehr besonders betonen, daß es gerade diese dritte von Lucretius angeführte Vermutung war, die schließlich von der modernen Wissenschaft als allein richtige Erklärung der Entstehung der Mondphasen akzeptiert wurde.

Der Mond hat kein eigenes Licht, wie zum Beispiel die Sonne oder die Sterne, sondern er scheint nur, ebenso wie die übrigen Planeten und ihre Trabanten, durch die Reflexion des Sonnenlichtes. Die Sonne kann, ähnlich wie das bei unserer Erde ist, gleichzeitig nur eine Hälfte des Mondes beleuchten, so daß jene Hälfte, die gerade der Sonne zugewendet ist, Tag hat, während die andere Hälfte des Mondes dunkel ist und Nacht hat. Beim Umlauf des Mondes um die Erde verändert sich ständig der Winkel, den die Sehstrahlen Erde-Mond und Erde-Sonne einschließen, und demgemäß wendet uns der Mond in den verschiedenen Lagen seiner Bahn verschieden große Teile seiner von der Sonne gerade beleuchteten Hälfte zu. Wenn sich der Mond gerade zwischen Erde und Sonne befindet (also mit der Sonne in der sogenannten Konjunktion steht), wie uns auf der Abbildung die Lage 1 (Phasenwinkel 180 °) angibt, dann ist seine von der Sonne beschienene Hälfte von uns abgekehrt, so daß wir den Mond zu dieser Zeit am Himmel überhaupt nicht sehen.



Entstehung der Mondphasen

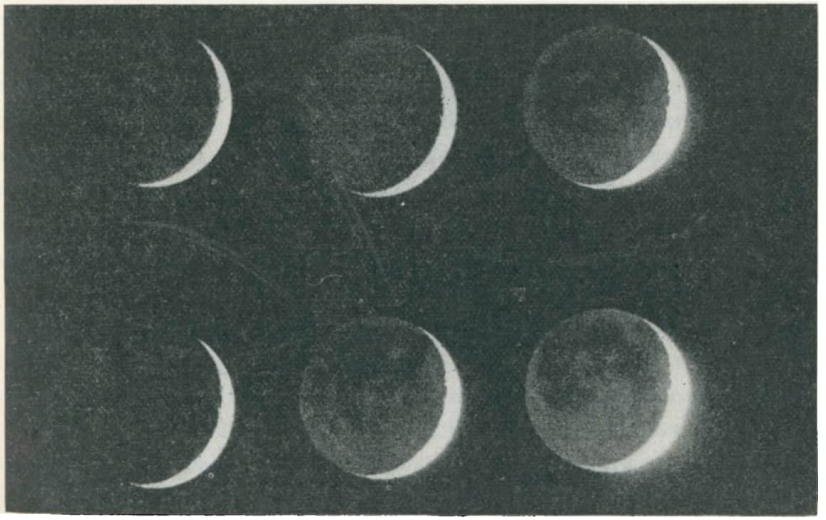
Diese Phase nennen wir neuer Mond oder Neumond und bezeichnen sie im Kalender mit ●.

In den auf den Neumond folgenden Tagen setzt der Mond seine Bahn um die Erde fort und entfernt sich damit von der Sonne, enthüllt uns aber immer stärker seine von der Sonne gerade beleuchtete Hälfte und bekommt damit für uns die Form einer leuchtenden, sich immer stärker füllenden Sichel. In dem Augenblick, in dem die Sehstrahlen Erde-Mond und Erde-Sonne annähernd einen Winkel von 90 ° einschließen (Phasenwinkel 90 °) – auf der Abbildung Lage 3 –, wächst der Mond gerade auf die Hälfte an. Um diese Zeit befindet sich der Mond etwa 90 ° östlich der Sonne: Er ist mit der Sonne in der östlichen Quadratur. Beleuchtet ist die westliche, das heißt die rechte Hälfte des Mondes. Diese Phase nennen wir erstes Viertel und bezeichnen es mit ☽.

Nach dem ersten Viertel vergrößert sich der sichtbare Teil der von

der Sonne beschienenen Mondhälfte weiter, bis er die Form einer voll beleuchteten Scheibe erhält (Phasenwinkel 180 °) – auf der Abbildung Lage 5. Diese Phase nennen wir Vollmond und bezeichnen sie mit ☺. Zu dieser Zeit befindet sich der Mond an der der Sonne gegenüberliegenden Stelle des Himmels, also 180 ° östlich und westlich von ihr, er steht mit der Sonne in Opposition.
In den folgenden Tagen beginnt der Mond wieder abzunehmen; er gewinnt allmählich wieder die Form einer Sichel, bis er wieder die Ausgangsphase erreicht hat, also zum Neumond wird. Auf dem halben Wege zum Neumond hat er wieder Ähnlichkeit mit einer halbbeleuchteten Scheibe (Phasenwinkel 270 °) – auf der Abbildung Lage 7. Diesmal befindet er sich aber annähernd 90 ° westlich der Sonne; sie befindet sich mit ihm in der westlichen Quadratur. Beleuchtet ist die östliche, also linke Mondhälfte. Diese Phase nennen wir letztes Viertel und bezeichnen sie mit ☾.
Bei der Beobachtung der Mondsichel – besonders im Frühling – kann man den restlichen, von der Sonne nicht beschienenen Teil des

Das „aschgraue" Licht (verschiedene Belichtungszeiten)



Mondes mit einem eigenartigen grünlich-grauen Licht schimmern sehen, das wir als „aschgraues" Mondlicht bezeichnen. Seine wahre Ursache erkannte schon Leonardo da Vinci (1452 bis 1519): Er erklärte es als von der Erde reflektiertes Sonnenlicht. Die von der Sonne bestrahlte Erde wirft dieses Licht in den Weltraum zurück und beleuchtet damit auch die zu dieser Zeit dunkle, der Erde zugewandte Hälfte des Mondes. Zur Intensität dieser Erscheinung trägt unter anderem auch der Umstand bei, daß sich zur Zeit der Konjunktion von Mond und Sonne und kurz danach die Erde, vom Mond aus betrachtet, mit der Sonne in Opposition befindet. Bei Beobachtung von der Mondoberfläche aus sieht sie wie eine voll beleuchtete Scheibe aus, die „Vollerde". Da der Erddurchmesser mehr als dreimal größer ist als der Monddurchmesser, überstrahlt das Licht der die Mondoberfläche beleuchtenden „Vollerde" das Licht des von der Erde beobachteten Vollmondes etwa vierzehnmal. Das aschgraue Mondlicht, dieser Lichtreflex eines Lichtreflexes, gibt uns genau den Beleuchtungszustand der Erde wieder. Zu der Zeit, in der dem Mond die dunklere Halbkugel der Erde zugewandt ist, die Gegend des Stillen Ozeans, wird das aschgraue Licht schwächer; es verstärkt sich wieder, sobald die Erde dem Mond die gegenüberliegende kontinentale Halbkugel zuwendet. Auch im Winter, wenn ein beträchtlicher Teil der Erdoberfläche von Schnee bedeckt wird, ist dieses Licht bedeutend heller.

Aus der Beobachtung des aschgrauen Mondlichtes bestimmten die sowjetischen Astronomen W. G. Fessenkow (1928) und N. S. Orlowa (1941) die sogenannte sphärische Albedo mit 0,40. Die Albedo, das Rückstrahlungsvermögen, bestimmt die Fähigkeit rauher Flächen, zum Beispiel verschiedener Gesteine oder Grundstoffe, das auf sie auftreffende Licht zurückzuwerfen. Sie ist das Zahlenverhältnis zwischen dem rückgestrahlten Licht und der Menge des aufgetroffenen Lichtes. Je heller ein bestimmter Gegenstand ist, desto höher ist seine Albedo und umgekehrt. Nach dieser Feststellung käme die irdische Albedo der des Planeten Venus nahe (0,59) und würde sich stark von der mittleren Albedo des Mondes

(0,07) unterscheiden. Das hängt – wie wir noch hören werden – damit zusammen, daß die Erde und auch die Venus eine sehr dichte Atmosphäre haben, angefüllt von Wolken, die das Sonnenlicht stark zurückstrahlen, während der Mond keinerlei Atmosphäre besitzt und seine feste Oberfläche im Durchschnitt viel dunkler als die Erdoberfläche ist. Aus der beobachteten Verfärbung des aschgrauen Mondlichtes schließt G. A. Tichow, daß unsere Erde, wenn man sie aus dem kosmischen Raum betrachtete, nicht mit „weißem", sondern schwach bläulichem Licht leuchten würde.

Der Umlauf des Mondes um die Erde

Der Mond vollzieht ebenso wie die anderen Himmelskörper eine tägliche Bewegung über den gesamten Himmel von Ost nach West, die bekanntlich nur eine scheinbare ist. Sie wird durch die Drehung der Erde um ihre Achse, die sich in entgegengesetzter Richtung, also von West nach Ost, vollzieht, durch die Rotation, hervorgerufen.

Die scheinbare Bewegung des Himmels und damit der Himmelskörper – analog der Bewegung der einzelnen Punkte an der Oberfläche der sich drehenden Erde – erfolgt auf Kreisbahnen, deren Ebenen senkrecht zu der gedachten Himmelsachse stehen, die mit unserer Erdachse zusammenfällt. Deshalb schließen bei uns, in einer geographischen Breite von 50 °, die scheinbaren Tagesbahnen der Himmelskörper mit der Horizontebene den Ergänzungswinkel von 40 ° ein. Der Winkel zwischen der Bahn des aufgehenden und ebenso des untergehenden Mondes und dem Horizont beträgt darum 40 °. Der Mond geht auf, das heißt, er erscheint über dem Horizont, steigt allmählich empor und kulminiert dann; er erreicht also seine höchstmögliche Bogenhöhe über dem Horizont – und zwar um diese Zeit genau im Süden – und beginnt sich wieder zum Horizont zu senken. Schließlich geht er unter; das heißt, er verschwindet für den Beobachter hinter dem Horizont und bewegt sich wieder nach

der anderen, für uns unsichtbaren Hälfte des Himmels der Erdkugel. Der Mond vollzieht aber außer dieser scheinbaren täglichen Bewegung auch noch seine eigentliche Bewegung unter den Sternen; wir können diese leicht feststellen, wenn wir seine Stellung unter den Sternen an mehreren hintereinanderliegenden Tagen aufzeichnen. Diese Eigenbewegung des Mondes am Himmel ist das Abbild seiner tatsächlichen Bewegung um die Erde. Sie vollzieht sich auf einer Kreisbahn, die mit der Ekliptik, der scheinbaren Jahresbahn der Sonne, einen Winkel von 5 ° (genau 5 °8′43″) einschließt. Auch die Bewegung der Sonne entlang der Ekliptik ist aber, wie wir wissen, nur eine scheinbare, weil sie sich aus der Jahresbewegung der Erde um die Sonne ergibt. Der Mond bewegt sich auf seiner Bahn rechtläufig, das heißt der Himmelsbewegung entgegen, und zwar mit ziemlicher Geschwindigkeit. Schon nach etwa 50 Minuten legt er am Himmel eine Strecke zurück, die seinem scheinbaren Durchmesser (0,5 °) entspricht. In 24 Stunden rückt er etwa um 13 ° (genau 13 °10′35,03″) nach Osten vor. Einen vollen Umlauf am Himmel von Westen nach Osten, also volle 360 °, legt er in 27 Tagen 7 Stunden 43 Minuten und 11,5 Sekunden oder in 27,32166 Tagen zurück, in einem siderischen Monat.

Es könnte scheinen, daß sich in der gleichen Zeit, in der der Mond einmal die Erde umkreist, am Himmel die einzelnen Mondphasen ablösen. In Wirklichkeit ist das aber nicht so, denn nicht nur der Mond, sondern auch die Sonne ändert dauernd ihre Stellung am Himmel. Die Sonne bewegt sich dabei allerdings viel langsamer als der Mond. An einem Tag rückt sie nur etwa 1 ° nach Osten vor. Der Mond muß also, wenn er nach Vollendung eines Umlaufes um die Erde wieder die gleiche Stellung zur Sonne gewinnen, also wieder die gleiche Ausgangsphase einnehmen will, der Sonne ein Stück ihres Weges nachlaufen und sie einholen. Darum ist die Zeit, in der der Mond sämtliche Phasen absolviert, etwas länger als der siderische Monat. Sie ist etwa um 1 °· 27,3 länger: um 27,3 °. Das macht zeitlich etwas mehr als zwei Tage aus. Genaugenommen beträgt die Länge einer Lunation oder eines sogenannten synodi-

schen Monats 29 Tage 12 Stunden 44 Minuten und 2,8 Sekunden oder – anders ausgedrückt – 29,53059 Tage.

Die unaufhörliche Bewegung des Mondes am Himmel von Westen nach Osten hat selbstverständlich auch eine ständige Veränderung seines Auf- und Unterganges zur Folge. Wie wir schon erwähnten, rückt der Mond am Himmel täglich um etwa 13 ° nach Osten vor, die Sonne aber nur etwa 1 °. Damit entfernt sich der Mond täglich etwa um 12 ° von der Sonne ostwärts. Da 1 ° zeitlich 4 Minuten entspricht – der Himmel braucht zur Drehung um 1 ° eine Zeit von 4 Minuten –, verspätet sich der Aufgang des Mondes gegenüber dem Sonnenaufgang täglich um etwa 12·4 Minuten, also um 48 Minuten. Eine wichtige Rolle spielt hierbei auch die sogenannte Deklination des Mondes, seine Stellung zum sogenannten Himmelsäquator. Befindet sich der Mond nördlich vom Himmelsäquator, hat er eine positive Deklination, so geht er etwas früher auf und etwas später unter als zu der Zeit, in der er eine negative Deklination hat, also sich gerade südlich des Himmelsäquators bewegt. Es gilt ungefähr die Faustregel, daß der Mond im Neumond gleichzeitig mit der Sonne auf- und untergeht, im ersten Viertel mittags aufgeht – wenn die Sonne kulminiert – und um Mitternacht untergeht, bei Vollmond mit Sonnenuntergang auf- und mit Sonnenaufgang untergeht und im letzten Viertel etwa um Mitternacht auf- und zu Mittag untergeht.

Die größte Höhe über dem Horizont (obere Kulmination), in der man ihn am besten beobachten kann, erreicht der Mond als Neumond um die Mittagszeit (als Neumond ist er allerdings nicht zu sehen), im ersten Viertel abends bei Sonnenuntergang, als Vollmond um die Mitternachtsstunde, im letzten Viertel früh bei Sonnenaufgang.

Wir wissen aus Erfahrung, daß sich im Laufe der Zeit nicht nur der Termin für den Auf- und Untergang des Mondes ändert, sondern auch seine Höhe über dem Horizont. Den Grund dafür bildet die Neigung der Mondbahn zum irdischen Äquator. Würde der Mond die Erde in der Ebene des Erdäquators umkreisen, so fiele seine

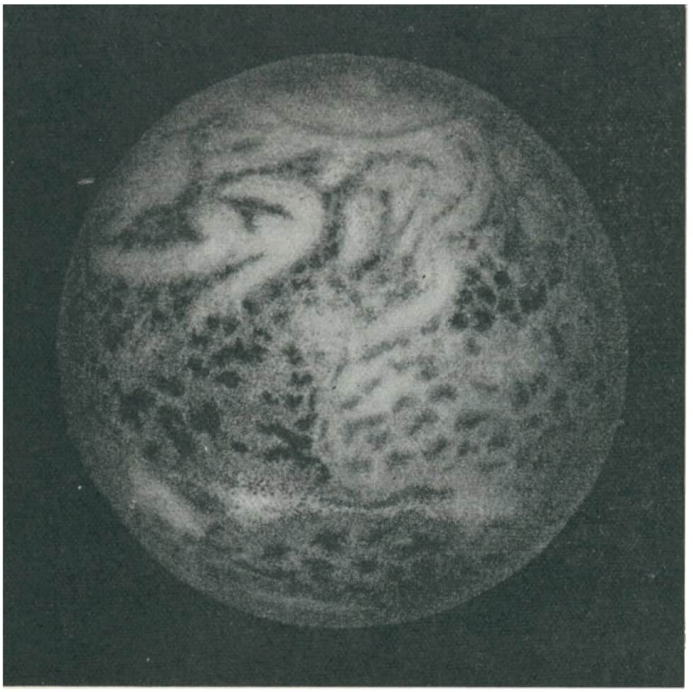
Bahn am Himmel mit dem Himmelsäquator zusammen, der ja eigentlich die Projektion des Erdäquators auf die gedachte Himmelskugel ist. Der Mond ginge dann bei uns das ganze Jahr über genau im Osten auf und genau im Westen unter. Im Kulminationspunkt würde er eine Höhe von 40 ° über dem südlichen Horizont erreichen, was der Neigung des Himmelsäquators gegen den Horizont in der geographischen Breite von $\varphi = 50$ ° entspricht. Der Mond umkreist die Erde aber nicht in der Ebene des Erdäquators; deshalb ist auch die Mondbahn am Himmel nicht mit dem Himmelsäquator identisch. Wir sagten bereits, daß sie ungefähr mit der Ekliptik übereinstimmt, von der sie nur um etwa 5 ° abweicht. Infolgedessen ändert sich der Ort des Mondauf- und Monduntergan ges und damit auch die Höhe des Mondes über dem Horizont zur Zeit der Kulmination im Laufe des Jahres ähnlich wie bei der Sonne. Man kann grob sagen, daß die Höhe des Mondes über dem Horizont bei Neumond der gleichzeitigen Sonnenhöhe entspricht, im ersten Viertel der Höhe, die die Sonne ein Vierteljahr später haben wird, im letzten Viertel der Sonnenhöhe vor einem Vierteljahr, im Vollmond der Sonnenhöhe vor einem halben Jahr oder – was dasselbe ist – nach einem halben Jahr. Hieraus geht hervor, daß der Mond seine größte Höhe über dem Horizont im ersten Viertel im Monat März erreicht, im Vollmond Ende Dezember, im letzten Viertel Ende September.

Da die Mondbahn unter einem Winkel von 5 ° 8′ 43″ zur Ekliptik steht, ändert sich die Höhe des Mondes in der Kulmination noch stärker, als das im Laufe des Jahres bei der Sonne der Fall ist, und zwar so, daß der Mond bis zu 5 ° 8′ 43″ über die höchste Stellung der Sonne kommen kann und ebensoviel unter ihre tiefste. Weil die Ekliptik den Himmelsäquator unter einem Winkel von 23 ° 26′ 44,8″ schneidet, ist die maximale Höhe über dem Horizont, die der Mond in unseren Breiten erreichen kann, 68 ° 35′ 27,8″, die minimale etwa 11 ° 24′ 32,2″ (bei der Sonne betragen diese Werte 63 ° 26′ 44,8″ und 16 ° 33′ 15,2″).

Die Libration des Mondes

Vom Mond wird oftmals fälschlich behauptet, daß er sich nicht wie die Erde um seine Achse drehe und daß wir aus diesem Grunde von der Erde aus immer dieselbe Mondhälfte sehen. Die Ursache dieser allgemein bekannten Tatsache ist aber eine ganz andere. Der Mond dreht sich um seine Achse. Seine Rotationsbewegung ist jedoch so langsam, daß er zu einer vollen Umdrehung ebensoviel Zeit braucht wie zur Umkreisung der Erde, also etwa 27,3 Tage. Darum wendet uns der Mond immer dieselbe Hälfte seiner Oberfläche zu; die andere Mondhälfte bekommen wir auf der Erde praktisch nie zu sehen. Ein Beobachter, der sich auf dieser erdzugewandten Mondhälfte befände, hätte unsere Erde ununterbrochen über dem Horizont, während ein Beobachter auf der entgegengesetzten Seite die Erde nie sähe. Aus demselben Grunde haben alle Punkte in der Nähe des Mondäquators fast während ganzer 15 Erdentage Tag, also die Sonne über dem Horizont, und die gleiche Zeit hindurch Nacht.

Der mittlere Tag dauert auf dem Mond (mit Ausnahme seiner fernsten Polargegenden) genau einen halben synodischen Monat, also 354 Stunden 22 Minuten und 1,3 Sekunden. Durch den Einfluß der Unregelmäßigkeiten des Mondumlaufes um die Erde, von der noch zu sprechen sein wird, schwankt die Tageslänge in einzelnen Mondgegenden um etwa 4 bis 5 Minuten und verändert sich auch im Laufe des Jahres nicht sehr. Größere Unterschiede in der Tageslänge an einzelnen Stellen der Mondoberfläche entstehen durch die Unebenheiten seiner Oberflächengestalt. Hochgelegene Berggipfel werden von der Sonne gewöhnlich um mehrere Stunden früher beleuchtet als Ebenen und Täler. Täler (Kraterböden), die zum Mondäquator hin durch Gebirgsrücken abgeschlossen sind, büßen regelmäßig den größten Teil des Tages, manche auch den ganzen Tag ein, so daß sie niemals vom direkten Sonnenlicht bestrahlt werden. Eine Zerstreuung des Lichtes wie in der irdischen Atmosphäre gibt es auf dem Monde nicht. Deshalb haben die von



Die Erde vom Mond aus (teilweise von Wolken bedeckt)

der Sonne nicht unmittelbar bestrahlten Stellen tatsächlich Nacht, während sehr nahe, benachbarte, von der Sonne direkt beleuchtete Stellen Tag haben. In den Polargegenden sind die Gipfel der hohen Berge ununterbrochen den Sonnenstrahlen ausgesetzt; sie haben ewigen Tag. Die tägliche Himmelsbewegung von Osten nach Westen (wie bei uns) ist auf dem Mond gleichfalls sehr langsam; die durchschnittliche Durchlaufszeit der Sonne durch einen Meridian beträgt zum Beispiel auf dem Mond 68 Minuten (auf der Erde nur 2,3 Minuten).

Besonders interessant sind die Bedingungen der Sichtbarkeit der Erde vom Monde aus. Wie gesagt, bewegt sich der Mond so um die Erde, daß er ihr immer dieselbe Hälfte seiner Oberfläche zuwendet. Unsere Erde ist deshalb nur von einer Mondhälfte aus zu beobachten. Für diese Mondhälfte geht die Erde nicht auf und nicht unter, sondern sie steht immer über dem Horizont. Wenn diese Aussage wörtlich zu nehmen wäre, verharrte die vom Mond aus be-

trachtete Erde die ganze Zeit völlig unbeweglich an einer Stelle des Mondhimmels. Weil das aber nicht stimmt und der Mond sich bei der Umkreisung der Erde – wie wir noch hören werden – aus seiner „Gleichgewichtslage" gegenüber der Erde von Zeit zu Zeit herausneigt, bleibt auch unsere Erde am Mondhimmel nicht in völliger Ruhelage. Sie bewegt sich um eine bestimmte Gleichgewichtslage, und zwar etwa so, daß sie einen Raum in der Form eines sphärischen Rechteckes von 15 ° 45′ Länge und 13 ° 34′ Breite nicht verläßt. Die Erde geht nur für die Gegenden des Mondes auf und unter, deren Horizont dieses Rechteck schneidet, also für etwa $^1/_7$ der gesamten Mondoberfläche. Für weitere $^3/_7$ der Mondoberfläche ist sie ununterbrochen über dem Horizont und nur für die restlichen $^3/_7$ immer unter dem Horizont. Es sei hier noch erwähnt, daß einige der fernsten, für uns noch sichtbaren „Randgebiete" des Mondes die Erde niemals ganz „sehen", sondern nur einen Teil des Erdballs von Zeit zu Zeit über den Horizont aufsteigen sehen.

Wie sieht die Erde aus, wenn man sie vom Mond aus betrachtet? Davon werden wir uns höchstwahrscheinlich recht bald überzeugen. Aber schon jetzt kann man sagen, daß wir mit bloßem Auge nicht sehr viel werden sehen können. Unsere Erde wird wie eine große, bläuliche Scheibe aussehen, die von veränderlichen dunklen und hellen Flecken bedeckt ist. In der Nähe der Erdpole wird man vielleicht leuchtende helle Flecken entdecken, die an die Polarkappen auf dem Mars erinnern. Vom Mond aus betrachtet wird die Erde im Laufe der Zeit ähnliche Phasen aufzuweisen haben wie für uns der Mond, nur daß der Wechsel, vor allem die zeitliche Situation der einzelnen Phasen der Erde, ein wenig anders sein wird, als wir das vom Mond gewöhnt sind. Für die zentralen Mondgegenden, die die Erde annähernd im Zenit haben, also 90 ° über dem Horizont, erscheint am Mondmittag die Erde als „Neuerde", im Verlaufe des Nachmittags, der auf dem Mond 177 Stunden dauert, nimmt die Erde immer mehr die Form einer sich füllenden Sichel an. Abends bei Sonnenuntergang ist die Erde im ersten Viertel, um Mitternacht ist „Vollerde", morgens bei Sonnenaufgang

letztes Viertel. Für die Gegenden am westlichen Mondrand ist die Erde mittags im letzten Viertel; abends ist „Neuerde", um Mitternacht erstes Viertel, morgens „Vollerde". Für die Gegenden am östlichen Mondrand ist die Erde mittags im ersten Viertel, abends ist „Vollerde", um Mitternacht letztes Viertel, morgens „Neuerde".

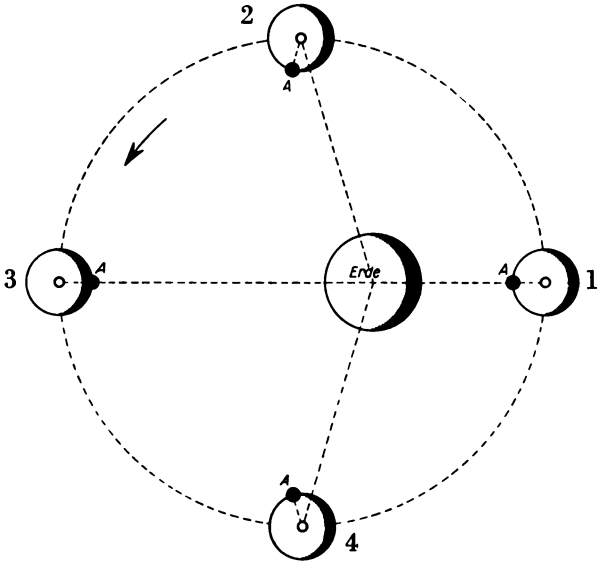
Die bereits erwähnte Feststellung, daß wir von der Erde aus nur eine Mondhälfte betrachten können, gilt nicht ganz genau, denn durch den Einfluß der sogenannten Libration des Mondes sehen wir über die genannte langsame Mondrotation hinaus über einen längeren Zeitraum hinweg nach und nach etwas mehr als 59% der Mondoberfläche. Wir unterscheiden drei Arten der Libration: die physische, die optische und die parallaktische.

Die physische oder tatsächliche Libration entsteht dadurch, daß der Mond keine genaue Kugel ist, sondern ein wenig Eiform hat; die längere Mondachse weist ungefähr zur Erde. Genauer gesagt: Sie sollte zur Erde zeigen, aber von dieser Richtung weicht sie durch den Einfluß der optischen Libration (siehe unten) ein wenig ab. Jedoch zieht die Erde durch ihre Anziehungskraft die längere Mondachse in ihre Richtung. Damit entsteht eine ununterbrochene, gewissermaßen wankende Bewegung des Mondkörpers, wodurch wir die Möglichkeit erhalten, hier ein wenig hinter den rechten – westlichen – Rand zu gucken, dort ein wenig hinter den linken – östlichen – Mondrand. Diese schwankende Bewegung des Mondes ist aber sehr klein; sie kann nur mit Hilfe sehr sorgfältiger Messungen festgestellt werden.

In neuerer Zeit machte J. Hopmann (1952) darauf aufmerksam, daß der Mond noch eine weitere „physische" Libration aufweisen muß, die durch die Anziehungskraft der Sonne und der großen Planeten bewirkt wird, und außerdem eine sogenannte freie Libration als Überrest einer ehemaligen schwankenden Bewegung aus einem früheren Stadium seiner Entwicklung. Aus der Theorie geht hervor, daß diese Librationen durch Beobachtungen festgestellt werden könnten. Bisher ist dieser Beweis aber nicht gelungen.

Eine weitaus größere Wirkung als die physische Libration hat die optische, die zum Unterschied von der vorangegangenen eine scheinbare Libration ist. Sie zeigt sich sowohl in der Länge als auch in der Breite.

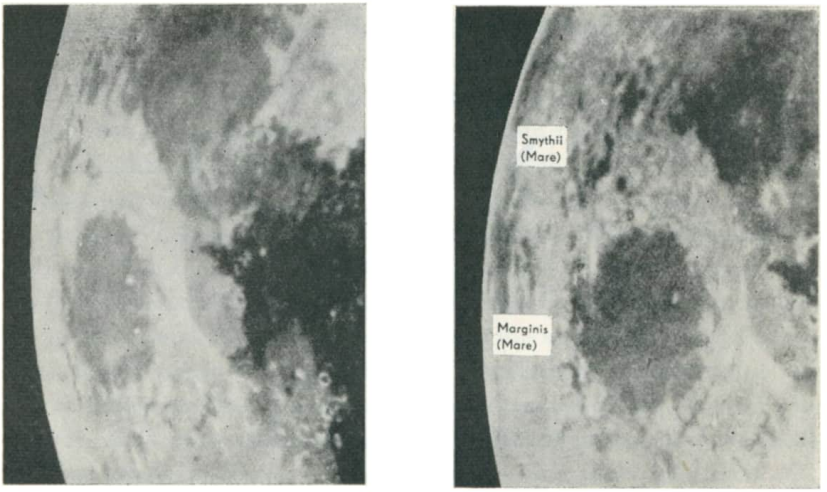
Die optische Libration in Länge wird dadurch hervorgerufen, daß sich die Geschwindigkeit der Mondrotation im Laufe der Zeit nicht ändert. Sie bleibt gleichmäßig, während sich die Umlaufgeschwindigkeit des Mondes um die Erde dauernd ändert. Der Mond bewegt sich also auf seiner Bahn um so schneller, je mehr er sich der Erde nähert; andererseits verlangsamt er sich mit Zunahme der Entfernung von ihr. Infolgedessen kann der Beobachter auf der Erde zu einer bestimmten Zeit ein wenig hinter den rechten, zu anderer Zeit ein wenig hinter den linken Mondrand sehen. Am besten erläutert das uns die Abbildung. Der Mond hat in Erdnähe – im Perigäum (in der Abbildung Position 1) – die größte Geschwindigkeit, in Erdferne – also im Apogäum (Position 3) – die geringste

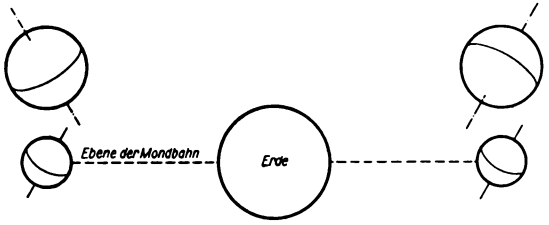


Entstehung der optischen Libration in Länge

Geschwindigkeit und in der Nähe der kleinen Halbachsen seiner elliptischen Bahn um die Erde (Positionen 2 und 4) eine durchschnittliche Umlaufgeschwindigkeit. Die Mondrotation ist aber gleichförmig. Die Umlaufgeschwindigkeit des Mondes um die Erde stimmt also niemals genau mit seiner Rotationsgeschwindigkeit überein. Sie ist entweder größer (im Bahnabschnitt zwischen den Positionen 4 und 2) oder kleiner (im Bahnabschnitt zwischen den Positionen 2 und 4). Auf der Abbildung befindet sich – von der Erde aus betrachtet – in Position 1 inmitten der Mondscheibe der Punkt A, dessen Verbindungslinie zum Mondmittelpunkt mit der Verbindungslinie des Mondmittelpunktes zur Erde zusammenfällt. Da im Bahnabschnitt zwischen Position 1 und Position 2 die Umlaufgeschwindigkeit des Mondes größer als seine Rotation ist, verspätet sich die Umdrehungsbewegung der Verbindungslinie des Punktes A mit dem Mondzentrum gegenüber der Umdrehung der Verbindungslinie Mondmittelpunkt-Erde, so daß sich in Position 2 der Punkt A für den Beobachter auf der Erde noch nicht in der

Einfluß der optischen Libration in Länge auf das Aussehen des westlichen Mondrandes nach einer Aufnahme der Prager Volkssternwarte





Entstehung der optischen Libration in Breite

Mitte der Mondscheibe befindet, sondern ein wenig weiter links, also östlich. Der Beobachter sieht deshalb etwas mehr als gewöhnlich von der rechten – westlichen – Mondseite (westliche Libration). Von Position 2 zu Position 3 sinkt die Umlaufgeschwindigkeit des Mondes wieder, und der Punkt A gerät mit einem Überschuß an Rotationsgeschwindigkeit im Apogäum (Position 3) wieder in die Mondmitte. Von Position 3 zu Position 4 ist die Umlaufgeschwindigkeit immer noch kleiner als die Rotationsgeschwindigkeit; der Punkt A gerät deshalb ein wenig rechts der Mondmitte (Position 4). Der Beobachter auf der Erde sieht diesmal ein wenig hinter den linken, den östlichen Rand des Mondes (östliche Libration). Von Position 4 zu Position 1 beginnt die Umlaufzeit wieder die Rotationsgeschwindigkeit zu übertreffen, und der Punkt A kehrt wiederum in die Mitte der Mondscheibe zurück (Position 1).

Die optische Libration in Breite wird im wesentlichen durch die Neigung der Mondachse, um die sich die Rotationsbewegung des Mondes vollzieht, zur Ebene der Mondbahn hervorgerufen. Da die Mondachse beim Umlauf des Mondes um die Erde ebenso wie die Erdachse beim Umlauf der Erde um die Sonne ihre Lage im Raum beibehält, wendet der Mond scheinbar während der Umkreisung der Erde dieser abwechselnd seinen nördlichen und südlichen Pol zu. Der Beobachter auf der Erde sieht deshalb einmal ein wenig hinter den oberen (nördlichen), ein andermal hinter den unteren (südlichen) Mondrand.

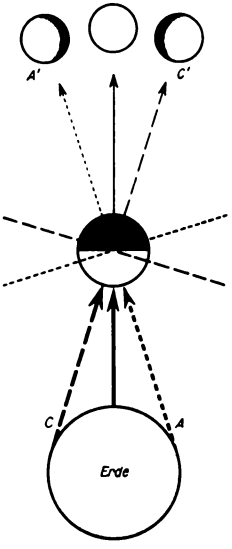
In der Praxis verbinden sich diese beiden Arten der optischen

Libration ununterbrochen, so daß der Beobachter, wenn er diese scheinbaren Bewegungen der Mondkugel am Himmel bedeutend beschleunigen könnte – etwa dadurch, daß er sie filmte und dann zeitraffend vorführte –, den Eindruck gewänne, daß sich der Mond eigentlich ununterbrochen wiegt, und zwar sowohl von einer Seite auf die andere als auch von oben nach unten und zurück.

Durch den Einfluß der optischen Libration kann sich der Mond bis zu $\pm 7{,}9\,^\circ$ in der Länge und um $\pm 6{,}8\,^\circ$ in der Breite drehen. In den Grenzen dieser Dimensionen können wir hinter den östlichen oder westlichen und nördlichen oder südlichen Mondrand sehen. In Längenmaßen ausgedrückt, sehen wir in günstigen Fällen bis zu 300 km hinter den Rand unseres Trabanten. Die Gipfel der 1000 m hohen Mondgebirge sehen wir noch in einer Entfernung von weiteren 60 km.

Die parallaktische oder tägliche Libration wird durch die verhältnismäßig große Mondnähe hervorgerufen und dadurch, daß sich der Beobachter nicht im Mittelpunkt, sondern an der Oberfläche der verhältnismäßig großen Erde befindet. Daraus ergibt sich, daß ein Beobachter, der den Mond kurz nach seinem Aufgang (Punkt A) und kurz vor seinem Untergang (Punkt C) betrachtet, im ersten Falle im Ergebnis der durch die Erdrotation verursachten Veränderung des Beobachtungspunktes hinter den rechten (Position A′) und im zweiten hinter den linken (Position C′) Rand sieht. Durch den Einfluß der parallaktischen Libration zwischen Auf- und Untergang des Mondes können wir bis zu 1,03 ° hinter den rechten (westlichen) oder linken (östlichen) Mondrand sehen. In der Praxis wird dann die parallaktische Libration der optischen entweder zugezählt oder von ihr abgezogen.

Entstehung der parallaktischen Libration



Die Ungleichmäßigkeit der Mondbewegung

Die Bewegung des Mondes um die Erde unterliegt den verschiedensten Störungen, die wir zusammenfassend als Ungleichheiten der Mondbewegung bezeichnen. Es ist vor allem die Sonne, die mit ihrer ungeheuren Masse sehr störend auf den Mondumlauf um die Erde einwirkt, obwohl ihre Entfernung 400mal größer als die der Erde ist. Die elliptische Mondbahn wird aber auch noch von anderen Einflüssen, vor allem hervorgerufen durch große Planeten (Jupiter), gestört und außerdem dadurch, daß unsere Erde nicht die Form einer Kugel, sondern eines abgeplatteten Rotationsellipsoids (Geoid) hat. Wenn sie exakte Kugelform hätte, wirkte sie theoretisch auf den Mond mit gleicher Kraft wie ein Massenpunkt im Erdzentrum, der die gleiche Masse wie unser ganzer Planet hat. Beim Erdellipsoid aber tritt zu den Anziehungskräften, die der Kugel eigen sind und nach ihrem Mittelpunkt hin wirken, noch die Wirkung der überzähligen Masse am Äquator. Das zeigt sich darin, daß die Umlaufzeit des Mondes um die Erde etwas kürzer ist, als sie um eine kugelförmige Erde wäre. Als störender Faktor wirkt hier außerdem die ungleichmäßige Verteilung der Masse im Inneren unseres Planeten.

Die Sonne bewirkt durch ihre Anziehung einerseits die periodische Beschleunigung und ebenso die Verlangsamung der Umlaufgeschwindigkeit des Mondes, deren mittlerer Wert 1,02 km/s beträgt. Andererseits hat sie Einfluß auf die Mondbahn; denn sie verändert periodisch nicht nur ihre Ausmaße und ihre Exzentrizität, sondern auch ihre Orientierung im Raum. Darum gehört die Theorie von der Mondbewegung zu den schwierigsten Gebieten der theoretischen Astronomie.

Die hauptsächlichen Störungen der Mondbewegung sind folgende:

1. Während die Neigung der Mondbahn zur Ekliptik, die 5 °8′43″ beträgt, im Laufe der Zeit konstant bleibt, drehen sich die Schnittpunkte der Mondbahn mit der Ekliptik, die sogenannten Knoten (Drachenpunkte; aufsteigender Knoten Ω, in dem der Mond von

der südlichen Halbkugel der Ekliptik in die nördliche übergeht; ihm gegenüber der absteigende Knoten ☋), durch den Einfluß der Sonnenanziehung ununterbrochen in entgegengesetzter Richtung um die Ekliptikachse, also von Osten nach Westen. Diese Bewegung (auch Rückwärtsdrehung der Knotenlinie genannt) geschieht verhältnismäßig schnell. In einem Jahr bewegen sich die Knoten um etwa 19 °; ihr ganzer Umlauf dauert 18,5997 Jahre.
Die Lage der Mondbahn am Himmel verändert sich also ununterbrochen, rückt ständig weiter nach Westen. Man kann sie deshalb nicht für immer auf den Sternkarten einzeichnen, wie das zum Beispiel bei der Ekliptik der Fall ist.
2. Ebenso wie die Knoten im Laufe des Jahres am Himmel wandern, tun das auch zwei weitere Punkte der Mondbahn, nämlich Perigäum und Apogäum, der erdnächste und erdfernste Punkt der Mondbahn. Diese Bewegung vollzieht sich mit noch größerer Geschwindigkeit als die der Knoten. Die sogenannte Länge des Perigäums der Mondbahn, die der vom Frühlingspunkt (0 °) an gerechnete Winkel bildet – jenem Punkt der Ekliptik, in dem sich die Sonne zur sogenannten Frühjahrs-Tagundnachtgleiche (21. 3.) befindet –, durchläuft entlang der Ekliptik zum aufsteigenden Knoten und von dort entlang der Mondbahn zum Perigäum in einer Zeit von 8,8503 Jahren alle Werte von 0 ° bis 360 °.
Diese Bewegung, die sich mit ungleichmäßiger Geschwindigkeit vollzieht, und zwar rechtläufig von Westen nach Osten, nennen wir Vorschreiten der Apsidenlinien (unter Apsidenlinie versteht man die Verbindungslinie zwischen Perigäum und Apogäum, die große Achse der elliptischen Mondbahn).
3. Die Geschwindigkeit der Mondbewegung verändert sich immerfort. Am schnellsten bewegt sich der Mond auf seiner Bahn in der Nähe des Perigäums, am langsamsten in der Nähe des Apogäums. Der Unterschied zwischen der Stellung des tatsächlichen und des sogenannten „mittleren" Mondes, des Mondes, der sich auf seiner Bahn mit ständig gleichmäßiger Geschwindigkeit bewegt, kann bis zu $\pm 6\,°17{,}3'$ betragen. Diese Mittelpunktsgleichung (Große Un-

gleichheit, Große Ungleichung) der Mondbewegung entdeckte bereits C. Ptolemäus (150 v. u. Z.). Ihr ist die sogenannte Evektion überlagert. Durch sie vergrößert sich die Mittelpunktsgleichung in den Quadraturen (erstes und letztes Mondviertel), und sie verkleinert sich durch sie in den Syzygien (Vollmond und Neumond).
Im Ergebnis der Evektion verändert sich die sogenannte Ekliptiklänge des Mondes – die Winkelentfernung des Mondes vom Frühlingspunkt, gemessen in der Ekliptikebene – bis um 1 ° 16′45″ in einer Periode von 31,8 Tagen.
4. Eine weitere periodische Störung mit einer ziemlich großen Amplitude ist die sogenannte Variation, die schon Tycho Brahe (1546 bis 1601) und unabhängig von ihm J. Kepler (1571 bis 1630) entdeckten. Ihre Amplitude beträgt 39,5′ und ihre Periode die Hälfte des synodischen Monats. Sie wirkt sich in einer Beschleunigung der Mondbewegung bei Vollmond und Neumond und dann wieder in einer Verlangsamung im ersten und letzten Viertel aus.
5. Weniger bekannt ist die sogenannte jährliche Ungleichheit mit einer Amplitude von 11,2′ und einer Periode von einem Jahr. Sie macht sich dadurch bemerkbar, daß sich die Bewegung des Mondes im Januar, wenn sich die Erde mit dem Mond der Sonne nähert. verlangsamt, da die Sonnenanziehung in dieser Zeit eine „Verlängerung" der Mondbahn zur Sonne hin bewirkt; die größte Verlangsamung tritt dabei im März ein. Wenn unsere Erde mit dem Mond am weitesten von der Sonne entfernt ist, im Juli, beschleunigt sich die Mondbewegung und erreicht ihr Maximum im Oktober. Der Zeitunterschied, der durch diese Ungleichheit im Mondumlauf um die Erde verursacht wird, kann bis zu 10 Minuten betragen.
6. Interessant ist die sogenannte parallaktische Ungleichheit mit einer Amplitude von 2′5,15″. Sie bewirkt, daß sich die Mondbewegung im ersten Viertel ein wenig verlangsamt und im letzten Viertel beschleunigt. Die Bezeichnung parallaktisch wurde deshalb gewählt, weil die Amplitude dieser Veränderung mit der sogenannten Sonnenparallaxe, der Entfernung zwischen Sonne und Mond, zusammenhängt.

7. Die letzte Ungleichheit der Mondbewegung, die wir noch erwähnen möchten, ist die sogenannte lunare Ungleichheit mit sehr kleiner Amplitude und einer Periode von einem siderischen Monat. Ihre Entstehung ist sehr interessant. Wir erwähnten bereits, daß Erde und Mond gemeinsam ein System von zwei gewissermaßen fast „gleichwertigen" Körpern, etwa Zwillingsplaneten, bilden. Genaugenommen ist es nicht richtig, daß der Mond „die Erde umkreist". Tatsächlich ist es so, daß Erde und Mond – ähnlich wie das zum Beispiel bei Doppelsternen ist – um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Unser Planet hat aber mehr als 81 mal mehr Masse als der Mond, und deshalb liegt der gemeinsame Gravitationspunkt dieser beiden Körper in einer Entfernung von nur 4717 km vom Erdmittelpunkt, also im Inneren unseres Planeten. Die Bewegung der Erde um diesen Schwerpunkt können wir darum nicht gut als „Umlauf" betrachten. Es ist dies viel eher eine Oszillationsbewegung, die sich am Himmel durch eine ziemlich geringe scheinbare Bewegung der übrigen Himmelskörper bemerkbar macht, am meisten aber am Mond zu erkennen ist, der uns von allen Himmelskörpern am nächsten ist.

Nach alledem könnte es scheinen, daß das Problem der Mondbewegung heute schon so gelöst ist, daß nichts weiter zu klären bleibt. In bestimmter Hinsicht ist das auch wirklich der Fall. So ermöglichen uns zum Beispiel die neuesten Brownschen Tafeln zur Errechnung der Mondbewegung (E. W. Brown, Tables of the Motions of the Moon. London 1909), die Stellung des Mondes am Himmel mit einer Genauigkeit von 0,1″ zu bestimmen. Das ist bei der mittleren Entfernung des Mondes eine Genauigkeit von 200 m. Jedoch gibt es aber auch hier immer noch ungelöste Probleme. So wurde zum Beispiel in moderner Zeit eine weitere, bisher theoretisch noch nicht erläuterte Ungleichheit in der Bewegung des Mondes mit einer Amplitude bis zu 16″ und einer Periode von etwa 260 Jahren festgestellt. Manchmal aber werden plötzliche und völlig unerwartete Veränderungen beobachtet. Nach der Meinung einiger Forscher werden sie nicht von Ungleichheiten der Mond-

bewegung, sondern von zeitweisen Störungen der Erdrotation verursacht, die zu einer unexakten Zeitbestimmung und damit zu einer ungewöhnlichen Mondstellung führen.
Um die Theorie der Mondbewegung zu kontrollieren, wird heute hauptsächlich die sogenannte Sternbedeckung durch den Mond benutzt. Dabei geht es vor allem darum, möglichst genau den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem der östliche Mondrand beim Vorrücken des Mondes einen bestimmten, genügend hellen Stern bedeckt (Eintritt). Nach einer bestimmten Zeit, wenn der Stern hinter dem Rand des Mondes verschwunden ist, kommt das Ende der Sternbedeckung: Der Stern erscheint wieder am westlichen Rand des Mondes (Austritt). Wenn wir Eintritt und Austritt der Bedeckung eines bestimmten Sternes zeitlich genau festgehalten haben, können wir leicht die zugehörige scheinbare Lage des Mondes am Himmel errechnen und dann mit der vorausberechneten Lage vergleichen.
In früheren Zeiten wurden Bedeckungen der Sterne durch den Mond für den praktischen Gebrauch des Seedienstes beobachtet. Die Bedeckungen dienten nämlich, ähnlich wie die Beobachtung der Jupitermonde, zur Bestimmung der geographischen Länge. Heute werden diese Beobachtungen durch die Verfolgung genauer, durch den Funk ausgesandter Zeitsignale ersetzt, wodurch sich die Bestimmung des Schiffsstandortes bedeutend erleichterte.

Die Umlaufperioden des Mondes

Wir sagten bereits, daß der Mond die Erde in 27 Tagen 7 Stunden 43 Minuten und 11,5 Sekunden oder in 27,32166 Tagen umläuft und daß wir diese Zeit als siderischen Monat bezeichnen. Die Länge des siderischen Monats ist aber keine konstante Größe. Schon E. Halley (1656 bis 1742) stellte auf der Grundlage des Vergleiches von antiken und zeitgenössischen Mondbeobachtungen fest, daß sich der siderische Mondumlauf im Laufe der Zeit immer mehr

verkürzt, und errechnete, daß diese Beschleunigung der Mondbewegung oder säkulare Akzeleration etwa 11″ im Jahrhundert beträgt. Nach neuesten Messungen beträgt die säkulare Akzeleration des Mondes 8″. Pierre Simon Laplace (1749 bis 1827) leitete daraus ab, daß 6″ davon der säkularen Verkleinerung der Exzentrizität der Umlaufbahn der Erde um die Sonne zugeschrieben werden können. Eine Verkleinerung der Exzentrizität der elliptischen Erdbahn gibt es tatsächlich; es handelt sich hier aber nicht um eine säkulare Veränderung im echten Sinn des Wortes, also um eine ständig und allmählich anwachsende Abweichung, sondern um eine periodische Veränderung, allerdings mit einer so langen Periode, daß man sie praktisch schon für eine Säkularveränderung nehmen kann. Die verbleibenden 2″ der Mondakzeleration kann man vorläufig auf der Grundlage der vorhandenen Theorien über die Mondbewegung in keiner Weise erläutern. Manche Forscher glauben, daß sie durch eine säkulare Verlangsamung der Erdrotation verursacht wird, eine allmähliche Verlängerung des sogenannten Sterntages, der für uns ein grundlegender Zeitmaßstab ist.

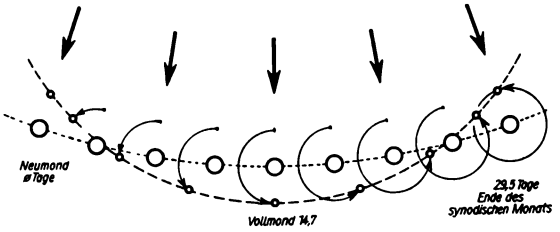
Neben dem siderischen Monat kennen wir dann noch den synodischen Monat. Mit diesem Begriff bezeichnen wir die Umlaufzeit des Mondes um die Erde im Hinblick auf die Stellung zur Sonne. Da sich die Sonne am Himmel ebenfalls bewegt, muß der Mond nach Ablauf des siderischen Monats, nach Beendigung seines tatsächlichen Umlaufes um die Erde, noch ein bestimmtes Wegstück zurücklegen, um in die gleiche Ausgangsposition zur Sonne zu kommen, also die gleiche Ausgangsposition zu erreichen. Damit entsteht die beobachtete Verlängerung des synodischen Monats gegenüber dem siderischen Monat. Der synodische Monat dauert 29 Tage 12 Stunden 44 Minuten und 2,8 Sekunden (29,53059 Tage).

Außer dem siderischen und dem synodischen Monat unterscheiden wir noch zwei weitere Monate. Es ist dies der sogenannte drakonitische Monat, der 27 Tage 5 Stunden 5 Minuten und 35,8 Sekunden oder 27,21222 Tage dauert und die Zeit ausdrückt, die zwischen zwei Durchgängen des Mondes durch seinen aufsteigenden Knoten

vergehen. Da die Knoten der Mondbahn im Laufe der Zeit zurückweichen, also eine der Mondbewegung entgegengesetzte Bewegung ausführen, ist der drakonitische Monat aus begreiflichen Gründen etwas kürzer als der siderische.

Weiter gibt es den sogenannten anomalistischen Monat, der 27 Tage 13 Stunden 18 Minuten und 33,1 Sekunden oder 27,55455 Tage umfaßt. Das ist die Zeit, die zwischen zwei Durchgängen des Mondes durch das Perigäum seiner Bahn vergeht. Weil sich die Apsidenlinie der Mondbahn und damit auch sein Perigäum im Laufe der Zeit in der gleichen Richtung bewegen, nämlich in umgekehrter Richtung wie die Knoten und in gleicher Richtung wie der Mond, ist der anomalistische Monat länger als der siderische.

Bevor wir uns endgültig von den Mondbewegungen trennen, muß hier noch ein wenig bekannter, aber interessanter Umstand erwähnt werden, der den Mondumlauf um die Erde betrifft. Es ist dies die Form der Mondbahn gegenüber der Sonne, beziehungsweise die Frage, welche Form die Mondbahn im Raume für einen Beobachter hätte, der sich außerhalb unserer Erde aufhielte, sagen wir in einer Entfernung von mehreren Millionen Kilometern „nördlich" der Sonne, in einer bestimmten größeren Entfernung „über" der Ekliptikebene. Der uneingeweihte Mensch verfällt leicht der Meinung, die tatsächliche Bahn, die der Mond um die Erde und gemeinsam mit ihr um die Sonne läuft, müsse die Form einer Wellenlinie haben, die sich entlang der Erdbahn windet. Die Mondbahn müßte demnach der Sonne gegenüber einmal hohl (konkav) sein und dann wieder ausgebuchtet (konvex). Diese Vorstellung ist aber irrig. Wir dürfen nicht vergessen, daß der Halbmesser der Erdbahn annähernd 400 mal größer ist als der Halbmesser der Mondbahn um die Erde und daß die Umlaufgeschwindigkeit der Erde, deren Mittelwert 29,765 km/s beträgt, etwa 30mal größer ist als die Geschwindigkeit des Mondes bei seinem Lauf um die Erde (die mittlere Mondgeschwindigkeit beträgt nämlich, wie bereits erwähnt, nur 1,02 km/s).



Tatsächliche Mondbahn im Raum

Die Bahn, die der Mond im Raume beschreibt, ist der Sonne gegenüber in jedem Augenblick hohl, so daß man sie eigentlich als eine um die Sonne verlaufende Bahn auffassen kann, die aber andauernd von der Erde unterbrochen wird. Man kann ausrechnen, daß der sogenannte Halbmesser der Krümmung dieser Mondbahn im Neumond 1,73 und im Vollmond 0,73 mittlere Entfernungen Erde-Sonne beträgt. Die Mondbahn ist der Sonne gegenüber ständig hohl, und nur ihr Krümmungshalbmesser ändert sich mit der Zeit.

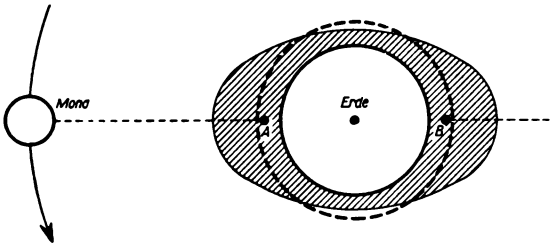
Der Einfluß der Anziehungskraft des Mondes auf die Erde

Ebenso wie die Erde mit ihrer Anziehungskraft auf den Mond wirkt und ihn zwingt, sie zu umkreisen, wirkt auch der Mond mit seiner Anziehungskraft auf die Erde und auf alle Gegenstände an ihrer Oberfläche. Steht der Mond im Zenit (Scheitelpunkt) eines bestimmten Ortes auf unserer Erdoberfläche, so verlieren zum Beispiel alle an dieser Stelle liegenden Gegenstände durch den Einfluß der Mondanziehung (da sie eigentlich durch den Mond aufwärtsgezogen werden) etwa den 300000sten Teil ihres Gewichtes. Praktisch bedeutet das, daß zum Beispiel ein 70 kp schwerer Mensch in diesem Falle durch die Wirkung der Mondanziehung etwa 0,2 Pond verliert. Das ist wenig; aber insgesamt wirkt sich das in riesigen Massenverschiebungen auf der Erdoberfläche aus, in den sogenannten Gezeiten (Ebbe und Flut) und nicht zuletzt

auch in Bewegungen der ganzen Erde, der sogenannten Präzession und Nutation der Erdachse.

Das regelmäßige Ansteigen der Meeresoberfläche, das sich an allen Meeresufern zweimal täglich durch das Ansteigen der Oberfläche, die Flut, und ihr Absinken, die Ebbe, zeigt, wird, wie schon Isaac Newton (1687) erkannte, durch die Anziehungskraft des Mondes auf die leichtbewegliche Masse des Meeres hervorgerufen.

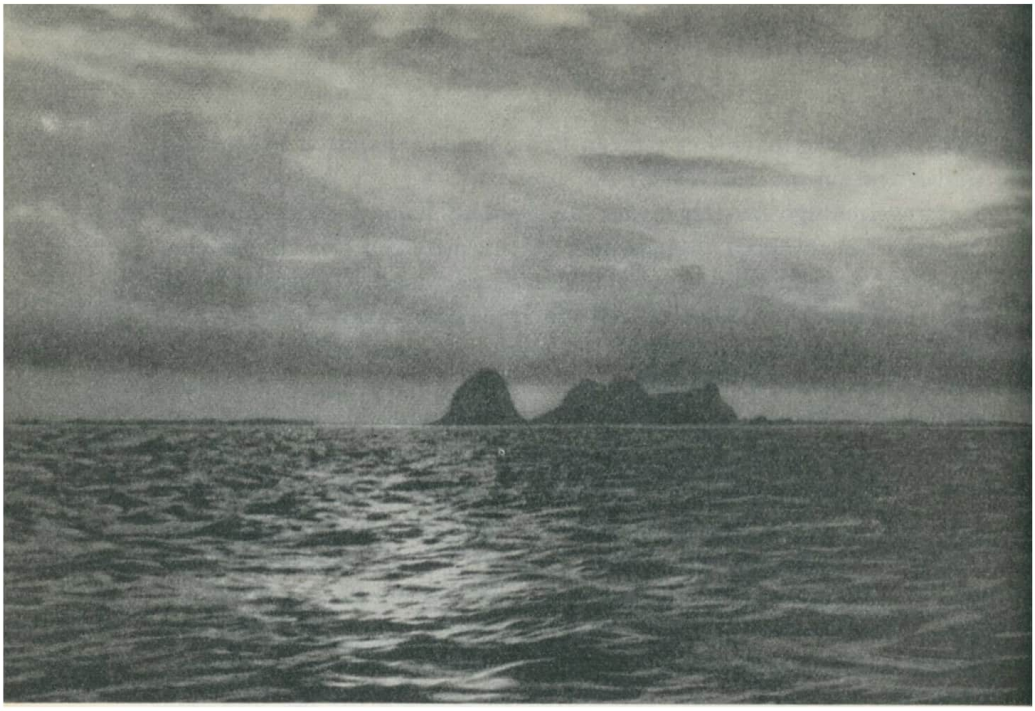
Stellen Sie sich die Erde als eine ideale Kugel vor, ringsum gleichmäßig mit Wasser bedeckt. Die in dem mondnäheren Punkt A



Entstehung von Flut und Ebbe

wirkende Anziehungskraft des Mondes wird größer sein als im Mittelpunkt der Erde Z. Deshalb wird das Wasser im Punkt A an der Erdoberfläche emporgehoben. Ebenso wird sich auch das Wasser im Punkt B verhalten, der aber vom Mond weiter entfernt ist als der Erdmittelpunkt und der deshalb vom Mond weniger angezogen wird als der Punkt A und der Mittelpunkt unseres Planeten Z. Im Punkt B wird deshalb die Zentrifugalkraft die Anziehungskraft überwiegen. Das Wasser wird sich auch an dieser Stelle möglichst weit von der Erdoberfläche zu entfernen versuchen, es wird ebenfalls anschwellen. Da sich unsere Erde in 24 Stunden (einem Tag) einmal um ihre Achse dreht, durchläuft jeder Teil der Erdoberfläche – mit Ausnahme der subpolaren Gebiete – im Verlaufe eines Tages zweimal die Stelle mit emporgehobener Wasserfläche. Flut und Ebbe wiederholen sich also im Verlaufe eines Tages an derselben Stelle der Erdoberfläche zweimal.

In der Praxis aber kompliziert sich diese Erscheinung dadurch



Inmitten des Meeres die charakteristische Silhouette der Träneninsel

außerordentlich, daß nicht nur die Erde, sondern auch der Mond in ununterbrochener Bewegung ist, und auch dadurch, daß sich ihre Entfernung – und damit die Gravitationswirkung des Mondes auf die Erde – ständig ändert. Auf Ebbe und Flut wirkt auch die Sonne ein, außerdem der ablenkende Einfluß der Erdrotation (der Corioliseffekt), die Reibung des Wassers am Boden, Ufer usw. Die größte durch die Flut verursachte Abweichung der Meeresoberfläche vom normalen Pegel wurde in der Fundy-Bay an der Küste Neuschottlands in Nordamerika beobachtet (15 bis 20 m), in der Bucht von Bristol in England (bis 12,5 m), im Südosten Patagoniens (14 m) und an der Küste Koreas (9 m). Auf hoher See ist das durch die Flut verursachte Anschwellen der Meeresoberfläche gering, weil hier der sekundäre Einfluß der Küste unwirksam bleibt. So erreicht zum Beispiel die Flut auf der Insel St. Helena nur 0,9 m, auf Ascension 0,6 m, auf den Azoren 1,8 m und auf Tahiti

schließlich nur 0,4 m. Die mächtigste Flut entsteht dann, wenn den Meridian eines gegebenen Ortes nicht nur der Mond, sondern gleichzeitig auch die Sonne durchläuft, also bei Neumond und Vollmond. Dann verbindet sich die auf die Meeresoberfläche wirkende Anziehungskraft des Mondes mit der Anziehung der Sonne, und es entsteht die sogenannte Springflut, die im ersten und letzten Mondviertel entsteht, wenn die vom Mond verursachte Flut in die Zeit der von der Sonne verursachten Ebbe fällt und umgekehrt. In dieser Zeit sind Ebbe und Flut am schwächsten.

Die vom Mond hervorgerufenen Gezeitenkräfte wirken auf die Erde nicht nur durch eine periodische Hebung des Meeresspiegels, sondern auch durch eine Hebung der festen Erdrinde und die Ausdehnung der Erdatmosphäre. Die durch den Mond hervorgerufenen periodischen Hebungen der Erdrinde erreichen aber – im Unterschied zum Meer – nur eine Amplitude von etwa 0,2 bis 0,4 m. Weitere Bewegungen der Erdrinde mit Gezeitencharakter werden durch indirekte Wirkung des Mondes hervorgerufen, durch die Gezeiten des Wassers. Ebbe und Flut des Meeres bewirken nämlich Veränderungen in der Belastung der Ränder des Festlandblockes und die damit zusammenhängenden Bewegungen in der festen Erdrinde, die sich ebenfalls in einem periodischen Steigen und Sinken äußern, dem Anschwellen der festen Oberfläche unseres Planeten.

Die „Gezeiten" in der irdischen Atmosphäre zeigen sich in einem halbtägigen, täglichen oder monatlichen Schwanken des Luftdruckes, besonders in der Äquatorgegend unseres Planeten. In Europa kann man solche Veränderungen aus den Barometerkurven nicht nachweisen, weil der Einfluß der atmosphärischen Gezeiten hier durch die bedeutend stärkere Wirkung der Drucktiefs, der Zyklone, gestört wird. Störend wirken auf ihre Beobachtung auch die plötzlichen Veränderungen in der Temperatur der Erdatmosphäre. Die warme Luft ist bekanntlich dünner als die kalte, und darum ist sie auch „leichter". Luft, die zum Beispiel durch die Wirkung höherer Temperaturen bestimmter Gegenden der Erdoberfläche erwärmt wurde, steigt aufwärts und bewirkt damit an



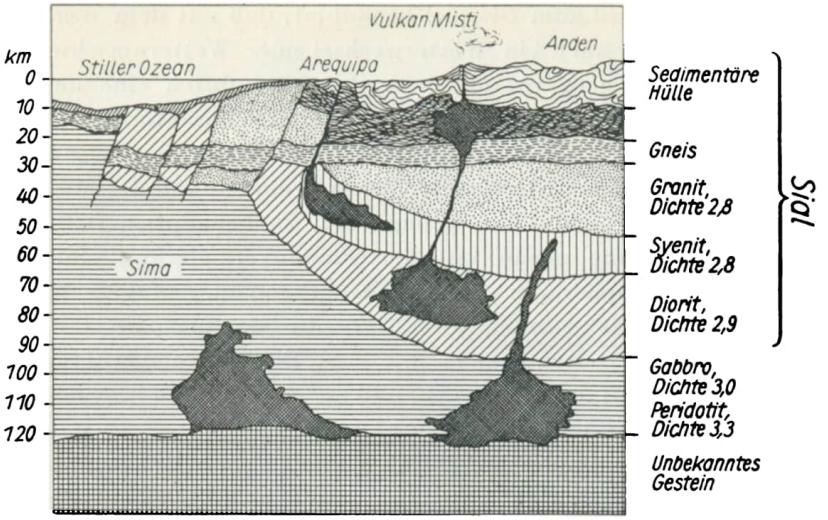
Ebbe (Bildarchiv des Deutschen Instituts für Länderkunde. Foto Prof. Gellert, Potsdam)

der gegebenen Stelle ein vorübergehendes Absinken des atmosphärischen Druckes, das an dieser Stelle völlig die Wirkung der atmosphärischen Gezeiten verwischt. Die Existenz der Gezeiten in der irdischen Atmosphäre wurde erstmalig im meteorologischen Observatorium in Djakarta (Indonesien) nachgewiesen.

Die Wirkung des Mondes auf die Erdatmosphäre ist also unbestritten. Der Mond ruft mit seiner Anziehungskraft in der irdischen Lufthülle „Ebbe und Flut" hervor, die an die Gezeiten der Meeresoberfläche erinnern. Diese Wirkung des Mondes kann sich aber keinesfalls in jener Summe atmosphärischer Erscheinungen an der Erdoberfläche widerspiegeln, die der Charakter des Wetters hervorbringt. Der Glaube, daß der Mond auf das Wetter wirkt, ist sehr

verbreitet. So wird zum Beispiel behauptet, daß mit dem Wechsel der Mondphasen auch ein Wetterwechsel oder Wetterumschwung eintritt. Unsere geographischen Breiten sind durch eine außergewöhnlich große Veränderlichkeit des Wetters charakterisiert; und oft vergehen bis zu einer bedeutenden Veränderung kaum vier oder fünf Tage. Weil die Vertreter der Theorie vom Einfluß des Mondes auf das Wetter nicht kühn genug sind, zu behaupten, daß die Wetterveränderung genau mit der Phasenveränderung eintritt, lassen sie einen Spielraum von mehreren Tagen zu. Auf diese Weise wird ihre „Theorie" ständig „bestätigt". In Gegenden, wo sich das Wetter nur sehr selten ändert, wie zum Beispiel in den Tropen, käme niemand auf den Gedanken, daß die Mondphasen irgendeinen Einfluß auf Wetterveränderungen hätten.

Der Einfluß des Mondes auf die meteorologischen Erscheinungen der Erde wurde in vielen Arbeiten untersucht, aber immer zeigte sich, daß der vermeintliche Einfluß des Mondes auf den Verlauf eines bestimmten meteorologischen Vorganges tatsächlich auf einem zufälligen Zusammentreffen von Umständen beruhte. Im übrigen kommen vom physikalischen Standpunkt nur zwei Arten in Betracht, wie der Mond die Entwicklung des Wetters beeinflussen könnte, und zwar durch die Gravitation und außerdem durch die Wirkung der eigenen Strahlung. Die Gravitationswirkung des Mondes auf die irdische Atmosphäre ist so klein, daß sie praktisch unberücksichtigt bleiben kann, und ebenso gilt das von der Wirkung der Bestrahlung der Erde durch den Mond. Die Sterngröße des Vollmondes beträgt $12{,}55^{m}$, die der Sonne $26{,}6^{m}$. Nach der bekannten Pogsonschen Beziehung zwischen den Sterngrößen bedeutet das, daß das Licht des Vollmondes etwa 465 000 mal weniger intensiv ist als das Sonnenlicht. Das Licht und die „Wärme" des Mondes sind in Wirklichkeit so klein, daß die gesamte Strahlung, die uns der Mond im Laufe eines Jahres liefert, jener Strahlungsmenge gleichkommt, die uns die Sonne in der Zeit von etwa 13 Sekunden schenkt. Daraus ist ersichtlich, daß auch die Wärmewirkung des Mondes auf die irdische Atmosphäre völlig unbedeutend ist.



Schnitt durch die Erdkruste (Südamerika). Nach A. Snieberg

Die Gesamtwirkung der Gravitation des Mondes auf die ganze Erde ist aber bedeutend. So entsteht zum Beispiel durch die gemeinsame Wirkung der Anziehung des Mondes und der Sonne auf den festen Erdkörper eine besondere kegelförmige Bewegung der Erdachse im Raum, die sogenannte Präzession, deren Periode etwa 26000 Jahre umfaßt. Die Folge der Präzession ist eine ununterbrochen fortschreitende Veränderung der Lage des Himmelsäquators. Damit verschiebt sich auch der Schnittpunkt des Himmelsäquators mit der Ekliptik, der Frühlingspunkt, der der Ausgangspunkt für die Festlegung der Koordinaten der Himmelskörper ist, die sogenannte Rektaszension und Deklination. Die durch die Präzession (lunisolare Präzession) hervorgerufene Bewegung des Frühlingspunktes geschieht so, daß sich der Frühlingspunkt auf der Ekliptik rückläufig bewegt, das heißt von Osten nach Westen. In einem Jahr verschiebt sich der Frühlingspunkt um 50,37″.

Durch die Präzession ändert sich am Himmel ununterbrochen nicht nur die Lage des Himmelsäquators und des Frühlingspunktes und

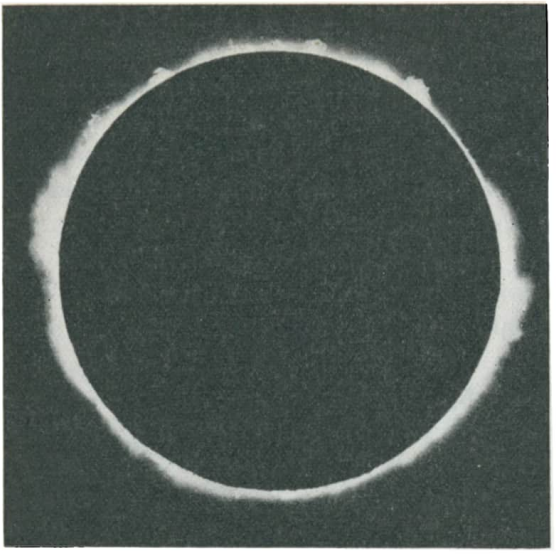
damit auch unser ganzes himmlisches Koordinatennetz (bei Sternkarten müssen wir darum immer angeben, für welches Jahr sie gelten), sondern auch die Lage der Himmelspole. So lag zum Beispiel im Jahre 2600 v. u. Z. der Himmelsnordpol in der Nähe des Sternes α im Sternbild des Drachen. Dieser Stern war damals also Polarstern, der Stern in nächster Nähe des Poles, der sich scheinbar an der täglichen Himmelsbewegung nicht beteiligt. Jetzt vertritt seine Aufgabe ein Stern im kleinen Wagen (Bären), der „Polarstern". Im Jahre 7600 wird ein Stern aus dem Sternbild Cepheus Polarstern sein, nach 12000 Jahren ein Stern aus dem Sternbild der Leier, die bekannte Wega, heute der hellste Stern unseres Sommerhimmels.

Der Mond bewirkt mit seiner Anziehungskraft noch eine weitere Bewegung der Erde, die sogenannte Nutation, eine kurzperiodische Schaukelbewegung der Erdachse, die mit der Präzession zu einer einzigen gemeinsamen Bewegung zusammenfließt. Die Amplitude dieser Veränderung beträgt 9,21″ und ihre Periode 18,6 Jahre. Die Nutation hängt mit der bereits erwähnten Bewegung der Knotenlinie der Mondbahn zusammen, also mit der periodischen Veränderung der Orientierung der Mondbahn im Raum.

Die Anziehungskraft des Mondes auf die Erde spielte eine wichtige Rolle schon in der fernen Vergangenheit der Erde, und nach Ansicht vieler Forscher ist ihr früherer Einfluß auf die Erde auch in der heutigen Konfiguration der Erdoberfläche sichtbar, in ihrer gegenwärtigen Verteilung von Land und Meer.

Sonnen- und Mondfinsternisse

Eine Sonnenfinsternis entsteht, wenn der Mond bei seinem Lauf um die Erde im Raum eine solche Lage einnimmt, daß er uns beim Blick von der Erde den Sonnenball verdeckt. Je nachdem, wie groß gerade der scheinbare Monddurchmesser am Himmel ist, wie weit der Mond von uns entfernt ist, entsteht eine sogenannte totale



Die Corona und die Protuberanzen der Sonne bei totaler Sonnenfinsternis

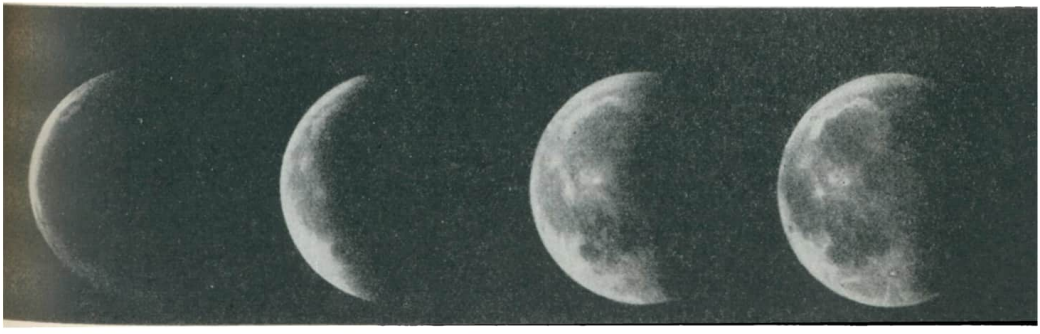
Verschiedene Phasen der totalen Mondfinsternis vom 29./30. Januar 1953

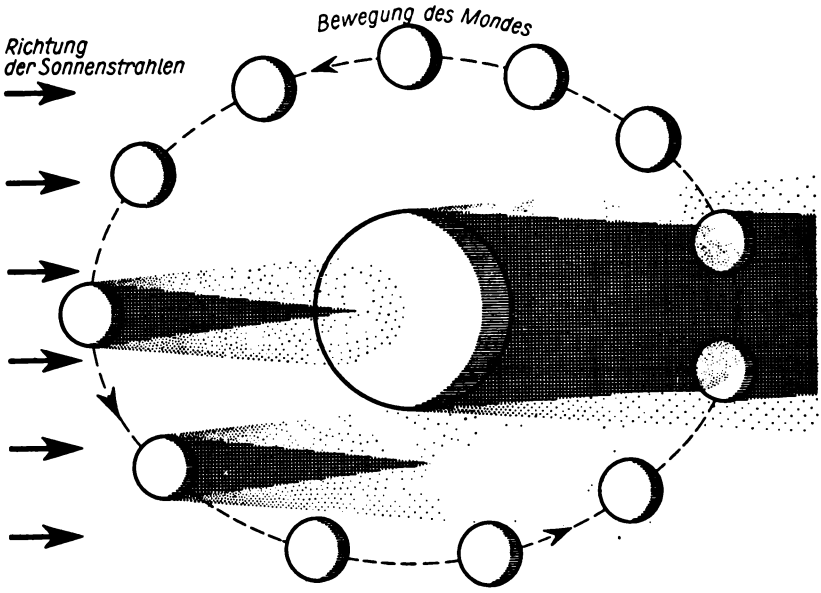


Sonnenfinsternis, der Mond verdeckt also den gesamten Sonnenball, oder eine ringförmige Finsternis, wenn der Mond nur einen bestimmten inneren Teil des Sonnenballes verdeckt. Wenn der Mond bei seiner Bewegung über die Sonne das Zentrum des Sonnenballes „meidet", entsteht eine sogenannte teilweise oder partielle Sonnenfinsternis, der Mond verdeckt also nur einen Teil der Sonne.

Die Sonnenfinsternis kann ebenso wie die Mondfinsternis nur bei einer ganz bestimmten Stellung von Sonne, Mond und Erde im Raum eintreten. Wenn die Mondbahn mit der Ekliptik identisch wäre, wiederholte sich die Sonnenfinsternis regelmäßig bei jedem Neumond. Weil aber die Mondbahn von der Ekliptik um etwa 5 ° abweicht, kann eine Sonnenfinsternis nur dann entstehen, wenn sich der Mond als Neumond gleichzeitig in der Nähe eines der Knoten seiner Bahn befindet, das heißt in der Nähe eines der Schnittpunkte seiner Bahn mit der Ekliptik. Diese Stellung von Sonne, Mond und Erde im Raum wiederholt sich jeweils in 18 Jahren und 10 Tagen: nach 223 synodischen Monaten. Es ist sehr wahrscheinlich, daß dieser Zyklus schon den alten chaldäischen Astronomen unter der Bezeichnung „Saros", Wiederholung, bekannt war. Nach Ablauf des Saroszyklus wiederholen sich die gleichen Verfinsterungen der Sonne, denn der Mond gerät nach dieser Zeit wieder in denselben Knoten und tritt in dieselbe Ausgangsphase ein.

Wie auf unserer Abbildung zu sehen ist, fällt bei der Sonnenfinsternis der vom Mond in den Raum geworfene Schatten auf die





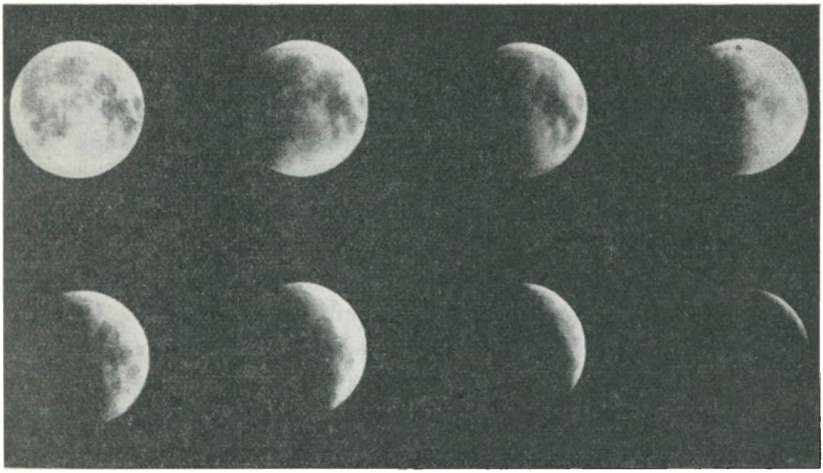
Entstehung einer Sonnenfinsternis (links) und einer Mondfinsternis (rechts)

Erdoberfläche. Dieser Schatten besteht im wesentlichen, wie der Schatten jedes festen, undurchsichtigen, einseitig beleuchteten Körpers, aus zwei Teilen: aus dem konvergierenden Kegel des Kernschattens und dem divergierenden Kegel des Halbschattens. Der Beobachter auf der Erde sieht die verschiedenen Finsternisse, je nachdem, welcher Teil des Mondschattens ihn erreicht. Erreicht ihn der Kernschatten, so sieht er eine totale Sonnenfinsternis, gerät er in den Halbschatten, so sieht er nur eine partielle. Da der Kernschatten und ebenso der Halbschatten des Mondes bei Sonnenfinsternis nur einen bestimmten, räumlich genau begrenzten Teil der Erdoberfläche erreichen können, vermag man Sonnenfinsternisse nicht auf der ganzen Taghalbkugel der Erde zu beobachten, sondern nur von einigen Gebieten aus. Durch die Bewegung des Mondes um die Erde und auch die Rotationsbewegung der Erde

während der Finsternis entsteht eine Bewegung des Mondschattens auf der Erdoberfläche, die von West nach Ost verläuft. Dadurch entsteht auf der Erde die sogenannte Zone der totalen Finsternis oder Totalitätszone und die Zone der partiellen Finsternis. Die Breite der Zone der totalen Finsternis richtet sich nach der Nähe des Mondes. Im Durchschnitt beträgt sie etwa 160 km. Nach ihrer Breite richtet sich die Dauer der totalen Finsternis, die maximal 7,5 Minuten beträgt.

Ein Beobachter auf dem Mond würde freilich eine vom Mond hervorgerufene „Sonnenfinsternis" als Erdfinsternis wahrnehmen. Diese Finsternis wäre aber für den Beobachter auf dem Mond eine bedeutend weniger auffallende Erscheinung, als es zum Beispiel für uns eine Mondfinsternis ist. Der vom Mond auf die Erde fallende Halbschatten ist viel weniger intensiv, so daß ihn der Beobachter auf dem Mond überhaupt kaum wahrnehmen könnte. Den Kernschatten könnte man vom Mond aus nur als ganz kleinen, grau gefärbten Fleck beobachten, der gemächlich über die sichtbare Oberfläche des Planeten Erde wandert.

Verlauf der totalen Mondfinsternis am 17./18. November 1956



Eine Mondfinsternis entsteht, wenn der Mond in den Schatten der Erde eintritt. Hierbei handelt es sich um eine im gewissen Sinne der Sonnenfinsternis analoge Erscheinung. Wenn der Mond ganz in den Erdschatten eintritt, kommt es – ähnlich wie bei der Sonnenfinsternis – zu einer totalen Mondfinsternis. Durchläuft er ihn nur teilweise, so entsteht eine partielle Finsternis, und tritt er nur in den Halbschatten der Erde, so entsteht eine sogenannte Halbschattenfinsternis. Eine Mondfinsternis kann verständlicherweise nur dann entstehen, wenn der Mond gerade voll ist und sich gleichzeitig – wie das auch bei Sonnenfinsternis ist – in der Nähe eines der Knoten seiner Bahn befindet. Auch die Mondfinsternisse wiederholen sich in einem Zyklus von 18 Jahren und 10 Tagen. Darüber hinaus gibt es aber noch einen Zyklus von annähernd 900 Jahren, der insgesamt etwa 500 einzelne Mondfinsternisse umfaßt. Dieser Zyklus beginnt damit, daß der Mond zunächst den südlichen Teil des Erdschattens durchläuft, also partielle Verfinsterungen entstehen, die am Nordrand des Mondes verlaufen und bei jeder weiteren Mondfinsternis im Erdschatten weiter nördlich wandern. Dadurch kommt es nach einer Serie dieser partiellen Finsternisse zu einer Reihe totaler und schließlich wieder zu einer Serie partieller Finsternisse, aber diesmal im nördlichen Teil des Erdschattens, so daß der südliche Teil des Mondes verfinstert ist. In einem Saroszyklus, also in 18 Jahren und 10 Tagen, kommt es zu höchstens 29 Mondfinsternissen, wovon etwa die Hälfte partielle Finsternisse sind. Zum Unterschied von den Sonnenfinsternissen kann man Mondfinsternisse von allen Stellen der Erdoberfläche gleichzeitig beobachten, natürlich nur dann, wenn für diese Orte der Mond am Himmel steht.

Die Länge des irdischen Kernschattenkegels beträgt im Durchschnitt 108,5 Erddurchmesser, also etwa 1380000 km. In einer Entfernung von 30 Erddurchmessern, in der mittleren Mondentfernung, hat der Kegel des Kernschattens einen Querschnitt von etwa 9200 km, also etwa das Dreifache des Monddurchmessers. Durch den Einfluß der Erdatmosphäre werden aber diese geo-

metrischen Idealverhältnisse ein wenig verändert. Die Sonnenstrahlen, die die Atmosphäre unseres Planeten passieren, werden abgelenkt und gebrochen (Refraktion des Lichtes); sie dringen in den Kernschatten ein. Aus diesem Grunde dürfte die Spitze des Kegels nur in eine Entfernung von 20 Erddurchmessern reichen, also in eine Entfernung von etwa 254280 km, so daß eine Mondfinsternis überhaupt nicht entstehen könnte; der Erdschatten würde unter diesen Umständen die Mondoberfläche überhaupt nicht erreichen. Weil aber die in den Erdschatten eindringenden Sonnenstrahlen durch die Streuung und Absorption der Erdatmosphäre bedeutend geschwächt werden, kommt es doch noch zu einer Mondfinsternis; allerdings verschwindet der Mond auch bei totaler Verfinsterung nicht völlig, sondern bleibt schwach sichtbar. Es handelt sich also weniger um eine Finsternis als um eine Abschwächung oder Dämpfung des Mondlichtes.

Auch bei totaler Mondfinsternis können auf dem Mond mit dem Fernrohr zahlreiche Einzelheiten beobachtet werden, zum Beispiel die „Meere" des Mondes, manche besonders hellen Krater wie der Krater Aristarch. Die größte mögliche totale Mondfinsternis dauert 1 Stunde 42 Minuten, mit dem Anfang und Ende der partiellen Finsternis, die die totale einleitet und abschließt, 3 Stunden und 47 Minuten.

Der von der Erde in den Raum geworfene Schatten müßte einen elliptischen Querschnitt haben, der dem Meridianquerschnitt der Erde entspricht. In Wirklichkeit aber ist er weitaus flacher; das kommt hauptsächlich daher, daß die Dichte der Erdatmosphäre in gleichen Höhen der Erdoberfläche in Äquatornähe anders als über ihren Polargegenden ist. So wissen wir zum Beispiel, daß die sogenannte Tropopause, die Grenze zwischen der unteren und daher dichteren Schicht der irdischen Atmosphäre, der sogenannten Troposphäre, und der darüberliegenden Stratosphäre, am Äquator in einer Höhe von 17 km liegt, an den Polen in einer Höhe von nur 9 km. Die Erdatmosphäre ist also viel flacher als das feste irdische Ellipsoid.

Der auf den Mond geworfene Erdschatten wird außerdem auch durch den in der Erdatmosphäre vorhandenen Staub der theoretischen Größe gegenüber vergrößert. Dieser Staub ist noch in Höhen von rund 100 km über der Erdoberfläche enthalten. Nach den Forschungen von Z. Švestka und J. Bouška handelt es sich dabei zum Großteil um meteoritische Partikelchen, die sowohl das Anwachsen der Dichte als auch die geringe Vergrößerung des Erdschattens bewirken, die bis zu 2% beträgt (das sind bei der Entfernung des Mondes etwa 130 km). Der tschechoslowakische Astronom F. Link erarbeitete eine differenzierte Methode, mit deren Hilfe es möglich ist, aus der Beobachtung der Dichte des auf den Mond fallenden Erdschattens auch einige Eigenschaften der hohen Erdatmosphäre abzuleiten.

Bei uns bis zum Jahre 1970 sichtbare Mondfinsternisse
(Nach J. Bouška 1956)

Datum	Beginn der partiellen Finsternis	Beginn der totalen Finsternis	Ende der totalen Finsternis	Ende der partiellen Finsternis	Größe der Finsternis (in Monddurchmessern)
6./7. 7. 1963	21.32	—	—	0.28	0,72
25. 6. 1964	0.17	1.18	2.56	3.57	1,57
19. 12. 1964	1.51	3.03	4.07	5.19	1,18
14. 6. 1965	2.01	—	—	3.41	0,20
13. 4. 1968	4.06	5.21	6.17	7.32	1,13
17. 8. 1970	3.14	—	—	5.36	0,42

GEOGRAPHIE DES MONDES (SELENOGRAPHIE, SELENODÄSIE UND MONDKARTOGRAPHIE)

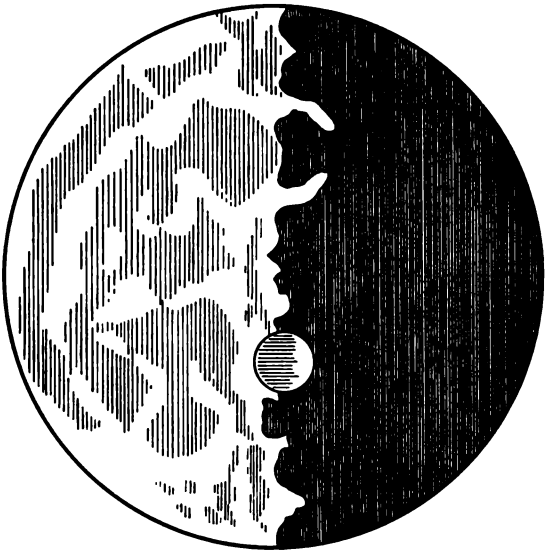
Eine Welt mit Bergen und Tälern

Schon bei Beobachtung mit dem bloßen Auge kann man dunklere und hellere Flecken auf dem Monde unterscheiden. Ihre Form, Intensität und Lage zueinander bleibt unverändert, so daß es sich nicht um Wolken handeln kann, wie zum Beispiel bei der Venus, sondern um Formationen, die der Mondoberfläche selbst angehören. Die menschliche Vorstellungskraft entdeckte in den Mondflecken schon vor langer Zeit die verschiedensten Formen. Ein besonders beliebtes Motiv dieser Vorstellungen wurde das menschliche Gesicht, das zum astronomischen Zeichen des Mondes wurde.
Aus der Existenz heller und dunkler Flecken auf dem Mond schlossen die Sternkundigen schon im 17. Jahrhundert, daß es auf dem Mond, ähnlich wie auf der Erde, Meere und Kontinente gibt. Die Bezeichnung Meer (lateinisch *mare*) für die dunklen Flecken an der Mondoberfläche erhielt sich bis heute, obwohl wir wissen, daß es auf dem Mond kein Wasser gibt. Ebenso verhält es sich mit den Bezeichnungen *lacus* (See), *palus* (Sumpf), *sinus* (Meerbusen, Golf) und anderen. Es ist interessant, daß einige Philosophen des Altertums (Plutarch) den Mond als eine Art Spiegel ansahen, in dem sich unsere Erde mit ihren Meeren und Kontinenten widerspiegelt. Demgegenüber vertrat der griechische Philosoph Anaxagoras vor 2400 Jahren die Ansicht, daß der Mond eine eigene Welt mit Bergen und Tälern ist. Die Richtigkeit dieser Meinung bewies aber erst Galileo Galilei, der im Jahre 1610 erstmalig den Mond mit einem Fernrohr anvisierte. Obwohl das erste Fernrohr Galileis nur etwa dreifach vergrößerte, vermochte er deutlich zu beobachten, daß der Terminator auf dem Monde keine fortlaufende Gerade bildete, sondern eine recht ungerade Linie. Galilei zog daraus den Schluß, daß die Mondoberfläche von Bergen bedeckt sei, und später versuchte er sogar, ihre Höhe zu errechnen. Obwohl ihm noch kein



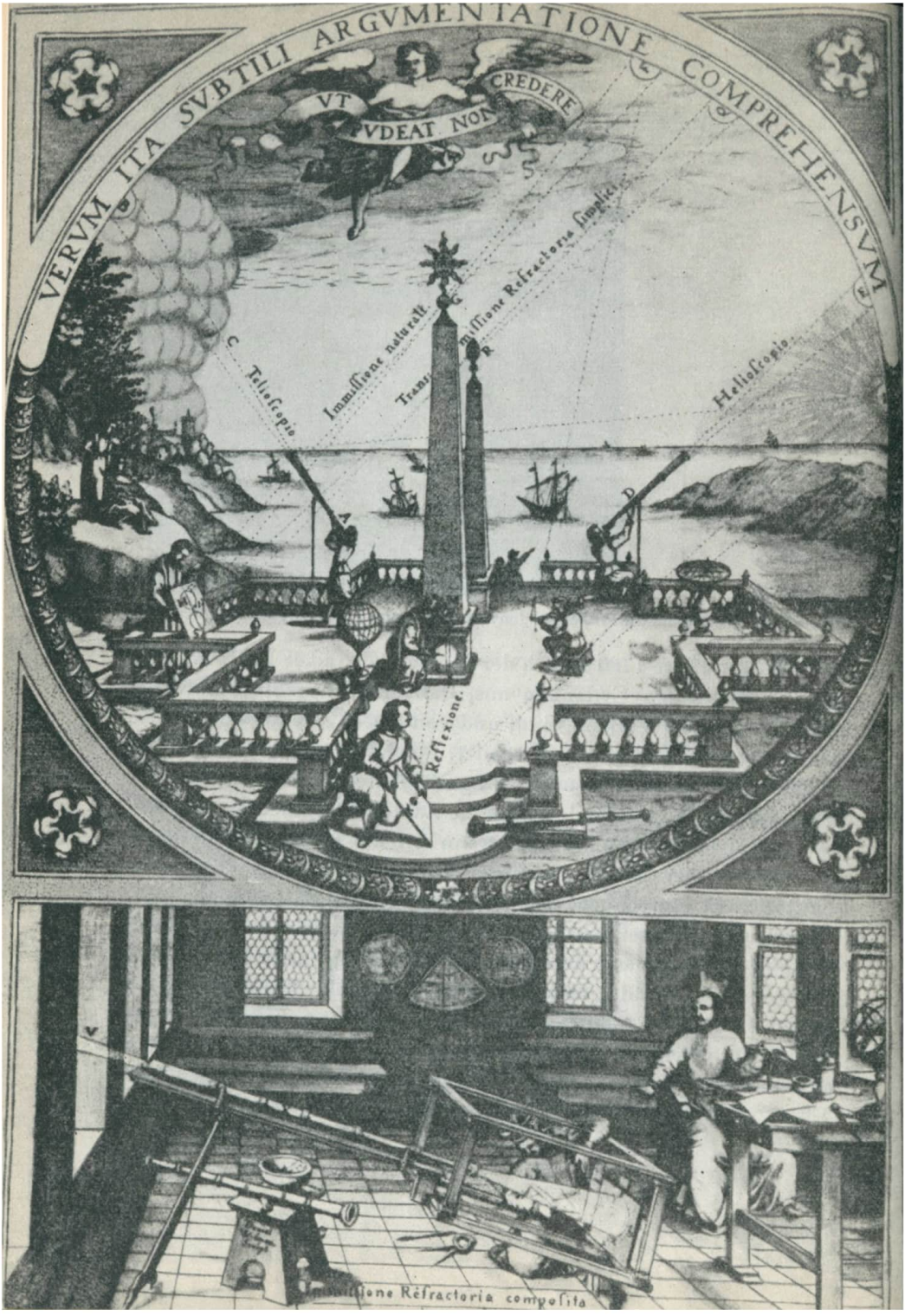
Foto durch ein kleines Fernrohr, das dem Anblick mit bloßem Auge entspricht.

Mikrometer zur Verfügung stand und er bei der Schätzung ausschließlich auf sein Auge angewiesen war, gelangte er zu dem Schluß, daß die Berggipfel auf dem Mond eine Höhe von etwa 8500 m erreichen, was etwa das Dreifache der Höhe der von ihm beobachteten Berge ausmacht. Die systematische Beobachtung des Mondes überzeugte ihn weiterhin davon, daß die Mondberge größtenteils Kreisform haben. Diese Entdeckung schien den Zeitgenossen Galileis besonders bemerkenswert, und viele davon, zum Beispiel Johannes Kepler (1571 bis 1630), kamen zu der kuriosen Meinung, daß die Mondkrater künstlich geschaffene Werke, nämlich Städte der Mondbewohner seien, die nach einem bestimmten Plan ausgehoben wurden, und daß die ausgeworfene Erde zur Errichtung von Verteidigungswällen dieser Städte diente. Als man aber bald darauf erkannte, daß es am Mond mehrere tausend dieser kreisförmigen Wälle gibt, und als auch ihre tatsächlichen Ausmaße festgestellt wurden. konnte diese Hypothese nicht aufrechterhalten



Galileis Zeichnung nach Beobachtungen mit einem schwach vergrößernden Fernrohr

werden. Im Jahre 1780 sprach der deutsche Physiker F. U. T. Aepinus erstmalig den Gedanken aus, daß die Ringgebirge auf dem Mond erloschene Vulkane sind, und von dieser Zeit an wird für sie die Bezeichnung Krater verwendet. Nachdem wir heute auf der Oberfläche des Mondes auch Dinge beobachten können, die nur 300 oder 200 m groß sind, wuchs die Zahl der beobachteten Mondkrater auf mehr als 40000 an, wenn wir die kleinsten, gerade an der Grenze der Sichtbarkeit der heutigen Fernrohre liegenden Krater nicht einrechnen, deren es noch ein Vielfaches mehr gibt. Daneben beobachten wir aber auf der Mondoberfläche eine Unzahl weiterer Formationen, deren exakte Einteilung in bestimmte, der Form nach verwandte Gruppen außerordentlich schwierig und aus diesem Grunde bis heute ziemlich uneinheitlich ist. Eine grobe Einteilung der Oberflächenformationen auf dem Mond können wir aber treffen nach Meeren, Kratern, Bergen und Gebirgen, Rillen und Tälern sowie hellen Flecken und Streifen.


VERVM ITA SVBTILI ARGVMENTATIONE COMPREHENSVM
VT VIDEAT NON CREDERE
Telescopio
Reflexione.
Helioscopio.
Refractione Refractoria composita

Meere

Die „Meere" auf dem Mond können wir schon mit bloßem Auge beobachten. Am besten kann man sie zur Zeit des Vollmondes sehen, und zwar hauptsächlich deshalb, weil uns dann das Meer durch den Kontrast mit seiner helleren Umgebung besonders dunkel erscheint. Wenn wir die Meere mit einem Fernrohr betrachten, erscheinen sie uns größtenteils als neutral grau gefärbte Ebenen. Die relative Glätte ihrer Oberfläche – verglichen mit dem umliegenden, größtenteils gebirgigen hellen Terrain – fällt besonders dann auf, wenn wir zu ihrer Beobachtung eine kleinere Vergrößerung benutzen. Die vorwiegend glatte Oberfläche der Meere bewirkt, wenn sie gerade vom Terminator überspannt wird, daß bei der Beobachtung des Mondes durch das Fernrohr die Kugelform des Mondkörpers viel stärker hervortritt, als wenn der Terminator des Mondes die hellen gebirgigen „Kontinente" schneidet. Benutzen wir aber zur Beobachtung der Meere eine stärkere Vergrößerung, so zeigt sich, daß die Oberfläche der Meere auch an den Stellen, wo sie keine größeren Unebenheiten, wie Krater, isolierte Berggipfel und ähnliches aufweist, nicht „ideal" glatt, sondern ziemlich gewellt und außerdem von weiteren sehr feinen Unebenheiten übersät ist, die besonders bei schräger Sonneneinstrahlung gut zu beobachten sind. Am häufigsten sind das die sogenannten Wülste oder „Bergadern", sehr flache, sich aderartig verzweigende Erhebungen, die wir ausschließlich in der Nähe des Mondterminators beobachten können, also nur bei sehr schräger seitlicher Beleuchtung, wenn sie merkliche Schatten werfen, so daß sie plastisch hervortreten. Die Neigung ihrer Hänge beträgt häufig nur 1 ° oder 0,5 ° und die tatsächliche Höhe oft nur einige Dutzend Meter. Nach G. Fielder (1957) beträgt die maximale Höhe der Wülste im Mare Serenitatis etwa 200 m. Stellenweise beobachten wir in den Meeren auch unbestimmt kreisförmige, elliptische oder auch unregelmäßig begrenzte

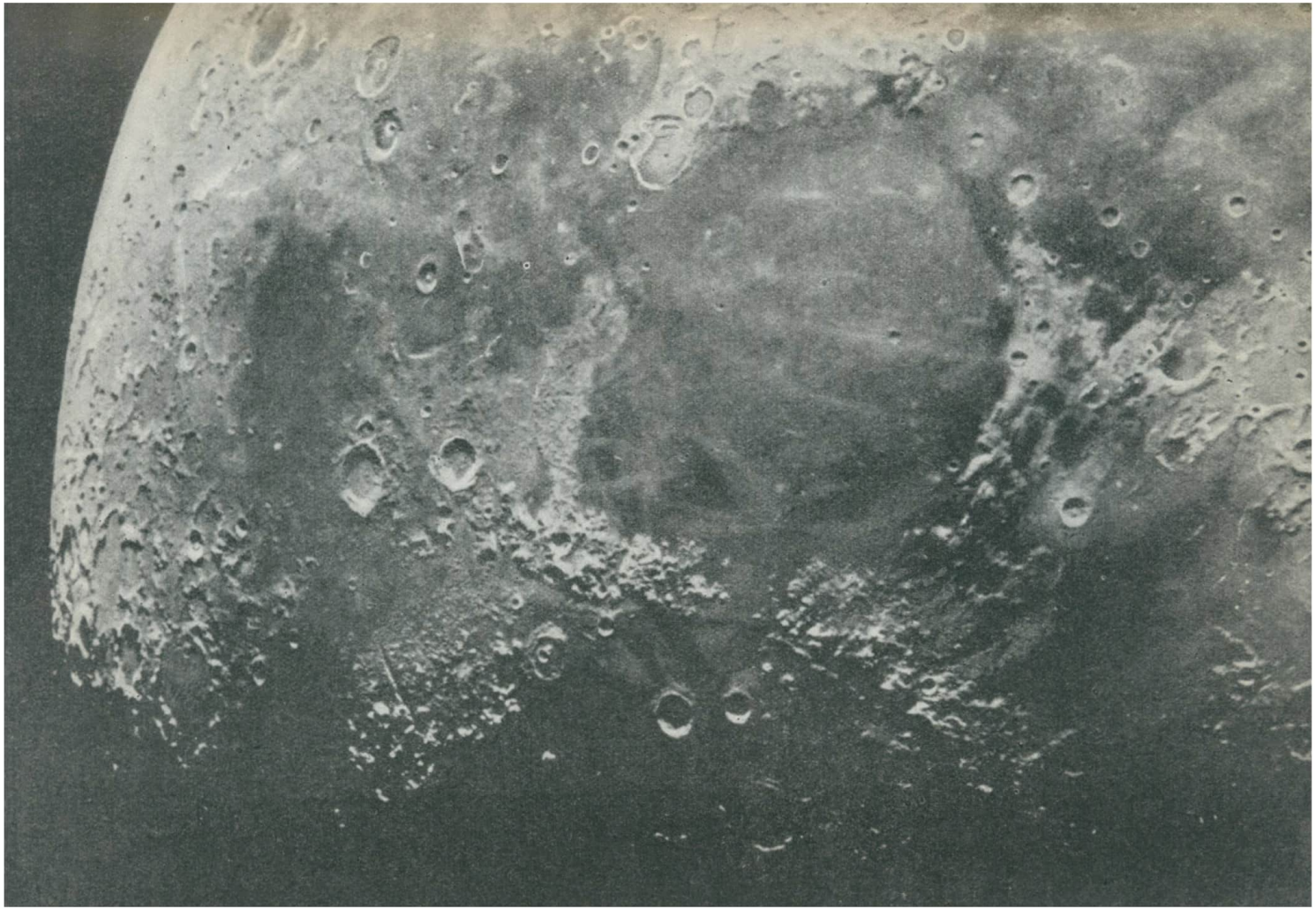
◀ Observatorium zu Beginn des 17. Jahrhunderts

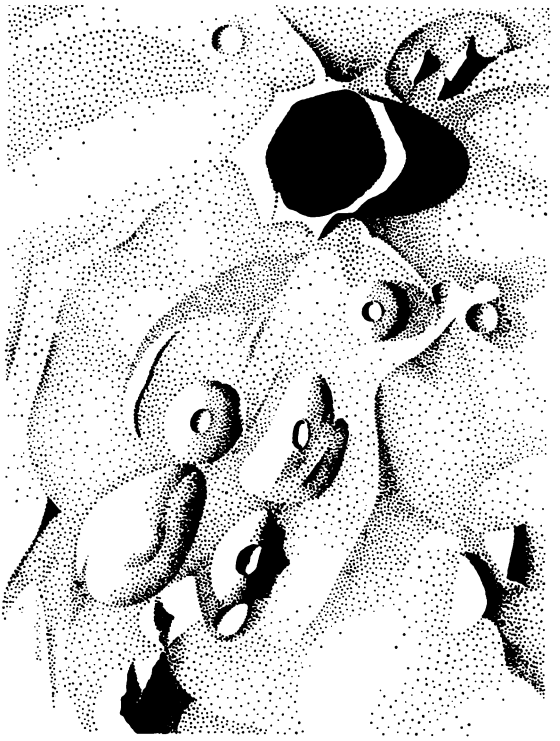
Erhöhungen, die an Blasen erinnern, wie sie sich an der Oberfläche von kochendem Grießbrei bilden, nur daß diese Blasen einen Durchmesser von mehreren Kilometern haben. Der deutsche Selenograph Ph. Fauth (1921, 1936) prägte für diese Formationen die sehr zutreffende Bezeichnung „Beulen". Diese Bezeichnung hat sich aber nicht erhalten, und an ihrer Stelle wird heute die Bezeichnung Dome verwendet, die aus dem englischen *dome* (Kuppel, Dom) übernommen wurde. Der tschechoslowakische Selenograph P. Příhoda schlägt dafür die sehr zutreffende tschechische Bezeichnung *kupy* (Haufen, Koppen) vor. Nach seinen Messungen erreichen diese interessanten Mondformationen maximal eine relative Höhe von einigen hundert Metern. Manche davon haben am Gipfel eine kleine kraterförmige Vertiefung. Es ist interessant, daß die Dome, ähnlich wie die Wülste, nur in den Randgebieten der Meere auftreten, niemals auf den Kontinenten.

Gewissermaßen den Gegensatz zur Formation der Dome bilden die sogenannten Depressionen. Es sind dies flache, runde Senken in der Mondoberfläche, manchmal von beachtlichen Ausmaßen, die sich größtenteils im Inneren großer Wallebenen befinden und jede Spur eines Ringgebirges oder Walles vermissen lassen, so daß man sie keinesfalls für Krater halten darf. Ph. Fauth (1921) nennt sie Dellen, was soviel wie flache Vertiefung, Rinne oder Schlucht bedeutet. Diese Bezeichnung benutzen auch die deutschen Geomorphologen, die damit flache, wasserlose Täler bezeichnen. Typische runde Monddepressionen finden wir zum Beispiel im nordwestlichen Teil des Bodens der bekannten Wallebene Ptolemäus auf dem Monde.

Wir haben bereits erwähnt, daß die Fläche der Meere im Vergleich zu den „Kontinenten" merklich dunkler ist. Offenbar kommt das daher, daß die Meere auf dem Monde im Unterschied zu den Kontinenten wahrscheinlich aus dunkler gefärbten Gesteinen bestehen; das Gesteinsmaterial der Meere ist ein anderes als das der Konti-

Weitere Umgebung des Mare Serenitatis auf dem Monde ▸





Dome (Kuppen) in der Nähe des Kraters Hortensius.
Zeichnung von P. Příhoda, 19. März 1959

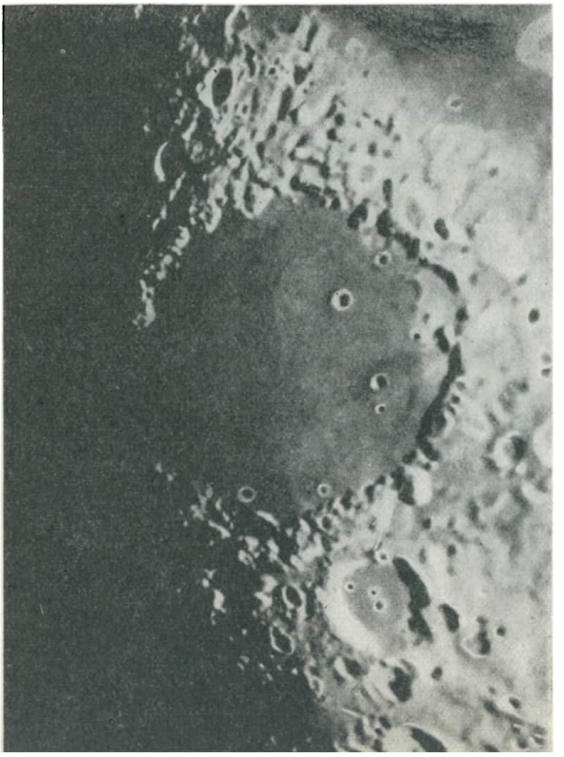
nente. Nach H. Quiring (1946) entsprechen die Mondkontinente den irdischen Kontinentalblöcken, also dem irdischen Sial, das aus sauren und heller gefärbten vulkanischen Gesteinen zusammengesetzt ist, während die dunkler gefärbten Mondmeere dem irdischen Sima entsprechen, das aus dunkleren basischen und ultrabasischen Mineralien besteht. Auf der Erde ist das Sima von den Ozeanen und ihren Ablagerungen bedeckt, so daß wir ihm auf der Oberfläche nirgends begegnen, am Mond aber ist es, entsprechend dem dortigen Mangel an Wasser, stellenweise völlig bloßgelegt. Eine ähnliche Ansicht äußerte J. E. Spurr (1944), der ebenfalls

meint, daß zwischen den die Mondkontinente bildenden Gesteinen, den sogenannten Lunabasen, sowohl hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung als auch hinsichtlich der Wichte ein grundsätzlicher Unterschied besteht. Das Niveau der Kontinente liegt durchschnittlich höher als das der Meere. Das zeugt davon, daß die Meere wahrscheinlich aus basischen Mineralien einer höheren Wichte bestehen als die Kontinente.

Die Richtigkeit der Ansicht, daß uns die Meere entblößte tiefere Partien von unteren Mondschichten darbieten, beziehungsweise die eigentliche äußere Mondhülle, wird aber durch die moderne Feststellung in Zweifel gezogen, daß die Meere im Durchschnitt nicht tiefer liegen als die Kontinente (siehe Seite 36). Nach R. S. Dietz (1946) und R. B. Baldwin (1949) ist es außerordentlich wahrscheinlich, daß die Meere erstarrte Lavaströme oder Lavafelder sind. Für diese Auslegung zeugt auch besonders die Existenz der sogenannten versunkenen Krater (ghost rings) und anderer Oberflächenformationen in den Meeren. Einzelne Berggipfel, Teile von runden Gebirgswällen usw. bestätigen auch, daß sich an der Stelle der heutigen Meere früher ein ähnliches gebirgiges Terrain wie auf den heutigen Kontinenten erstreckte. Diese ursprünglich gebirgigen Gegenden wurden dann von einem zusätzlich hier entstandenen dunklen Material bedeckt und eingeebnet; damit entstanden die heutigen, relativ „glatten Meere". T. Gold (1955) meint, daß dieses Material nicht Lava war, sondern feiner Staub, der sich durch die heftigen Temperaturschwankungen an der Mondoberfläche und die zerstörende Wirkung, die die kurzwellige Sonnenstrahlung auf die Mondgesteine ausübt, ununterbrochen auf den Kontinenten bildet und allmählich nicht nur die Meeresgegenden, sondern auch zahlreiche größere und kleinere Krater und andere Einbrüche der Mondoberfläche, wie zum Beispiel Gebirgstäler, ausfüllt. Aus Beobachtungen geht hervor, daß das dunkle Material der Meere nicht überall gleich tief ist. So sind zum Beispiel die runden, von Randgebirgen gesäumten Meere, wie das Mare Serenitatis, das Mare Crisium und das Mare Imbrium, offenbar um vieles „tiefer" als

Meere mit unregelmäßiger Form, zum Beispiel der Oceanus Procellarum, das Mare Nubium und andere. Das kann man daraus ersehen, daß die genannten versunkenen Krater in den Meeren der erstgenannten Art nur selten über ihre Oberfläche hinausragen, während diese Erscheinung bei den Meeren des zweiten Typus keineswegs zu den Ausnahmen zählt. Auf der Grundlage neuerer Analysen scheint es nicht wahrscheinlich, daß die Meere auf dem Mond von Staub erfüllt sind; weitaus wahrscheinlicher ist die Ansicht, daß die Meere durch die Bedeckung bestimmter Teile der Mondoberfläche mit Lava oder einem anderen ähnlichen Material entstanden, das später erstarrte und eine ausgedehnte Decke dunklen Gesteinsmaterials bildete, das sich merklich in seinen Eigenschaften von der übrigen Mondoberfläche unterscheidet. Die wahrscheinlichen Stellen der Entstehung dieses Materials waren augenscheinlich die genannten kreisförmigen und von Randgebieten umsäumten Meere, die an große Krater erinnern. Davon zeugt auch

Das Mare Crisium auf dem Monde gleicht einem riesigen Krater



die Tatsache, daß zahlreiche der unregelmäßigen Meere aus einem Material gebildet zu sein scheinen, das aus benachbarten kreisförmigen Meeren dorthin geflossen ist. So zeigt zum Beispiel der Oceanus Procellarum und das ganze ausgedehnte Mare Nubium auf dem Mond eine bemerkenswerte Beziehung zu dem benachbarten riesigen, kreisförmigen Mare Imbrium. Das Mare Tranquillitatis wieder scheint mit dem ringförmigen Mare Serenitatis zu einem genetischen Verband zu gehören.

Die Theorie, daß die Mondmeere durch die „Einebnung" der ursprünglich gebirgigen Mondoberfläche durch strömende Lava entstanden, bekräftigen auch die Ergebnisse der Forschungen mittels Radio-Echo-Methode (Reflexion von zum Mond gesandten Kurzwellenimpulsen), worüber der amerikanische Forscher J. H. Trexler (1958) berichtet. Theoretisch war schon früher vorhergesagt worden, daß das Echo einen steilen Anstieg und allmählichen Abfall und eine Bandbreite von etwa 50 kHz haben wird. Die Versuche zeigten aber, daß die Bandbreite nur etwa 10 kHz beträgt, was daraus zu erklären ist, daß 50% der Gesamtenergie des Echos aus dem Gebiet kommt, das in nächster Nähe jenes Punktes am Mond liegt, der der Erde am nächsten ist (Sinus Medii). Der Durchmesser dieser Gegend beträgt nur etwa 340 km. Die an den Widerhall von einer „glatten Kugel" erinnernde Form des Echos kann damit erklärt werden, daß in der betreffenden Mondgegend verhältnismäßig große glatte Flächen existieren, die ein überwiegendes Echo hervorrufen, das den unregelmäßigen Widerhall von den Bergen und Kraterwänden völlig überschattet. Nach J. Budějicky (1959) unterstützt die Form des Echos der nach dem Mond gesandten kurzen Impulse „die Theorie von der Überflutung der Mondoberfläche durch Lava, aus der nur die höchsten Gipfel hervorragen, so daß große, ozeanähnliche Gebiete entstanden, die mit der Zeit nur merklich uneben wurden".
Interessant ist die Beziehung der Meere zu den größten Mondkratern, den sogenannten Wallebenen, von denen wir noch hören



Der Sinus Iridum (Regenbogenbucht) am nördlichsten Rande des Mare Imbrium ist augenscheinlich eine riesige Wallebene, deren südlicher (auf dem Bilde oberer) Teil später zerstört wurde

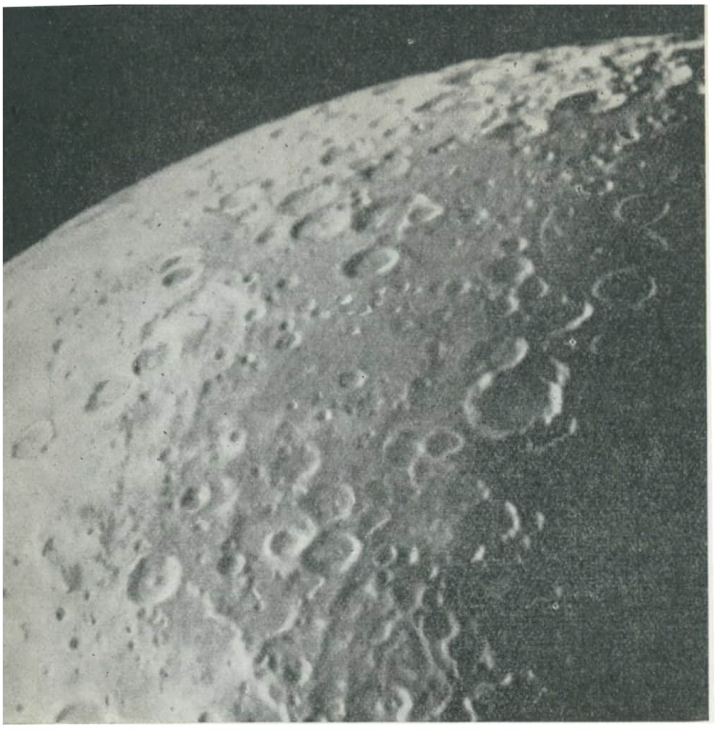
werden. Viele der großen Wallebenen erinnern im Gesamtaussehen an runde, von Randgebirgen gesäumte Meere, so daß es sehr schwer ist, eine scharfe Grenze zwischen den großen Wallebenen und den kleinen runden Meeren zu ziehen. So könnte zum Beispiel das kleine am Westrande der sichtbaren Mondhalbkugel liegende Mare Humboldtianum ebensogut für eine große Wallebene gehalten werden; demgegenüber könnten die Wallebenen Grimaldi und Bailly, deren Böden von auffallend dunklem Material bedeckt sind, als kleinere Meere angesehen werden. Ebenso könnte der Regenbogen-

golf (Sinus Iridum) am nordöstlichen Rande des Mare Imbrium für den Rest einer ursprünglichen großen Wallebene gehalten werden. Er hat Ähnlichkeit mit dem unvollständigen Gebirge in der Form eines gesäumten Kreises, dessen südlicher Teil sich in dem genannten Meer verliert. Er ist als Wallebene vielleicht in späterer Zeit durch ein in nächster Nähe entstehendes großes Meer teilweise vernichtet worden, während die übrigen großen Wallebenen in der Nähe des Südpoles des Mondes von diesem Schicksal verschont blieben. Es scheint, daß die Ähnlichkeit zwischen den Rundmeeren und den großen Wallebenen auf dem Mond nicht zufällig ist, sondern darauf beruht, daß die zu ihrer Entstehung führenden Kräfte dieselben waren.

Über die verschiedenen Farbabstufungen, die in den einzelnen Meeren beobachtet wurden, und über die wahrscheinliche Zusammensetzung ihrer Gesteine werden wir erst in einem der nächsten Kapitel sprechen, das der Zusammensetzung der Mondoberfläche gewidmet ist.

Krater

Obwohl die tatsächlichen Ausmaße der Krater sehr große sind, ist kein einziger davon der Beobachtung durch das unbewaffnete Auge zugänglich. Aus diesem Grunde war über ihre Existenz vor der Erfindung der Fernrohre überhaupt nichts bekannt. Zur Unterscheidung der Krater genügt schon ein ganz kleines Fernrohr, zum Beispiel ein Feldstecher mit sechsfacher Vergrößerung. Zu ihrer Beobachtung müssen wir uns aber eine günstige Zeit aussuchen. Die Mondkrater kann man nicht bei Vollmond beobachten, weil in dieser Zeit die Sonne die von der Erde aus sichtbaren Gegenden des Mondes fast senkrecht beleuchtet, so daß die einzelnen Unebenheiten der Meere und Kontinente nur ganz kurze Schatten werfen. Dadurch geht uns ihre natürliche Plastik verloren. Aber auch sonst kann man die Mondkrater nur in einem nicht sehr



Mondkrater können nur in einer nicht sehr breiten Gegend entlang dem Terminator gut beobachtet werden

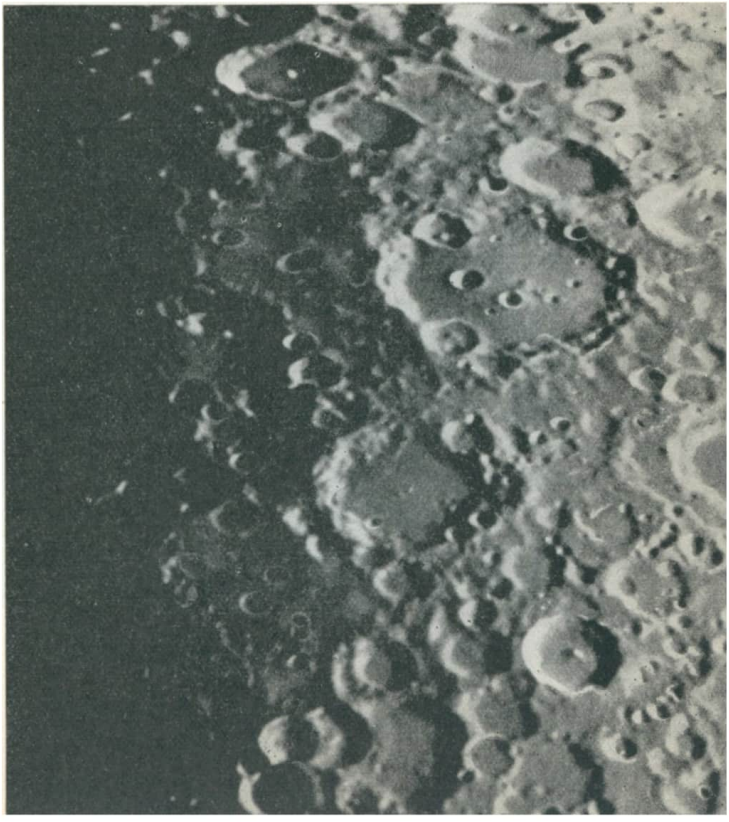
großen Gebiet längs des Terminators beobachten, also in den Gegenden des Mondes, die gerade von der aufgehenden oder untergehenden Sonne beleuchtet werden. Zur detaillierten Beobachtung der Krater, besonders zur Erforschung verschiedener Einzelheiten ihres Baues, der Form ihres Bodens usw., ist allerdings ein größeres astronomisches Fernrohr erforderlich. Die zahlreichen unter der Bezeichnung Krater vereinigten Besonderheiten der Formationen waren der Grund dafür, daß die Selenographen sie in verschiedene Kategorien unterteilten. Uns genügt es, wenn wir die Mondkrater in vier Haupttypen von Formationsgruppen einteilen: Wallebenen, Ringgebirge, eigentliche Krater, Kratergruben.

Wallebenen muß man als große Krater mit einem Durchmesser von 60 bis 330 km charakterisieren, die massive Bergwälle mit entweder zusammenhängenden oder häufiger unregelmäßigen, unterbroche-

nen zahlreichen Spalten und Tälern haben. Einige der Wallebenen, wie zum Beispiel die Wallebene Ptolemäus, sind ziemlich flach; ihr Boden liegt in verhältnismäßig geringer Tiefe unter dem Niveau ihrer Umgebung und ist bedeckt und ausgeglichen von einer offenbar ebenso dunklen Masse, der „Lava", der wir in den Meeren begegneten. Demgegenüber sind andere Wallebenen, zum Beispiel Clavius, von bedeutender Tiefe, und ihr unebener gebirgiger Boden liegt tief unter dem Niveau ihrer Umgebung.

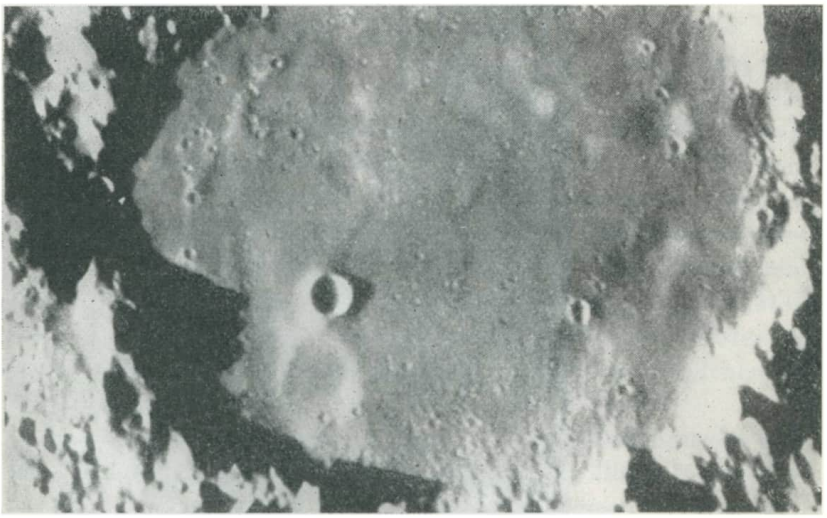
Bei großen Wallebenen beobachten wir, daß ihr Boden in der Mitte leicht erhöht ist, was sicherlich durch die großen Ausmaße dieser Formationen hervorgerufen wird. Der Boden dieser größten Mondkrater pflegt nämlich in Übereinstimmung mit der annähernd kugelförmigen Gestalt der Mondoberfläche gebogen zu sein. Mit den großen Ausmaßen der Wallebenen hängt auch eine andere

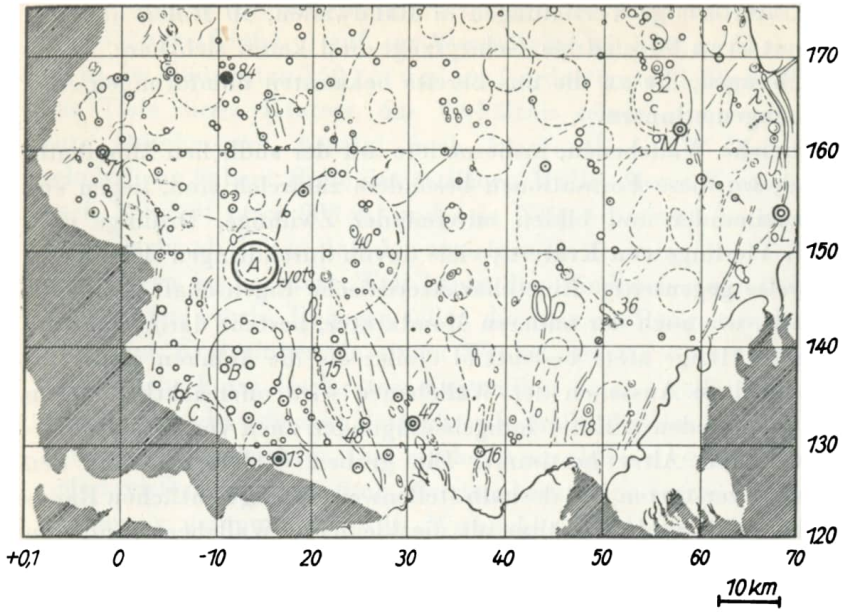
Wallebenen auf der südlichen Halbkugel des Mondes



interessante Tatsache zusammen. Auf dem Mond, einem der kleineren Himmelskörper, also einem Körper mit stärker gekrümmter Oberfläche, liegt der sogenannte Horizont (der den Teil der Oberfläche begrenzende Kreis, der vom Auge des Betrachters erreichbar ist) in bedeutend geringerer Entfernung vom Betrachter als auf der Erde, so daß ein Beobachter inmitten einer großen Wallebene nicht nur ihren Rand, sondern auch viele der Gipfel ihres begrenzenden Gebirgswalles nicht sehen könnte. Zur annähernden Berechnung der Entfernung des Horizontes vom Beobachter benutzen wir die Formel: Entfernung des Horizontes $= \sqrt{2\,R\,h}$, wobei R der Erdhalbmesser und h die Höhe des Betrachterauges über der Erdoberfläche ist. Bei der Errechnung der Entfernung des Horizontes auf dem Mond setzen wir an die Stelle von $2\,R$ den Monddurchmesser, also annähernd 3500 km. Setzen wir weiterhin für h 1,6 m ein, was der durchschnittlichen menschlichen Augenhöhe entspricht, so erhalten wir für den Mond eine Entfernung des Horizontes von

Teil der Wallebene Ptolemäus. Auf S. 93 eine detaillierte Karte vom Inneren des auf der Photographie festgehaltenen Ptolemäus





$\sqrt{3500 \cdot 0{,}0016} = 2{,}4$ km. Auf einer Mondebene würden wir also nur in eine Entfernung von 2400 m sehen können, auf der Erde in eine Entfernung von etwa 4800 m. Wie wir sehen, ist das bedeutend weniger, als der Durchmesser der meisten Krater beträgt, die mit kleineren Fernrohren zu beobachten sind. Dementsprechend würde ein 2200 m hoher Berggipfel, der auf der Erde noch aus einer Entfernung von etwa 118 km zu sehen ist, auf dem Monde schon bei einer Entfernung von annähernd 88 km hinter dem Horizont verschwinden.

Es ist selbstverständlich, daß uns große Fernrohre eine ganze Reihe weiterer Einzelheiten innerhalb der Wallebenen zeigen, zum Beispiel kleine Krater, verschiedene Erhebungen, Rillen und ähnliches. Ph. Fauth (1936) beschreibt im Inneren der Wallebene Ptolemäus insgesamt 267 verschiedene Einzelheiten, darunter 19 kreisförmige Depressionen, 9 runde, kraterförmige Einbrüche, die von unregelmäßigen Wällen umgeben sind, 120 kleine Krater und Kratergruben,

19 kraterförmige Vertiefungen in Randwällen, 10 Rillen und insgesamt etwa 90 niedrige Gebirgszüge und kaum sichtbare, flache Erhebungen, die an die uns bereits bekannten domförmigen Aufwölbungen erinnern.

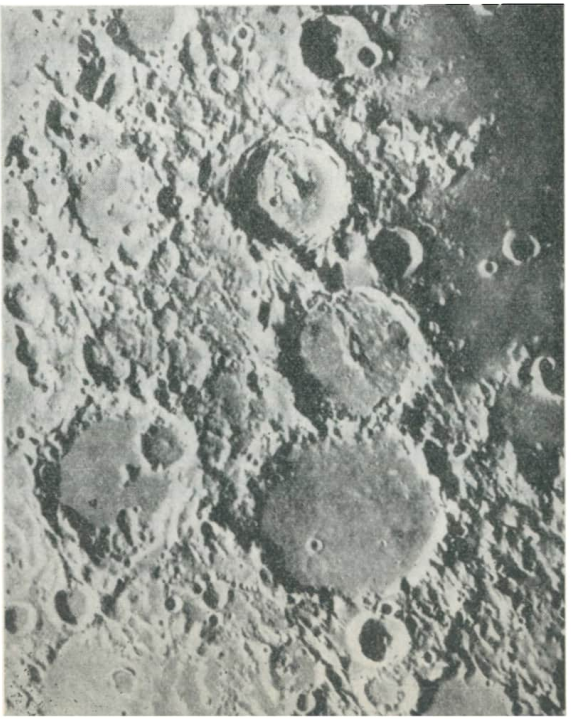
Zahlreiche Wallebenen, insbesondere auf der südlichen Mondhalbkugel, wo diese Formationen besonders zahlreich sind, liegen eng nebeneinander und bilden miteinander Zwillinge, Drillinge oder sogar Vierlinge von Kratern; viele davon durchdringen sich hierbei teilweise gegenseitig. Eine charakteristische Eigenschaft der Wallebenen, wie auch der anderen Mondkrater, besteht darin, daß ihre inneren Hänge stets bedeutend steiler als die äußeren sind. Das verschiedene Aussehen der Wallebenen wird offensichtlich neben den verschiedenen Entstehungsbedingungen auch von ihrem unterschiedlichen Alter bestimmt. Die großen Wallebenen mit den ziemlich zerstörten und deshalb stellenweise wenig deutlichen Randwällen sind wohl weit älter als die kleineren Wallebenen mit den perfekten und gut erhaltenen Wällen. Typische Wallebenen sind zum Beispiel die Krater Bailly, Clavius, Longomontanus, Ptolemäus, Plato, Archimedes.

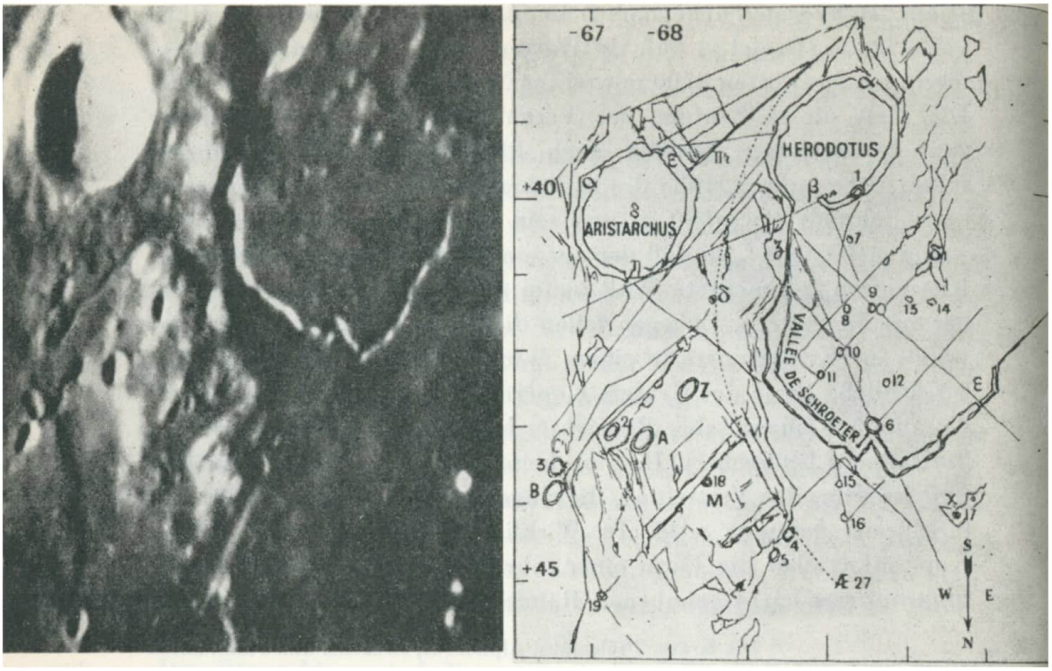
Die Ringgebirge sind Krater geringerer Ausmaße als die Wallebenen. Sie besitzen einen Durchmesser um 20 bis 100 km und gewöhnlich einen terrassenförmigen Ringwall und einen oder mehrere zentrale Hügel innerhalb des Kraters. Typische Vertreter dieser Art von Mondkratern sind zum Beispiel die Krater Arzachel, Theophilus, Tycho, Kopernikus, Aristarchus und Aristillus.

Eines der bekanntesten und schönsten Ringgebirge ist der Krater Kopernikus, der in vieler Hinsicht auch für andere Mondkrater typisch ist. Er wurde schon von J. H. Schröter (1788) beobachtet und gezeichnet. Später beschäftigten sich mit ihm besonders W. Beer und J. H. Mädler (1837), W. G. Lohrmann (1878), A. Secchi und E. Neison (1876), J. Schmidt (1878) und Ph. Fauth (1936). Nach ihren Forschungen mißt der Krater Kopernikus im Durchmesser etwa 90 km; die mittlere Höhe seiner Ringgebirgswälle, vom Kraterboden aus gemessen, beträgt 3000 bis 3500 m; einzelne

seiner Gipfel ragen aber nach Schmidt im Osten bis zu einer Höhe von 3320 m (Gipfel γ) auf, im Westen sind sie 3438 m hoch (Gipfel α), im Südwesten 3500 m und im Nordosten schließlich 3950 m. Die Tiefe dieses Kraters, das Verhältnis seiner „inneren" Höhe zum Durchmesser, beträgt nach Ph. Fauth 1 : 27. Die durchschnittliche äußere Hülle des östlichen Walles dieses Kraters mißt nach Schmidt etwa 900 m, und sein Neigungswinkel beträgt nur wenig mehr als 1 °, so daß der aus einer Entfernung von mehreren Kilometern beobachtete Wall kaum den Eindruck eines Gebirges hervorrufen würde. Dagegen fallen die inneren Hänge des Kraterwalles ins Kraterinnere in einem Winkel von 8,5 ° bis 9 ° ab. Die tatsächliche Form des Kraters Kopernikus ist also völlig anders als die, die ihm ein irdischer Betrachter beimißt, der ihn bei schrägem Sonnenlicht beobachtet. Ihm erscheint sie als eine verhältnismäßig tiefe kreisförmige Vertiefung, die ringsherum von einem steilen Gebirgskranz gesäumt wird. In Wirklichkeit hat aber der Krater Kopernikus eher die Form einer sehr flachen tellerartigen Vertiefung mit nur leicht gehobenen Rändern. Es wäre sehr schwer, ein

Die Krater Ptolemäus, Alphonsus, Arzachel und Flammarion





Umgebung der Krater Aristarch und Herodot und topographische Karte derselben Gegend mit den von der Internationalen Astronomischen Gesellschaft anerkannten Bezeichnungen

stark verkleinertes und dabei doch in allen Einzelheiten getreues Modell dieser Formation zu schaffen. Zum Beispiel hätte der Krater Kopernikus auf einer plastischen Mondkarte im Maßstab 1:1 500 000 einen Durchmesser von 6 cm, während sein gebirgiger, reich gegliederter Wall eine „Höhe" von nur etwa 2,2 mm erreichte.

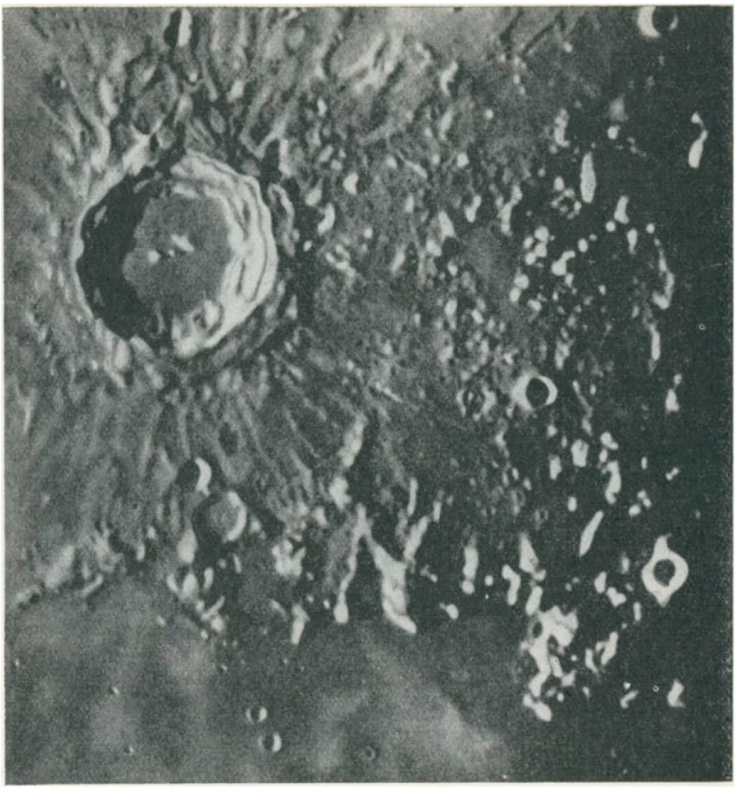
Der Wall des Kraters Kopernikus ist nicht genau kreisförmig, sondern hat eher die Form eines unregelmäßigen und komplizierten Vieleckes mit abgerundeten Ecken. In der Mitte des Kraters erhebt sich ein isoliertes Zentralgebirge, dessen östlicher Gipfel nach Schmidt eine Höhe von 640 m erreicht, der westliche von ungefähr 590 m. Demnach liegen die höchsten Gipfel dieses zentralen

Gebirges etwa 1750 m unter dem Niveau der Umgebung und volle 3900 m unter dem Niveau der höchsten Gipfel des Kraterwalles.
Die eigentlichen Krater sind im Durchschnitt kleiner als die Ringgebirge. Sie erreichen eine Ausdehnung von 5 bis 80 km und unterscheiden sich von jenen dadurch, daß sie einen regelmäßigen einfachen Wall haben – ohne terrassenförmig angeordnete innere Hänge – und daß sie keine deutlichen Zentralgipfel aufweisen. Die Neigung der inneren und äußeren Hänge ist bei den eigentlichen Kratern gewöhnlich größer als bei Ringgebirgen. Beispiele dieser Kategorie von Mondkratern sind die Krater Abulfeda, Abenezra, Herodot, Picard, Bessel und zahlreiche andere Krater in den Mondmeeren und Kontinenten.
Die Kratergruben sind die kleinsten Krater, die größtenteils auch mit großen Fernrohren kaum gesehen werden können. Sie besitzen einen kleinen oder überhaupt keinen Wall und Durchmesser von mehreren hundert Metern bis zu einigen Kilometern. Ihre Tiefe ist meist so unerheblich, daß sie schon 24 Stunden nach Sonnenaufgang (der mittlere Tag auf dem Mond dauert bekanntlich 354 Stunden 22 Minuten und 1,3 Sekunden) ihre plastische Form verlieren und uns aus den Augen verschwinden. Zahlreiche dieser Formationen sind durch ihre unregelmäßige Form und durch die bei anderen Mondkratern völlig ungewöhnliche Gestalt – Ellipse, Quadrat oder sogar Rechteck – interessant. Zum Unterschied von den anderen Mondkratern weisen sie sehr oft die Tendenz zur Gruppierung auf, und zwar manchmal zu einer auffallenden, fast zusammenhängenden Linie. Besonders häufig finden wir sie an Rillen, wo sie manchmal so eng aneinandergedrängt sind, daß man nur schwer entscheiden kann, was eine einfache Spalte oder gewöhnliche Rille in der Mondoberfläche und was eine Reihe kleiner Krater ist. Es scheint, daß diese unregelmäßig begrenzten Kratergruben entwicklungsmäßig mit einigen Rillen zusammenhängen. Eine ähnliche Beziehung wie zu den Rillen haben viele Kratergruben auch zu größeren Kratern, besonders zu Wallebenen und Ringgebirgen. So finden wir zum Beispiel in der Umgebung vieler Wallebenen und

Ringgebirge ganze Linien von Kratergruben, die auffallend den Umrissen (Wällen) dieser Krater folgen. Offenbar ist diese Erscheinung zufällig. Nach D. Alter (1957) haben einige Kratergruben auch eine bestimmte Beziehung zu den Domen. An vielen Stellen des Mondes finden wir nämlich gemischte Linien von Domen und Kratergruben. Allerdings gibt es auch recht viele isoliert liegende Kratergruben, die keine Beziehung zu Rillen und anderen Oberflächenformationen haben. Das alles zeigt deutlich, daß in dieser Kategorie von Mondkratern offenbar Formationen vertreten sind, deren Entstehung und Beschaffenheit verschieden sind.

Berge und Gebirge

Berge und Gebirge auf dem Mond unterscheiden sich insgesamt deutlich von sogenannten Kettengebirgen der Erde, zum Beispiel von den Alpen, den Karpaten und dem Himalaja. Das hängt offenbar damit zusammen, daß auf dem Mond das Wasser fehlt und daß es dort folglich nicht zur Verwitterung und Sedimentation (Ablagerung) kommt. Die genannten irdischen Gebirge entstanden nämlich alle aus ursprünglich horizontal gelagerten Schichten ozeanischer Sedimente (Tiefseeschlamm, epikontinentalen Ablagerungen flacher Meere an den Rändern der Kontinente), die später durch seitlichen Druck zu Gebirgen aufgefaltet und dann durch den Einfluß zerstörender Faktoren (irdische Schwerkraft, Wasser, Frost, Gletscher, Wind) zu ihrer heutigen Form modelliert wurden. Auf dem Mond fehlen nicht nur Faktoren wie Wasser, Gletscher und Wind, sondern auch alle vom Wasser abgelagerten Mineralien, so daß die Entstehung ähnlicher Kettengebirge völlig ausgeschlossen ist. Auf unserer Abbildung (rechts) ist eine plastische Karte (Reliefdarstellung) eines typischen Kettengebirges der Erde, der Schweizer Alpen, zu sehen und (links) die Photographie eines Teiles der lunaren Alpen. Der Vergleich dieser beiden Bilder ist sehr lehrreich. Wir sehen, daß sich die irdischen Alpen bogenförmig von



Das bekannte Ringgebirge Kopernikus. Darunter befinden sich die Karpaten und der südliche Teil des Mare Imbrium

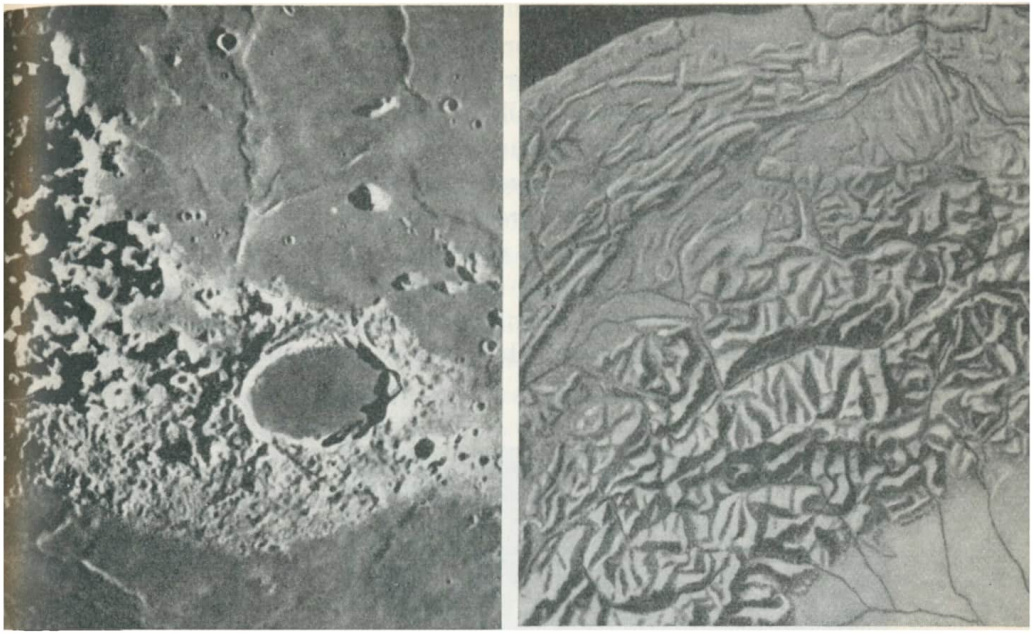
Südwesten nach Nordosten ziehen und durch Längs- und Quertäler in eine Reihe mehr oder weniger selbständige Gebirgszüge gegliedert sind.

Auch die lunaren Alpen dehnen sich in einem mächtigen Bogen aus. Zum Unterschied von den irdischen Alpen aber bilden sie kein einheitliches Gebirgsmassiv, sondern setzen sich aus einzelnen, voneinander mehr oder weniger völlig isolierten Berggipfeln zusammen, deren Höhe nach Nordwesten (vom benachbarten Mare

Imbrium aus) allmählich sinkt. Nicht weniger interessant ist die Tatsache, daß die Hänge, die diesem Meere zugekehrt sind, weitaus steiler als die entgegengesetzten aufragen. Warum dem so ist, das begreifen wir leicht, wenn wir uns die früher geäußerte Meinung zu eigen machen, daß die von Randgebirgen – im Falle des Mare Imbrium sind das die lunaren Alpen, der Kaukasus, die Apenninen, die Karpaten – gesäumten runden Mondmeere eigentlich extrem große Wallebenen sind. Auch die Berghänge der Wallebenen fallen nach dem Kraterinneren zu steiler ab als nach außen.

Auch die Mondapenninen haben, grob gesehen, die gleichen Umrisse wie die lunaren Alpen. Allerdings machen die Apenninen auf uns den Eindruck einer weitaus kompakteren Gebirgsformation. Die Alpengipfel sind nämlich voneinander relativ bedeutend weiter entfernt, als das bei den Apenninen der Fall ist, und der Raum zwischen ihnen ist mit einer dunklen Masse angefüllt. Es scheint, als wären die Alpen, die vielleicht ursprünglich wie die Apenninen aussahen, später etwas abgesunken und als hätten sich ihre Täler teilweise mit dieser dunklen Masse gefüllt, die aus dem benachbarten Mare Imbrium hier eindrang. Die Alpen wären also zum Unterschied von den Apenninen ein teilweise „versunkenes" Mondgebirge, beziehungsweise ein versunkener Teil eines ursprünglich vielleicht einheitlichen oder beinahe einheitlichen Walles einer riesigen Wallebene, des Meeres, das heute Mare Imbrium genannt wird.

Neben den typischen Ringgebirgen, die die einzelnen Mondmeere säumen, finden wir auch viele Gebirge, einzelne Gebirgs„kämme" und isolierte Gipfel, die anscheinend keinerlei Beziehung zu den anderen Oberflächenformationen haben. Bei näherer Untersuchung zeigt sich aber, daß der größte Teil dieser Gebirge eine bestimmte Beziehung zu nahen Meeren oder Kratern hat. So bildet zum Beispiel das über 500 km lange Altai-Gebirge, das im südwestlichen Mondquadranten liegt und sich vom Ostrand des Kraters Piccolomini bis zum Krater Tacitus zieht, in Wirklichkeit einen mächtigen, bis 3500 m hohen Gebirgsbogen, der in einigem Abstand den Ost-

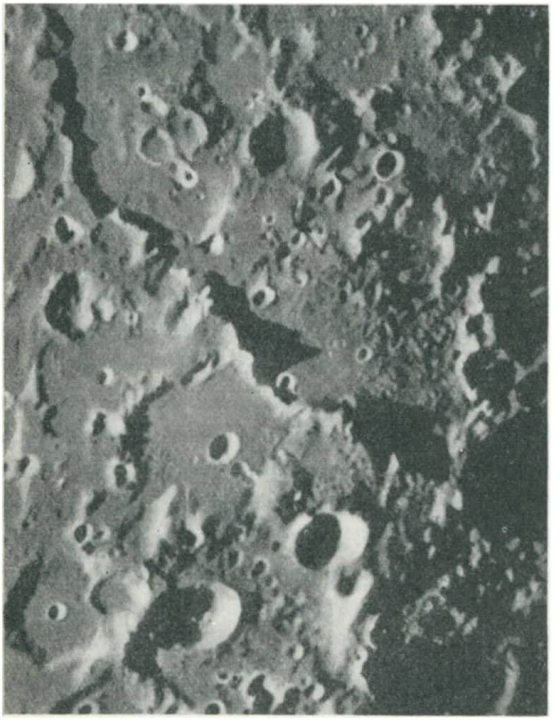


Auf dem linken Bild der Krater Plato und die Mondalpen, rechts ein plastisches Modell der Schweizer Alpen

rand des kleinen Mare Nectaris säumt. Sein Gegenstück auf der anderen Seite des Mare Nectaris bildet ein nicht so gleichmäßiger Bogen von Bergkuppen, der die Krater Neander, Borda, Mc Clure und Colombo kreuzt. Es leuchtet ein, daß es sich hier um einen ähnlichen Fall handelt wie bei dem riesigen Kratermeer Mare Imbrium. Jedoch sind die Bergwälle um das Mare Nectaris weniger gleichmäßig, und die dunkle Masse bedeckt auch nur einen bestimmten inneren Teil der riesigen Wallebene. Die verhältnismäßig scharfe Linie des Altai und seine zum Mare Nectaris sehr steilen Hänge lassen vermuten, daß bei seiner Entstehung auch ein teilweises Absinken der ganzen Gegend um den östlichen Rand des heutigen Mare Nectaris eine gewisse Rolle spielte. Solche Einbrüche in der Mondkruste, durch die es zu Senkungen und wohl auch zu Hebun-

gen bestimmter Teile der Mondoberfläche kam, finden wir auf dem Mond in großer Zahl. Einer der typischsten Fälle dieser Art ist die sogenannte Gerade Wand oder Lange Wand (Straight Wall), auf den Mondkarten auch als Wall β (val β) bezeichnet. Diese interessante Formation befindet sich südöstlich von dem bekannten kreisförmigen Ringgebirge Arzachel, ungefähr zwischen den Kratern Birt und Thebit. Sie erreicht eine Länge von 104 km und sieht in kleineren Fernrohren wie eine anscheinend gerade Bergwand aus, die im Norden in dem kleinen Krater D mit einem Durchmesser von 5,5 km endet. Die ersten Mondbeobachter hielten diese Formation für ein von den Mondbewohnern errichtetes Ge-

Das Altaigebirge



bilde (Bauwerk). Spätere Forschungen zeigten aber deutlich, daß es sich keineswegs um eine regelmäßig und künstlich erbaute „Mauer" handelt, sondern um einen Bruch in der Mondoberfläche. An ihm entlang sank die östlich davon gelegene Landschaft um etwa 250 m ab. Dadurch entstand gewissermaßen eine nach Osten gerichtete hohe Stufe. An anderen Stellen des Mondes, zum Beispiel im Mare Nubium, finden wir andere Arten von Gebirgen. Das sind zum Beispiel die Gebirge Riphaeus und Ural und viele andere in ihrer nächsten Umgebung, deren Gesamtcharakter darauf hinweist, daß sie eigentlich Kratertrümmer sind, also Reste zerstörter Wallebenen, die sich einstmals, vor der Entstehung dieses Meeres, hier befanden, also Reste eines ursprünglichen, heute schon lange untergegangenen gebirgigen Festlandterrains. Ein Beweis dafür, daß sich an den Stellen der Mondoberfläche, die heute von Meeren bedeckt sind, früher runde Gebirgsformationen, Krater, befanden, sind die zahlreichen gut erhaltenen versunkenen Krater, von denen wir schon früher sprachen. Ein typisches Beispiel dafür ist die versunkene Wallebene in der Nähe des Kraters Flamsteed im südöstlichen Teil des Oceanus Procellarum. Wenn wir sie bei Vollmond beobachten, erscheint sie uns als weißlich begrenztes Oval mit einem Durchmesser von etwa 96,5 km. Der Krater Flamsteed, dessen Durchmesser demgegenüber nur 14,5 km beträgt, liegt inmitten dieser Formation, und zwar eng an ihrem südlichen Rande. Die zum größten Teil versunkenen Randgebirge dieser heute unter der Mondoberfläche begrabenen Wallebene erheben sich aus dem Oceanus Procellarum im Süden zu einer Höhe von nur etwa 46 m, während sie im Südosten zu einer Höhe von 334 m aufragen. Nach H. P. Wilkins (1920, 1923) kann man bei schräger Beleuchtung im Inneren dieser versunkenen Wallebene etwa fünf Hügel und eine größere Anzahl Krater und kraterartige Vertiefungen beobachten. Nicht alle versunkenen und durch spätere Veränderungen an der Mondoberfläche eingeebneten alten Krater sind so gut zu sehen wie gerade diese eben beschriebene Wallebene. Von zahlreichen Kratern blieben nur unvollständige Reste der Wälle übrig,

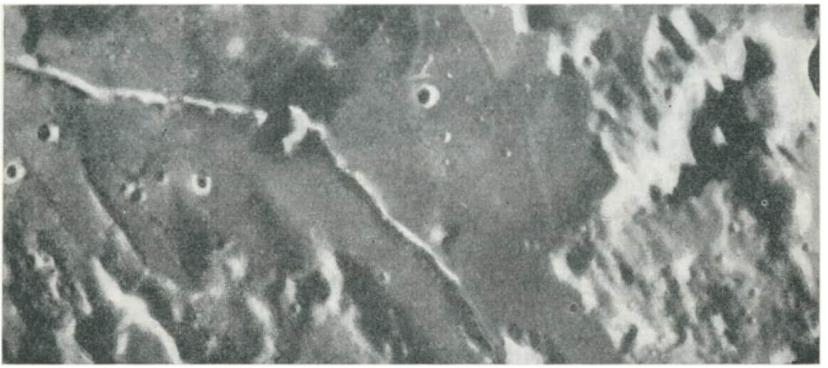
von vielen anderen völlig unbedeutende Bodenwellen in der Gegend heutiger Meere, und andere scheinen spurlos verschwunden zu sein.

Im Jahre 1957 veröffentlichte V. A. Firsoff eine interessante Arbeit über die sogenannte Paläographie des Mare Nubium und des Mare Imbrium, worin er die Ergebnisse seiner Erforschung der Oberfläche dieser Meere bei sehr schräger Sonnenbeleuchtung mitteilt. In dieser Zeit ragen auf der Mondoberfläche infolge der erhöhten Plastik des Terrains auch die kleinsten Erhebungen und andere Unregelmäßigkeiten des Geländes hervor. Firsoff stellte fest, daß in diesen Mondgebieten teils fast ganz ausgeglichene, teils auch ziemlich gut erhaltene Spuren recht großer Krater vom Charakter der Wallebenen bis zu kleinen Meeren vorhanden sind. So liegen zum Beispiel in der Nähe des heutigen Kraters Kopernikus bis jetzt bemerkbare Reste eines riesigen Kratermeeres mit einem Durchmesser von mehr als 600 km; seine westliche Grenze reicht vom Rande des heutigen Ringgebirges Eratosthenes südlich bis zum Krater Lambert und östlich bis zum Krater Kepler. Firsoff nennt es Mare Copernicanum.

Viele Autoren sprechen von Hochebenen, und sie bezeichnen mit diesem Wort bestimmte sehr gebirgige und recht hoch über ihrer Umgebung liegende Teile der Mondoberfläche, deren Gipfel ziemlich unregelmäßig nebeneinander liegen, ohne jegliche Tendenz zur Bildung von Reihen, Bogen oder Ringen, wie wir das bei den Randgebirgen der Meere oder Krater beobachten. Den Charakter einer Hochebene hat zum Beispiel nach H. P. Wilkins und A. P. Moore (1957) der westliche Teil des Mare Humorum, die Gegend südlich vom Mare Crisium und die Umgebung des Mare Tranquillitatis. Es ist nicht ausgeschlossen, daß es sich hierbei um die Reste eines Terrains handelt, dessen Form sich mehrmals verändert hat, um ein Gebiet mit den Resten lange ausgeglichener Wallebenen, Krater und vielleicht auch eines Gebirges, auf dem es später zu keiner Entstehung neuer größerer Oberflächenformationen kam, wie das in anderen Gegenden des Mondes der Fall ist.

Rillen und Täler

Rillen gehören bis auf einige Ausnahmen zu den Formationen der Mondoberfläche, deren Beobachtung nur großen Fernrohren vorbehalten bleibt. Eine der seltenen Ausnahmen bildet in dieser Beziehung die breite Rille, die den Krater Hyginus schneidet; sie erreicht eine Länge von vielen Dutzend Kilometern und eine durchschnittliche Breite von mehr als 1300 m. Sie ist auch mit kleinen astronomischen Fernrohren zu sehen. Sie wurde bereits von J. H. Schröter (1745 bis 1816) entdeckt. Die meisten Rillen haben

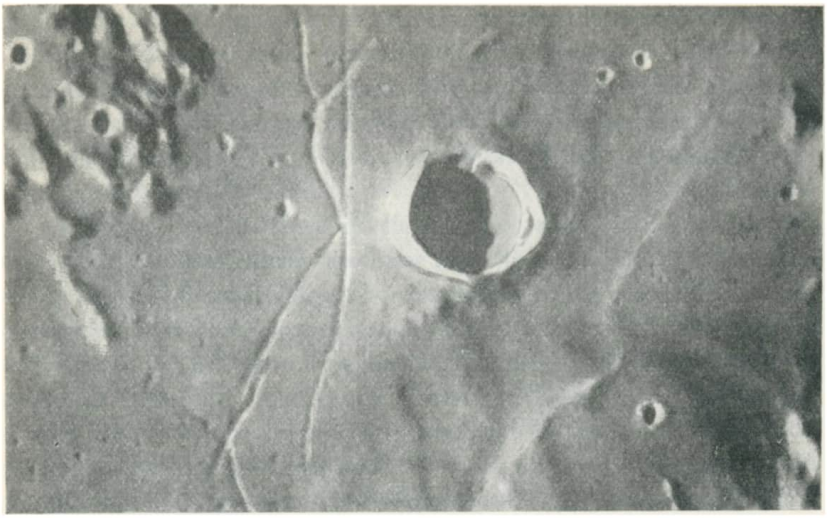


Die den Krater Hyginus durchziehende Rille

das Aussehen verhältnismäßig sehr feiner Spalten verschiedenster Formen und Ausmaße. Ihre Breite beträgt gewöhnlich einige Dutzend Meter bis zu einigen Kilometern und die Länge bis zu mehreren Dutzend Kilometern. In gewissem Maße ungeklärt bleibt vorläufig die Frage nach ihrer Tiefe. Nach J. Nasmyth (1874) sind diese sogenannten echten Rillen (rills) bis zu 16 km tief, was wohl ziemlich überschätzt ist. E. Neison (1876) und T. G. Elger (1895) sind demgegenüber der Ansicht, daß die Rillentiefe 180 m nicht übertrifft. Nach H. P. Wilkins und A. P. Moore (1957) ist es am klügsten, anzunehmen, daß die von uns als Rillen beobachteten tatsächlichen Risse in der Oberfläche selten eine Tiefe von 800 m überschreiten;

gewöhnlich sind sie nur 90 m tief, auch wenn viele von ihnen vielleicht eine Verbindung mit den ziemlich tiefen Rissen unter der Oberfläche haben. Soweit es sich um echte Rillen handelt, also einfache, offene Spalten in der Mondoberfläche, beobachten wir meist, daß sie sich in der Richtung auf ihre Enden zu verengen und gleichzeitig tiefer werden. Ihre breitesten Teile sind meist am flachsten. Im Jahre 1956 beobachtete G. Fielder von der bekannten französischen Sternwarte auf dem Pic du Midi durch den 24zölligen Refraktor sehr sorgfältig die bekannte Rille, die sich vom Krater Ariadaeus ostwärts zieht. Die hervorragenden Beobachtungsbedingungen auf dieser Hochgebirgssternwarte erlaubten es ihm, bei der Betrachtung eine 1026fache Vergrößerung zu benutzen. Das ermöglichte ihm die Untersuchung dieses Mondgebietes bis in die kleinsten möglichen Einzelheiten. Er stellte fest, daß die Rillen tatsächlich bei weitem nicht so tief und gezackt sind, wie dies früher behauptet wurde, und daß auch ihre Ränder nicht scharfkantig sind, sondern gewissermaßen abgerundet. Die Tiefe der Rillen ist weitaus geringer als ihre Breite. Besonders interessant ist der Umstand, daß der Boden der Hauptrille beim Ariadaeus über ihre ganze Länge in der Mitte in der Form eines niedrigen Gebirgszuges erhöht ist, an dessen beiden Seiten der Boden konvex gewellt verläuft. Fielder kommt zu dem Schluß, daß man diese Rille kaum als einfachen, von Lava erfüllten Riß in der Mondoberfläche betrachten kann.

Es ist interessant, daß wir Rillen nur in den zentralen Teilen der Mondscheibe feststellen können; in der Nähe des Nord- und Südpoles des Mondes und ebenso in der Nähe seines westlichen und östlichen Randes wurden bisher überhaupt keine beobachtet. Dieser Tatsache wurde früher eine tiefere Bedeutung beigemessen. Man behauptete, daß die große Zahl von Rillen inmitten der der Erde zugekehrten Mondhalbkugel von einem durch die Anziehungskraft der Erde bewirkten „Zerfall" des Mondes zeugt. Diese Ansicht ist aber völlig falsch. Das Nichtvorhandensein von Rillen in den Randgebieten des Mondes ergibt sich offenbar daraus, daß die Rillen



Rillen in der Nähe des Kraters Triesnecker

wegen ihres geringen Querschnittes bei schräger Draufsicht durch die Perspektive verschwinden. Die meisten Rillen finden wir in den Randgebieten der Meere, wobei es besonders interessant ist, daß die Rillen in diesem Falle im Verhältnis zu den Rändern dieser Meere konzentrische Linien bilden. Sehr deutlich kann man diese Erscheinung am Mare Humorum beobachten. Nicht selten häufen sich die Rillen stellenweise zu mehreren gleichlaufenden und oft auch sich gegenseitig durchziehenden Reihen, die ein ganzes kompliziertes Netz von Rillen bilden, wie das zum Beispiel beim Krater Triesnecker der Fall ist. Viele Mondforscher waren früher der Meinung, daß die Rillen ausgetrocknete Betten ehemaliger Wasserströme sind. Dafür sprechen allerdings weder ihre Richtung noch ihre Form, die sich insgesamt nur recht wenig nach dem Gesamtrelief des entsprechenden Teiles der Mondoberfläche richten, den die Rille durchzieht. So kreuzen die Rillen häufig auch hohe einsame Felsenriffe, denen ein Fluß sicherlich ausweicht. Viele von ihnen beginnen ganz plötzlich in einer Ebene, verlaufen in nahezu

genau gerader Richtung, erweitern oder verengen sich kaum, außer am Rande, und verlaufen sich ebenso unvermittelt, wie sie begannen, inmitten eines hohen Gebirges. Komplizierte Wirbel, die von Geländehindernissen hervorgerufen werden und uns von irdischen Flüssen so gut bekannt sind, finden wir bei den Rillen überhaupt nicht.

Wie bereits angedeutet, sind viele dieser Rillen keineswegs enge „Risse" in der Mondoberfläche, sondern verhältnismäßig breite und flache Klüfte. Zu ihnen gehört zum Beispiel die mehrere Kilometer breite Rille in der Nähe des Zwillingskraters Aristarch und Herodot, die den Übergang zu einem sogenannten Tal bildet. Die bekannteste Formation dieser Art ist das 6 bis 10 km breite und etwa 130 km lange Alpental, das das Gebirgsmassiv der Mondalpen quer durchzieht. Ein anderes Beispiel einer solchen breiten Rille sind ein Tal westlich vom Krater Herschel und eine Reihe anderer ähnlicher Rillen in naher Umgebung. Schon G. K. Gilbert (1893)

Teil der Ariadaeus-Rille in der Nähe des Kraters Silberschlag.
Nach einer Zeichnung von G. Fielder vom Pic du Midi



beobachtete diese Formation; er machte als erster auf ihre interessante Beziehung zu dem nahen Mare Imbrium aufmerksam. Verlängern wir nämlich diese Rillen, Kerben und Furchen, wie sie auch manchmal in der englischen selenologischen Literatur genannt werden (furrows, grooves), in Richtung auf dieses Meer, so vereinigen sie sich annähernd im gleichen Punkt, der in der Nähe des Regenbogengolfes (Sinus Iridum) liegt. Manche dieser „radialen" Rillen zum Mare Imbrium sind sehr lang und reichen bis zum Mare Tranquillitatis und schließlich bis zu dem Krater Theophilus, wobei sie die Apenninen, das Mare Serenitatis und den westlichen Teil des Gebirges Haemus kreuzen. Man findet sie in der Umgebung des Mare Vaporum, des Sinus Medii; sie führen über das Mare Nubium bis in die Gegend des Kraters Fra Mauro. Man entdeckt sie auch nördlich vom Mare Imbrium; es gehören auch die erwähnten Alpentäler dazu. Ähnliche Radialtäler, offensichtlich tektonischen Ursprungs, kann man auch in der Nähe einiger anderer Mondmeere beobachten. Es ist klar, daß ihre Entstehung mit der Entstehung dieser Meere eng verknüpft war.

Wir erwähnten bereits, daß enge Beziehungen zwischen den Rillen und kleinen Kratern bestehen. Viele Rillen beginnen als sehr feine Risse, verbreitern sich dann, und zahlreiche unter ihnen (zum Beispiel die Rille in der Nähe des Kraters Hyginus) gehen dann plötzlich in eine Reihe kleiner Krater (Kratergruben) über, die viele Kilometer lang ist und am Ende wieder zu einer gewöhnlichen Rille wird. Ob auch größere Krater eine Beziehung zu den Rillen haben, ist bisher zweifelhaft. So führen zum Beispiel H. P. Wilkins und A. P. Moore (1957) an, daß sich das nach Šírek z Reity (1597 bis 1660) benannte Rheita-Tal (Rheita Valley), das „radial" zum Mare Nectaris verläuft, von dem Alpental und dem Tal westlich von Herschel durch sanftere Abhänge unterscheidet. Außerdem besteht es stellenweise aus den Resten alter zerfallener Krater. Viele andere Autoren sehen in diesem Tal eine Reihe ineinander übergehender größerer Krater, ähnlich der erwähnten Reihe von Kratergruben auf einer „Kluft". Unserer Ansicht nach kann man aber

das Tal Rheita nicht so ansehen. Der Umstand, daß dieses Tal statt durch ein Gebirgsmassiv durch eine Reihe von Trümmern ursprünglich eng nebeneinander aufgeworfener Krater verläuft, kann das Werk des Zufalls sein.

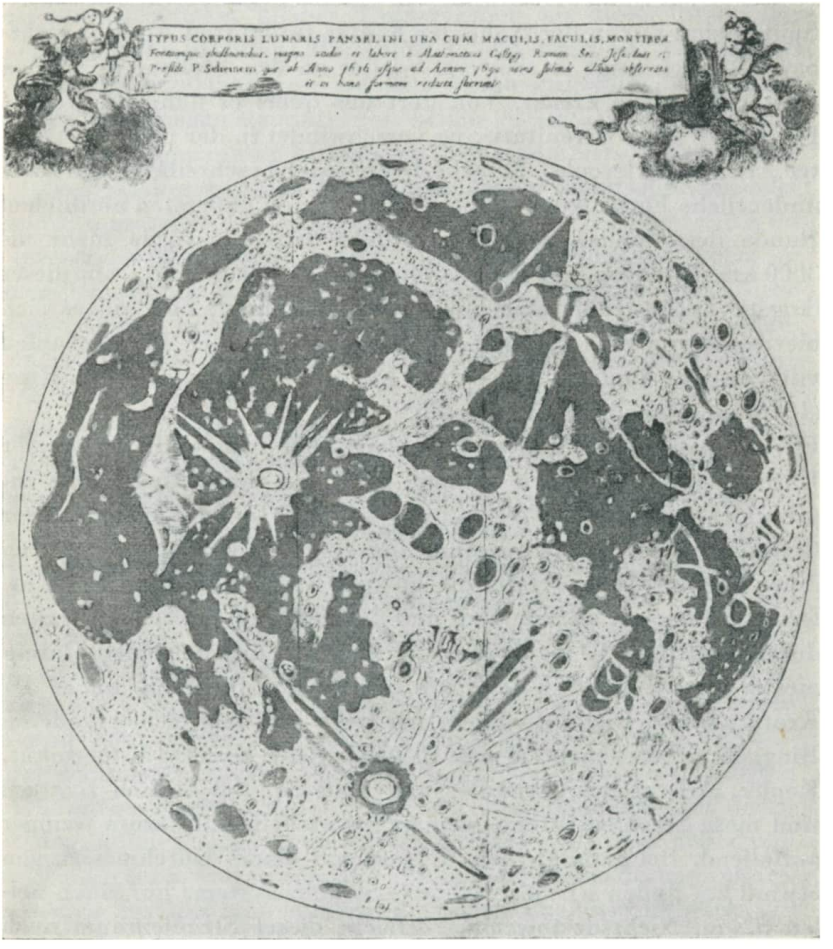
Die Gesamtzahl der auf dem Mond beobachteten Rillen ist sicher recht groß. J. H. Schröter, von dem wir schon im Zusammenhang mit der berühmten Hyginus-Rille gesprochen haben, kannte zu Beginn des 17. Jahrhunderts nur einige wenige. Ihre Zahl stieg aber später, hauptsächlich dank der ununterbrochenen Verbesserung der optischen Qualität der astronomischen Fernrohre, rasch an. So führt zum Beispiel W. G. Lohrmann (1796 bis 1840) schon 86 an, J. H. Mädler (1794 bis 1873) um 140, J. Schmidt (1825 bis 1884) 425, L. Brenner (1928) 786 und Ph. Fauth (1936) 2044. Man kann annehmen, daß ihre Gesamtzahl sicher mehrere Zehntausende beträgt und daß mit der weiter wachsenden Unterscheidungsfähigkeit der Fernrohre, die man zum Studium des Mondes benutzt, auch in Zukunft immer wieder neue entdeckt werden. So führt zum Beispiel A. P. Moore (1957) an, daß es sehr schwer sei, heute mit Hilfe eines 15¼zölligen Fernrohres eine „neue" Rille zu entdecken, während man mit dem 33zölligen Refraktor der Sternwarte von Meudon bei Paris oder dem 25zölligen Refraktor der Sternwarte von Cambridge in England immer wieder neue Rillen entdecken kann, und das schließlich auch in jenen Gegenden des Mondes, die für „erforscht" gehalten werden.

Helle Streifen und Flecken

Helle Streifen und Flecken, die wir besonders in der Zeit um den Vollmond in der Umgebung zahlreicher Mondkrater beobachten können, gehören zweifellos zu den bemerkenswertesten Formationen auf dem Mond. Wir finden sie schon im 17. Jahrhundert in den Karten Hevelius', Fontanas und Ricciolis verzeichnet. Am beachtenswertesten sind Strahlenkränze, die in der Umgebung von

Ringgebirgen beobachtet wurden. So sehen wir zum Beispiel aus dem Ringgebirge Tycho auf der südlichen Mondhalbkugel während des Vollmondes insgesamt etwa 100 helle Streifen hervortreten, von

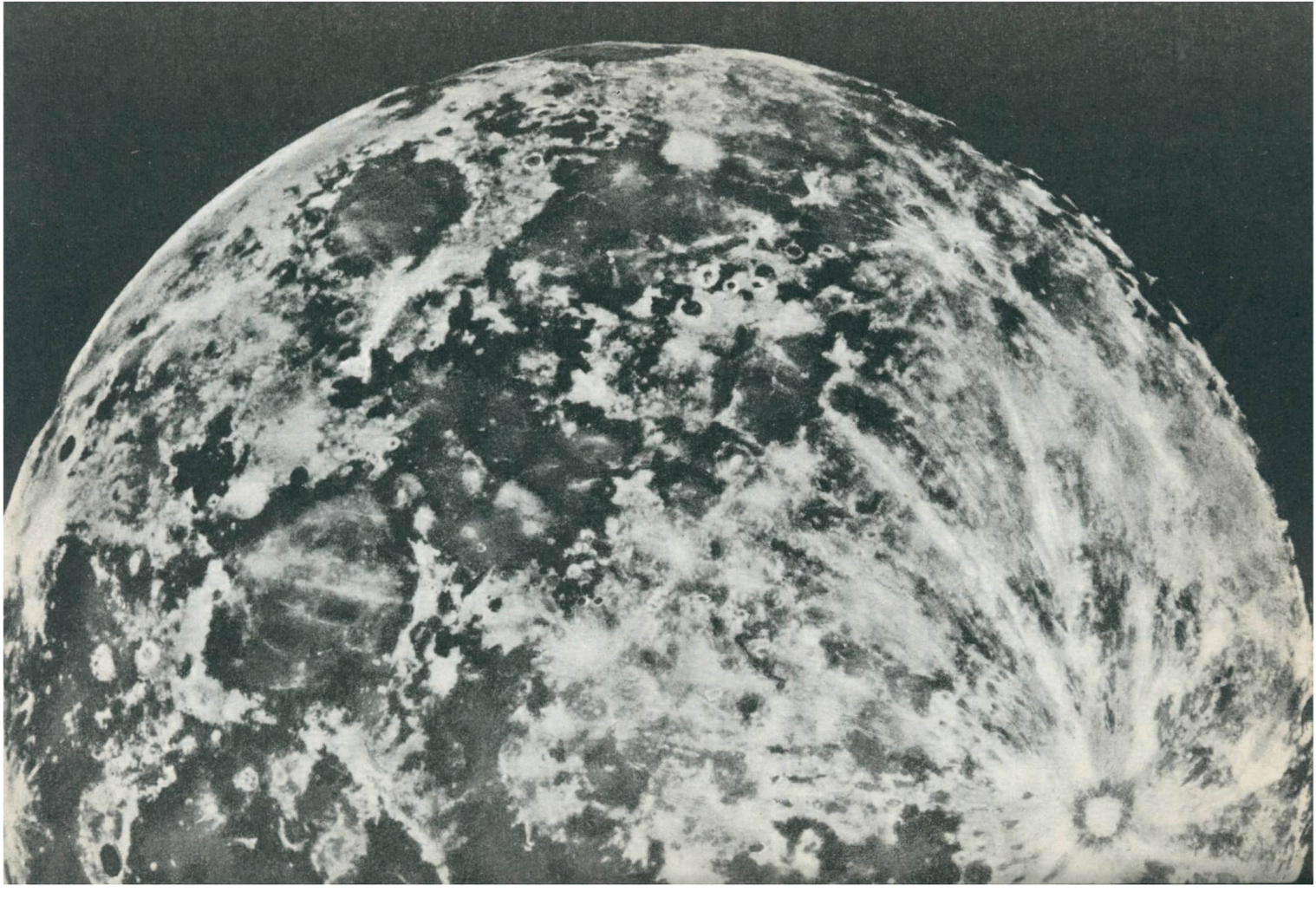
Strahlenkrater und helle Streifen auf der Mondkarte von Ch. Scheiner.
Aus A. Kirchners „Mundus subterraneus" aus dem Jahre 1678



denen die auffälligsten eine Breite von mehreren Kilometern und eine Länge bis zu 1300 km erreichen. Einer dieser Tychostrahlen ist wirklich außergewöhnlich lang. Er reicht nämlich bis in die nördliche zirkumpolare Gegend des Mondes; er ist aber unzusammenhängend und stellenweise recht unregelmäßig. Sein mittlerer Teil passiert die Gegend des Kraters Albategnius und schneidet den Krater Hind. Dann verschwindet der ganze Strahl; seine schwachen Spuren sind nur in der Nähe der Krater Godin und Agrippa sichtbar. Deutlich zeigt er sich erst wieder an den Stellen, wo er den Krater Menelaus kreuzt. Von dort aus quert er dann die dunkle Fläche des Mare Serenitatis. Er verschwindet in der Nähe der Krater Atlas und Hercules. Manche Beobachter beschreiben noch seine undeutliche Fortsetzung von hier bis fast zum äußersten nördlichen Rande des Mondes. Die Länge dieser Strecke würde mehr als 3000 km betragen. Es ist vorläufig aber zweifelhaft, ob dieser längste Tychostrahl tatsächlich zusammenhängt, oder ob es sich hier nicht um eine zufällige Verbindung eines der Tychostrahlen mit Strahlen anderen Ursprungs handelt, wenn auch H. C. Urey (1956) diese Möglichkeit ausschließt.

Es ist interessant, daß dieses Strahlensystem, wie wir bei genauerer Untersuchung feststellen können, nicht aus dem Inneren der zugehörigen „Strahlenkrater" direkt kommt, sondern erst in einer bestimmten, wenn auch verhältnismäßig nahen Entfernung von ihnen beginnt. Beim Krater Tycho zum Beispiel beträgt diese Entfernung zwischen seinem Wall und dem Anfang der hellen Streifen durchschnittlich 40 bis 50 km; der Krater selbst hat einen Durchmesser von 87 km. Ein ähnliches System von Strahlen, wie es der Krater Tycho besitzt, können wir auch bei zahlreichen anderen Ringgebirgen beobachten, zum Beispiel an den Kratern Kopernikus, Kepler, Aristarchus, Aristillus und anderen. Bei kleinen Kratern sind diese Strahlensysteme weniger entwickelt und darum weniger auffallend. Bei ganz kleinen Kratern mit einem Durchmesser von etwa 2 km finden wir an Stelle des Strahlensystems nur einen hellen Saum. Nichtsdestoweniger erreicht dieser Strahlensaum nach

W. Goodacre (1931) auch bei vielen kleinsten Kratern eine Breite von 20 bis 90 km. Der helle Saum um manche besonders kleine Krater, Kratergruben, signalisiert uns ihre Anwesenheit oft dort, wo wir sie wegen ihres außerordentlich geringen Durchmessers sonst nicht sehen könnten. So kann man zum Beispiel die kleinen, runden, hellen Flecken inmitten mancher Wallebenen durch die Anwesenheit extrem kleiner Kratergruben an dieser Stelle der Mondoberfläche erklären. Ph. Fauth (1936) führt in seinem Verzeichnis der Strahlenkrater auf dem Mond insgesamt 309 Krater auf, die die Ausgangspunkte von hellen Streifen sind. Wenn wir dann noch die genannten kleinen mit Lichtsaum versehenen Krater zählten, bekämen wir eine Zahl von mehreren Zehntausenden oder Hunderttausenden. Der Glanz des Großteils der hellen Streifen ist so intensiv, daß er besonders in der Zeit des Vollmondes andere, in seiner Umgebung sichtbare Einzelheiten völlig überstrahlt. Die hellen Streifen erstrecken sich über Gebirge, Täler und Ebenen, ohne ihre Richtung zu ändern. Bei schräger Sonnenbestrahlung verschwinden sie völlig; sie zeigen sich erst dann wieder, wenn die Sonne hoch über dem Horizont steht. Wenn wir zur Beobachtung des Mondes in der Zeit des Vollmondes eine stärkere Vergrößerung benutzen, so können wir uns leicht davon überzeugen, daß sich die scheinbar einheitlichen Streifen tatsächlich aus einer Reihe größerer und kleinerer Flecken zusammensetzen, die so hintereinander angeordnet sind, daß der eine verschwindet, während sich der andere schon zu zeigen beginnt, so daß damit eine insgesamt ununterbrochene Fortsetzung des Streifens gewährleistet ist. Es ist interessant, daß während des Vollmondes nicht nur die genannten Streifen und Säume leuchten, sondern auch die Wälle und Zentralgipfel zahlreicher Krater, einzelne Berggipfel, Gebirge in Meeren und ähnliche Formationen, so daß die Mondoberfläche zu dieser Zeit den Anblick eines überaus vielgestaltigen Mosaiks heller und dunkler Flecken verschiedenster Form und Schattierung bildet. Die hellen Streifen am Mondrand können uns, wie kürzlich der englische Forscher D. W. Arthur (1956) zeigte, auch etwas Inter-



essantes von der Mondhälfte erzählen, die wir von der Erde aus niemals sehen. Offensichtlich kommen diese Streifen aus Mondgebirgen, die auf der abgewandten Mondseite liegen. Arthur bestimmte aus ihrer Gruppierung die Lage von etwa 10 bis dahin nicht näher bekannten Strahlenkratern auf der anderen Mondseite, von denen besonders einer eine hervorragende, an den Krater Tycho erinnernde Erscheinung sein dürfte. Er sendet zwei helle Strahlen einerseits zum lunaren Ringmeer Mare Parvum und andererseits zur Wallebene Bailly aus.

Die tatsächliche Ursache der hellen Streifen und Flecken auf dem Monde kennen wir immer noch nicht. Entschieden muß man die Ansicht einiger älterer Beobachter bestreiten, daß sie Gebirgsketten sind. In diesem Falle müßten diese Formationen, ähnlich wie die anderen Erhebungen auf dem Mond, bei schräger Sonneneinstrahlung deutliche Schatten werfen. Solche Schatten wurden jedoch bei den hellen Streifen nirgends beobachtet, obwohl Pease anführt, daß er bei der Beobachtung mit dem 100zölligen Reflektor der Sternwarte auf dem Mt. Wilson an einigen Streifen leichte Anzeichen von Schatten beobachtete, die dafür zeugen würden, daß einige dieser Streifen vielleicht doch nur sehr flache Erhebungen sind.

Karten der Mondoberfläche

Auch auf dem Mond bestimmen wir die Lage eines bestimmten Punktes seiner Oberfläche auf ähnliche Weise wie auf der Erde. Wir projizieren den Punkt auf ein gedachtes regelmäßiges Netz von Längen- und Breitengraden. Die Orientierung auf dem Mond vollzieht sich aber nach anderen Regeln als auf der Erde. Als östliches Gebiet des Mondes bezeichnen wir – zum Unterschied von der

◀ Strahlenkrater und helle Streifen auf dem Monde nach einer modernen Photographie. Der große helle Fleck oben ist der Krater Tycho

Erde und den Planeten – nicht jene Gegend, die in der Richtung der Mondrotation, also am Himmel rechts liegt, sondern die linke. Wir richten uns also bei der Bestimmung der Himmelsrichtungen auf dem Monde nach dem Standpunkt eines auf der nördlichen Halbkugel der Erde befindlichen Beobachters, der den Mond über dem südlichen Horizont sieht. Aus dieser Situation heraus bezeichnen wir in Übereinstimmung mit den Himmelsrichtungen auf der Erde die linke Seite des Mondes als östliche, die rechte als westliche, die obere als nördliche und die untere als südliche. Auf den Mondkarten aber, die so gezeichnet sind, wie das Mondbild im astronomischen Fernrohr erscheint, nämlich umgekehrt, ist Norden unten, Süden oben, Westen links und Osten rechts.

Nach dieser allen Selenographen geläufigen Orientierung muß man sich aber auch bei der Beurteilung der in diesem Buch veröffentlichten Bilder, Karten, Photographien und Beschreibungen richten. Die Bestimmung der Lage einzelner Punkte auf dem Mond geschieht nach folgendem Schema: Durch die Mitte der sichtbaren Hälfte des Mondes denken wir uns den Hauptmeridian. Von ihm aus westwärts – bei Betrachtung durch das umkehrende astronomische Fernrohr also nach links – die selenographische positive Länge (Zeichen +) und ostwärts (im Fernrohr nach rechts) die selenographische negative Länge (Zeichen —). Den gerade in der Mitte zwischen den beiden Mondpolen liegenden Großkreis bezeichnen wir analog zur Erde als Mondäquator. Vom Mondäquator nordwärts – im umkehrenden Fernrohr also abwärts – rechnen wir dann die selenographische positive Breite (+), südwärts davon – im Fernrohr demzufolge nach oben – die selenographische negative Breite (—).

Der Nullpunkt der Mondkoordinaten, der Schnittpunkt des Hauptmeridians mit dem Äquator, also der Punkt, dessen Länge (λ) und dessen Breite (β) = 0 ° ist, liegt ungefähr in der Mitte des Sinus Medii. In der Nähe befindet sich einer von F. Hayns Punkten erster Ordnung, das heißt von Punkten, deren Lage auf der Mondkugel besonders genau vermessen wurde. Es ist dies der Krater Mösting A,

der an der Außenseite des östlichen Walles der halbzerfallenen Wallebene Flammarion liegt und dessen genaue Lage durch wiederholte Messungen von S. A. Saunder, J. Franz, F. Hayn u. a. auf −5 °10′07″ Länge und −3 °11′02″ Breite festgelegt wurde.

In wissenschaftlichen Katalogen wird die Lage von Kratern und anderen Oberflächenformationen auf dem Monde größtenteils in rechtwinkligen Koordinaten angegeben. Wenn sich der Mond in der sogenannten mittleren Lage befindet (in der Null-Libration), liegt der Ursprung der Mondkoordinaten genau in der Mitte der sichtbaren Mondhalbkugel. Der Mondäquator und ebenso der Hauptmeridian des Mondes präsentieren sich uns zu dieser Zeit als senkrecht aufeinanderstehende Monddurchmesser. Wenn wir sie als Achsen eines rechtwinkligen Koordinatensystems ansehen, und zwar den Äquator als x-Achse und den Hauptmeridian als y-Achse, können wir mit ihrer Hilfe die rechtwinkligen Koordinaten jedes beliebigen Punktes auf der Mondoberfläche bestimmen; der senkrechte Abstand von der y-Achse ist dabei die x-Koordinate, und der senkrechte Abstand von der x-Achse die y-Koordinate. Die Länge der beiden Koordinaten (x, y) wird in Einheiten des Mondhalbmessers (Halbmesser des Mondes = 1) ausgedrückt. Ähnlich wie bei den sphärischen Koordinaten ist die x-Koordinate (die der Länge entspricht) in der westlichen, also linken Mondhälfte positiv (+), in der östlichen negativ (−), und die y-Koordinate (die der Breite entspricht) in der nördlichen, also unteren Mondhälfte positiv (+), in der südlichen negativ (−).

Die Genauigkeit der gegenwärtigen Mondkarten ist etwa dieselbe wie die der Erdkarten mit einem Maßstab von 1 : 5 000 000. Hinsichtlich der von den heutigen Mondkarten wiedergegebenen Einzelheiten kann gesagt werden, daß von der Mondoberfläche wohl alle Einzelheiten kartographiert sind, die einen Durchmesser von mehr als 1,5 km haben.

Die heutigen Mondkarten nützen den künftigen Astronauten allerdings nicht viel. Photographische Aufnahmen des Mondes aus größerer Nähe (siehe Seite 286) können hier viel ändern, denn auf

Vas castrorum in excelsis in firmamento coeli resplendens gloriose Eccles. 40



Per Illustri Domino GEORGIO AB ETTENHART Equiti S.R.I.
necnon Catholicæ Maiestatis et in Hispania Cruciatæ Thesaurario generali
Fr. Anton: Maria de Rheita Capucinus.
Obseruantiæ et amoris
ergo D.D.
1.6.4.5.

Author coelo delineavit et delineauit

Arnold. Leemans Sculpsit

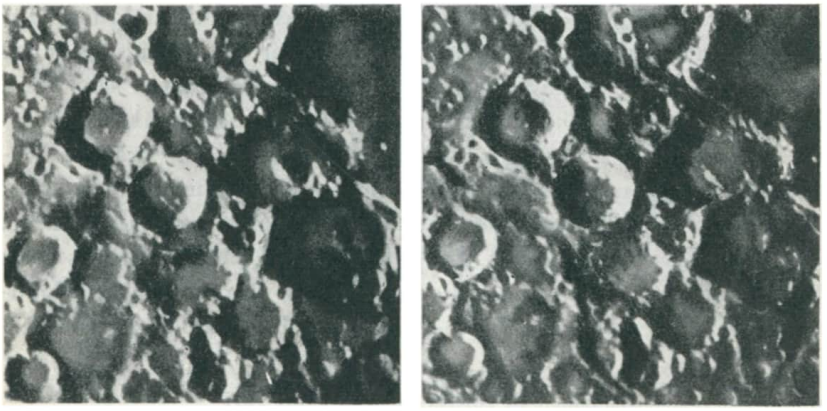
ihrer Grundlage wird man genauere und detailliertere Karten der Mondoberfläche zusammenstellen können als bisher.

Die ersten Beobachter des Mondes bildeten die Mondoberfläche gewöhnlich so ab, wie sie sie in ihren Fernrohren sahen, wobei sie eine mehr oder weniger komplizierte Zeichentechnik benutzten. In der heutigen Zeit, wo man die Mondoberfläche photographieren kann, geht man von dieser Methode ab und verwendet sie nur in den allerseltensten Fällen, zum Beispiel beim Studium kleiner Details der Mondoberfläche, die von der Photographie nicht wiedergegeben werden. An die Stelle des mühsamen Zeichnens ausgedehnter Teile der Mondoberfläche tritt heute die exakte Photographie mit Hilfe langbrennweitiger Fernrohre. In einigen Zehnteln einer Sekunde können von Mondgegenden Bilder gewonnen werden, von denen die alten Selenographen nicht einmal zu träumen wagten. Die Photographie hat aber auch ihre Mängel. Die zu verschiedenen Librationen gemachten Aufnahmen kann man schwer vergleichen, denn die durch die Libration hervorgerufene Veränderung der Perspektive macht sich häufig nicht nur hinsichtlich der Maße, sondern auch hinsichtlich der Form bestimmter Details bemerkbar. Auf der Photographie behindern uns auch zahlreiche Schatten, die viele Einzelheiten der Mondoberfläche verdecken. Aus diesen und anderen Gründen kann die Photographie die gezeichnete Karte niemals ersetzen. Die Wahl der richtigen Abbildungsmethode für Mondkarten ist vorläufig sehr schwer, weil die Mondoberfläche relativ uneben, der Maßstab unserer derzeitigen Karten sehr klein ist und weil wir noch immer nicht genügend viele exakte Höhenmessungen zur Verfügung haben, wie wir sie für eine präzise Wiedergabe des Mondgeländes brauchten. Darum nehmen die meisten Autoren von Mondkarten zu recht einfachen Zeichenmethoden mit einfachen Strichen Zuflucht, mit denen sowohl Kraterwälle als auch Gebirgsumrisse, Täler und Rillen dargestellt werden (Elger, Goodacre, Wilkins, Lamèch). Diese Art zu zeichnen ist zwar sehr be-

◀ Mondkarte des Kapuziners de Rheita aus dem Jahre 1645

quem und leicht, hat jedoch einen großen Nachteil darin, daß sie wenig anschaulich ist, so daß sie leicht zu schwerwiegenden Irrtümern führen kann. So können beispielsweise auf der Karte mit einfachen Strichen gekennzeichnete Gebirgszüge leicht zu der Vorstellung führen, daß es sich um Rillen handelt usw. Der deutsche Selenograph Ph. Fauth wendet darum bei der Zeichnung von Einzelheiten der Mondoberfläche die gleichen Methoden an, die auch bei der Zeichnung von Erdkarten verwendet werden, die Zeichnung mit Schichtlinien oder Schraffen. Nachteilig dabei ist allerdings ein langsames Fortschreiten der Arbeit und eine Beschränkung der Möglichkeiten, die Mondgegenden wiederzugeben, von denen noch keine exakten Höhenmessungen vorliegen. A. W. Chabakow (1949) schlägt deshalb vor, zur Ergänzung der bisherigen Höhenmessungen an einzelnen isolierten Punkten auf dem Monde die Methode der sogenannten Photogrammetrie anzuwenden, die auch bei der Vermessung und Kartographierung der Erdoberfläche benutzt wird. Daß man mit Hilfe von zwei Photographien, die von verschiedenen Punkten aufgenommen wurden, die räumliche Lage eines bestimmten Punktes fixieren kann, bewies schon Ch. Wheatstone im Jahre 1838. Stereoskopische Bilder benutzte zu astronomischen Zwecken

Stereoskopische Aufnahme einer Mondlandschaft. Nach Prof. M. Wolf

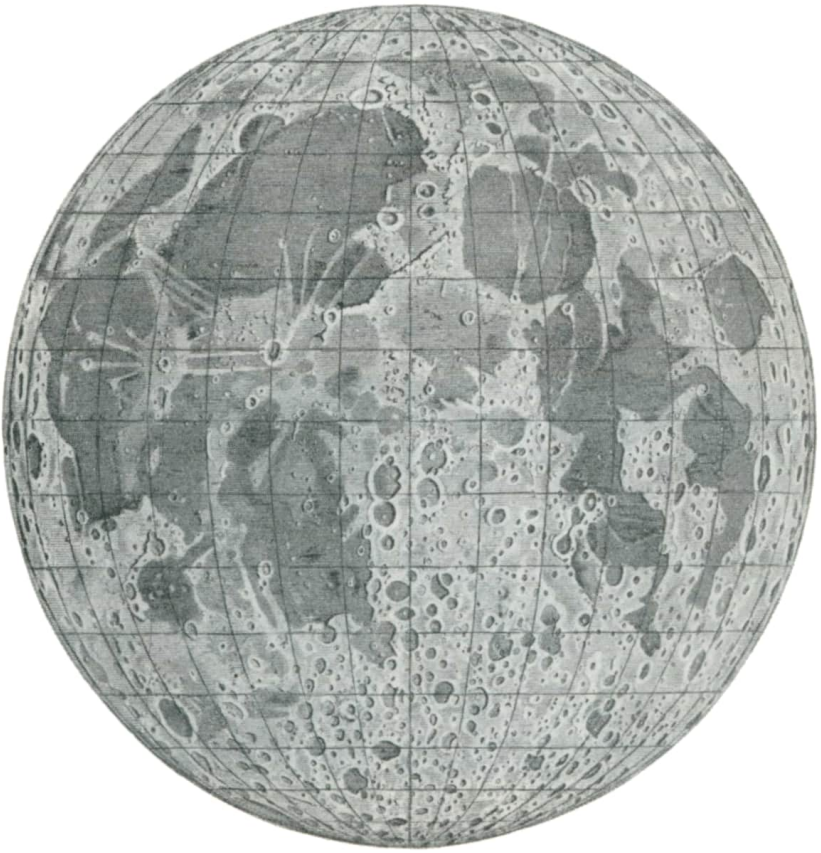


erstmalig Warren de la Rue im Jahre 1858. Die Grundlage der räumlichen Photogrammetrie oder Stereophotogrammetrie (kurz Stereogrammetrie) ist das sogenannte binokulare Sehen. Wenn wir einen Punkt beobachten, so drehen sich die Achsen unserer Augen so, daß sie auf den beobachteten Punkt hinweisen. Durch das binokulare Sehen bekommen wir für jedes Auge ein perspektivisch anderes Bild. Diese beiden Teilbilder vereinigen sich bei normalem Sehen zu einem einzigen Ganzen, das räumlich wirkt. Diese Erscheinung ist das Ergebnis einer besonderen hochentwickelten psychischen Fähigkeit, die in beiden Augen entstandenen Bilder zu einem einzigen zu vereinigen. Wenn es das stereoskopische Sehen nicht gäbe, könnten wir unsere Umgebung nur flächig wahrnehmen. Wir wären, unter der Voraussetzung, daß wir uns nicht bewegen, außerstande, die Entfernung einzelner Gegenstände unserer Umgebung abzuschätzen. Den gleichen Eindruck stereoskopischen Sehens haben wir, wenn wir durch ein sogenanntes Stereoskop zwei flache Bilder des gleichen Gegenstandes beobachten, die von zwei genügend weit voneinander entfernten Stellen aufgenommen wurden. Auch in diesem Falle sehen wir den betreffenden Gegenstand räumlich. Mit Hilfe eines besonderen Gerätes, des im Jahre 1901 von K. Pulfrich konstruierten Stereokomparators, kann man durch Beobachtung von zwei stereoskopischen Aufnahmen, zum Beispiel einer bestimmten Landschaft, nicht nur die notwendigen Koordinaten für das Kartieren, sondern auch die Parallaxen der einzelnen Punkte der Gegend bestimmen. Zu selenographischen Zwecken wurden stereoskopische Aufnahmen und der Stereokomparator erstmalig von den französischen Astronomen Loewy und Puiseux benutzt, die aus zwei am 20. April 1896 und 1900 gewonnenen Aufnahmen des Mondes direkt einen Schichtenplan der Mondoberfläche konstruierten. A. W. Chabakow, dessen Vorschlag wir bereits erwähnten, gedenkt diese Methode dadurch zu verbessern, daß die zugehörigen Messungen nicht an zwei zeitlich voneinander verschiedenen, wenn auch ausgesuchten Photographien des Mondes vorgenommen werden, sondern an zwei Aufnahmen, die

im gleichen Augenblick von zwei verschiedenen, entsprechend voneinander entfernten Stellen gemacht werden; diese Methode hat der ersten gegenüber viele Vorteile. Chabakow schlägt vor, zu diesem Zweck zwei sowjetische Sternwarten zu benutzen, und zwar die Sternwarte von Simeis auf der Krim und die Bergsternwarte von Alma Ata.

Es heißt, daß die erste Mondkarte schon von dem altgriechischen Philosophen Anaxagoras (etwa 500 bis 428 v. u. Z.) gezeichnet wurde. Gewiß war das nur eine sehr einfache Karte des Vollmondes,

Mondkarte von T. Mayer aus dem Jahre 1775



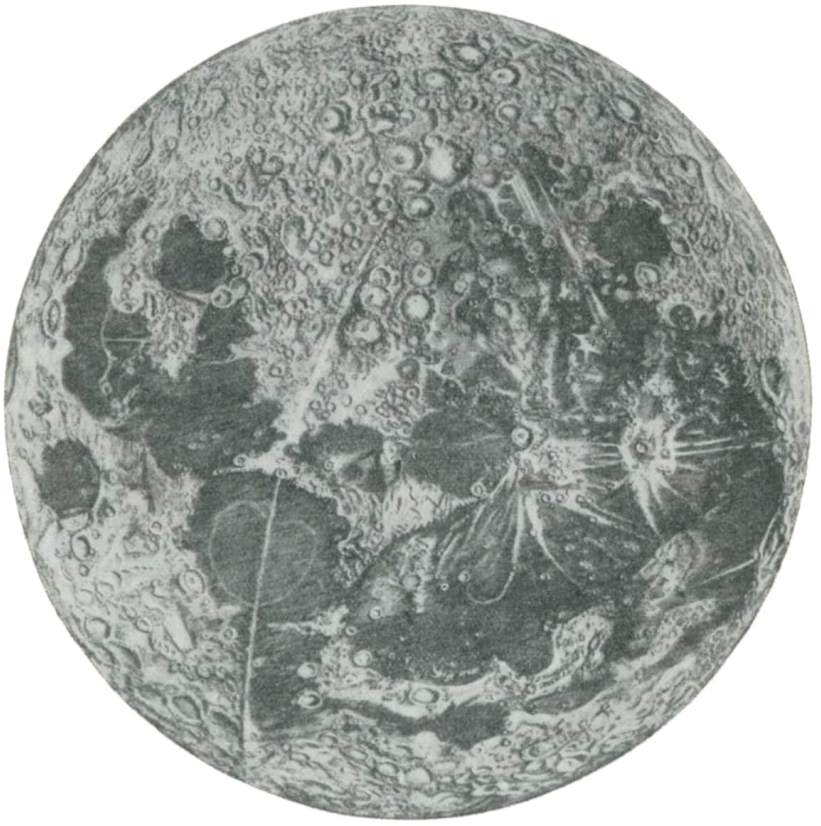
die die hauptsächlichen Meere und Kontinente auf dem Mond festhielt, denn Krater und andere Oberflächenformationen des Mondes kann man ohne Fernrohr nicht beobachten. Nur ein außerordentlich scharfes Auge kann auf dem Monde auch Unebenheiten des Terminators wahrnehmen und so auf die Existenz von „Bergen" auf dem Mond schließen. Anaxagoras scheint von solchen Beobachtungen entweder gehört oder etwas Derartiges selbst beobachtet zu haben, denn er spricht mit großer Bestimmtheit von einem bergigen Mond. Auf Anaxagoras beruft sich auch Plutarch (46 bis 125), der vermutet, daß es auf dem Mond tiefe Täler und Schluchten, aber auch hohe Berge gibt.

Die erste Mondkarte, die auf der Grundlage von Beobachtungen durch das astronomische Fernrohr hergestellt wurde, veröffentlichte im Jahre 1614 Ch. Scheiner. Eine sehr gute Mondkarte veröffentlichte im Jahre 1645 der in Italien lebende tschechische Astronom P. Anton Maria Šírek z Reity (Schyrläus de Rheita). „Rheitas Karte", schreiben H. P. Wilkins und A. P. Moore (1957), „zeigt sehr gut die Umrisse der Ebenen, die wichtigsten Krater und die Hauptsysteme der hellen Streifen". Im gleichen Jahre wie Rheita veröffentlichte van Langrenus seine Mondkarte. Sie setzt sich insgesamt aus dreißig einzelnen Karten zusammen. Die Mondformationen werden darauf nach Heiligen benannt. Obwohl das die erste Mondkarte mit genauen Bezeichnungen war, blieben nur einige wenige der ursprünglich von Langrenus vorgeschlagenen Namen erhalten (Catharina, Cyrillus, Theophilus).

Alle diese selenographischen Versuche wurden aber im Jahre 1647 durch die Veröffentlichung der langjährigen sorgfältigen Beobachtungen des Astronomen J. Hevelius in den Schatten gestellt. Sein monumentales Werk „Selenographia, sive Lunae Descriptio" (Selenographie oder Beschreibung des Mondes), die erste wissenschaftliche Monographie des Mondes überhaupt, wurde für die nächsten hundert Jahre die beste Darstellung der Mondoberfläche. Sie umfaßt 495 Seiten Text mit 40 Darstellungen von Mondphasen, die von Hevelius eigenhändig gezeichnet und in Kupfer gestochen

wurden. Außerdem enthält das Werk drei komplette Karten des Vollmondes und eine schematische Karte mit genauer Terminologie. Im Jahre 1651 gaben F. M. Grimaldi und G. B. Riccioli Mondkarten heraus. Die von Hevelius und später von Grimaldi und Riccioli vorgeschlagenen Bezeichnungen der Mondformationen gelten bis heute. Danach wird zur Kennzeichnung der Meere auf dem Monde die Bezeichnung *mare* (lateinisch: Meer) unter Hinzufügung des eigentlichen Namens verwendet, zum Beispiel Mare Imbrium (Meer des Regens); einzelne Mondgebirge tragen aus der Geographie

Mondkarte von Cassini aus dem Jahre 1680



übernommene Namen (Alpen, Apenninen, Karpaten), und die Krater werden nach hervorragenden Persönlichkeiten benannt (Kopernikus, Plato, Archimedes, Ptolemäus).

Die heutige Nomenklatur des Mondes fügte dem nur einige Kleinigkeiten hinzu. Beispielsweise wurden kleinere Krater, die auch auf heutigen Mondkarten unbenannt blieben, zur leichteren Erfassung den nächsten größeren zugeordnet und mit den Großbuchstaben des lateinischen Alphabets benannt (Kopernikus A, Kopernikus B, Kopernikus C usw.). Die einzelnen hervorragenden Berggipfel benennen wir demgegenüber mit den kleinen Buchstaben des griechischen Alphabets (α, β, γ, δ, ε...). Die zu einem bestimmten Rillensystem gehörenden Rillen unterscheiden wir durch römische oder arabische Zahlen (I, II, III, IV oder 1, 2, 3, 4).

Die Mondkarte Montanaris vom Jahre 1662 ist interessant, weil ihr Autor bei der Beobachtung des Mondes erstmalig ein primitives Mikrometer benutzte, mit dem er die Lage der einzelnen Formationen auf der Mondoberfläche maß. Die erste tatsächlich genaue Mondkarte zeichnete T. Mayer (1723 bis 1762). Diese Karte, die nach dem Tode Mayers im Jahre 1775 erschien, hat einen Durchmesser von 20,3 cm und umfaßt insgesamt 24 exakt vermessene und 63 durch Schätzung gewonnene Punkte. Aus dem weiteren Erbe Mayers wurde noch eine Karte des vollen Mondes mit einem Durchmesser von 35 cm und zahlreichen Einzelheiten herausgegeben, die sowohl durch ihre Genauigkeit als auch durch ihren Reichtum an Details die bekannte Karte von Hevelius übertrifft.

Im Jahre 1784 begann J. H. Schröter (1745 bis 1816) die Oberfläche des Mondes systematisch zu studieren. Er stellte sich die Aufgabe, eine Reihe von Mondgegenden so genau und gründlich wiederzugeben, daß man mit Hilfe seiner Karte spätere Veränderungen auf dem Monde feststellen könnte. Das Ergebnis seiner vieljährigen aufreibenden Arbeit ist das Werk „Selenotopographische Fragmente zur genauen Kenntnis der Mondfläche", dessen erster Teil im Jahre 1791 in Lilienthal erschien, der zweite Teil im Jahre 1802 in Göttingen.

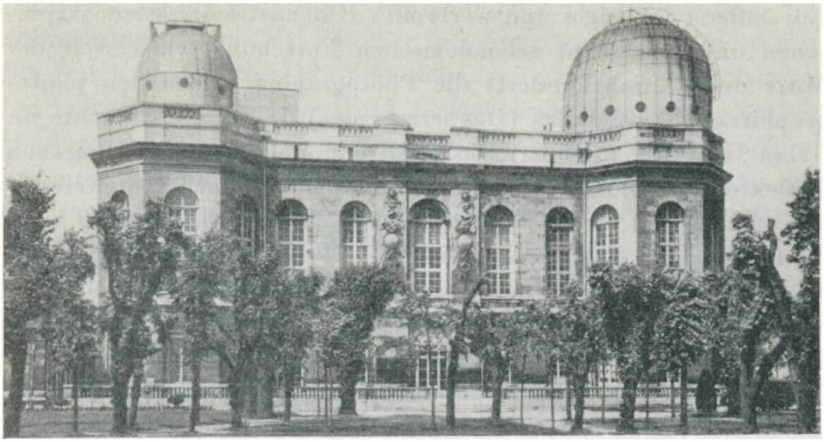
Ein weiterer großer Schritt vorwärts in der Selenographie wurde im Jahre 1824 getan, als der erste Teil des bekannten Werkes „Topographie der sichtbaren Mondoberfläche" von W. G. Lohrmann herauskam. Es handelt sich um eine große Mondkarte im Maßstab von 1 : 3566400, die mit Schraffen gezeichnet ist, die damals bei der Kartierung nur sehr selten benutzt wurden. Die Veröffentlichung aller 25 Sektionen dieser Karte wurde aber erst im Jahre 1878 verwirklicht.

Eine noch bessere Mondkarte gaben im Jahre 1837 W. Beer und J. H. Mädler heraus (Mappa Selenographica). Ihre Karte ist im gleichen Maßstab wie die Lohrmannsche gezeichnet, übertrifft diese aber an Reichhaltigkeit der Details.

Im Jahre 1878 veröffentlichte J. Schmidt eine große Mondkarte (Charte der Gebirge des Mondes). Diese Karte hat einen Durchmesser von 1,95 m und umfaßt insgesamt 32856 Krater und 348 Rillen. Der Maßstab der Karte ist 1 : 1783200. Schmidt arbeitete daran 34 Jahre.

Annähernd zur gleichen Zeit wie Schmidt (im Jahre 1876) gab auch E. Neison eine etwas kleinere Mondkarte mit einem Durchmesser von 61 cm heraus.

In späteren Jahren erschienen eine Reihe von Mondkarten, unter denen die von T. G. Elger (1895), von Gaudibert und C. Flammarion (1884), von W. Goodacre (1910), von H. P. Wilkins (1924) und von K. Anděl (1926) besondere Erwähnung verdienen. Anděls Mappa Selenographica, die von der Tschechischen Astronomischen Gesellschaft in Prag herausgegeben wurde, errang das Ansehen der ganzen Welt. Sie wird bis heute für eine der besten Karten des Mondes überhaupt gehalten, wenn auch ihr ursprünglicher Zweck recht bescheiden war. Sie sollte unseren Amateuren ermöglichen, sich mit den Bezeichnungen der hauptsächlichen Oberflächenformationen des Mondes vertraut zu machen. H. P. Wilkins und A. P. Moore (1957) schreiben von ihr: „. . . im Jahre 1924 erschienen zwei Mondkarten, die 60zöllige Karte Wilkins' und die Bildkarte Karel Anděls aus Prag, ein sehr schönes, viele feine Einzelheiten



Observatorium in Paris

enthaltendes Werk. Der Anblick der Hügel und Vertiefungen ist auf ihr durch feine Schattierungen betont, die mit außerordentlicher Gewandtheit ausgeführt sind, so daß diese Karte vorläufig die anschaulichste Mondkarte darstellt."

Die Herausgabe einer großen und detaillierten Karte des Mondes (mit einem Durchmesser von 3,4 m) bereitete vor dem zweiten Weltkrieg der deutsche Selenograph Ph. Fauth vor. Von dieser Karte wurden leider nur einige spezielle Teile publiziert. Die Karte selbst ging in den Kriegsjahren 1939 bis 1945 verloren. Auch die Karte des Wiener Selenographen K. Müller ereilte ein ähnliches Schicksal. Sie blieb unvollendet, weil ihr Autor im Jahre 1942 umkam.

Ebenso erging es einer neuen Mondkarte Karel Anděls, die eine verbesserte und um viele weitere Einzelheiten vervollständigte Ausgabe seiner Mappa Selenographica werden sollte.

Die zuletzt herausgegebene Mondkarte, die größte Karte der Welt überhaupt, ist die große Karte Wilkins' aus dem Jahre 1951, die einen Durchmesser von 7,6 m hat, aber durch keine besondere Anschaulichkeit hervorragt.

Ein äußerst wichtiges und wertvolles Hilfsmittel der selenographischen und überhaupt selenologischen Forschung wurde seit der Mitte des 19. Jahrhunderts die Photographie. Die ersten photographischen Aufnahmen (Daguerrotypien) des Mondes machte im Jahre 1840 J. W. Draper. Das im Brennpunkt eines Newtonschen Reflektors gewonnene Bild des Mondes hatte einen Durchmesser von 25 mm und wurde 20 Minuten exponiert. Im Juni 1849 legte W. C. Bond der Pariser Akademie der Wissenschaften ein auf der Harvard-Sternwarte in den USA gewonnenes neues und viel besseres Bild des Mondes vor. Dieses Bild hatte einen Durchmesser von 12 cm; seine Belichtungszeit betrug nur noch 40 Sekunden. Weitere Bilder des Mondes auf verbesserten (kollodierten) Platten machten W. de la Rue, L. M. Rutherford, H. Draper, R. Ellery u. a. In der ČSSR verfertigten recht gute Photographien des Mondes schon im Jahre 1884 die Brüder Frič, die Begründer der Sternwarte von Ondřejov. Die ersten wirklich vollendeten Aufnahmen ausgesuchter Gegenden des Mondes wurden von der Lick-Sternwarte in Kalifornien gemacht und im Jahre 1894 veröffentlicht. Später wurden sie von sehr schönen Mondaufnahmen übertroffen, die an der Pariser Sternwarte von Loewy und Puiseux gemacht wurden. Zur Gewinnung dieser Aufnahmen diente ein besonders gebrochenes Fernrohr ("equatoreal coudé" genannt) mit einem Durchmesser von 60 cm und einer Brennweite von 18 m. Die Pariser Aufnahmen hatten einen größeren Durchmesser als die Aufnahmen der Lick-Sternwarte (17 cm). Sie wurden auf besseres photographisches Material exponiert, so daß sie auch mehr Einzelheiten wiedergaben. Im Jahre 1894 wurde aus ihnen der bekannte photographische Pariser Mondatlas (Atlas lunaire de l'Observatoire de Paris) zusammengestellt. Die Aufnahmen des Pariser Atlasses wurden später von den Aufnahmen der Yerkes-Sternwarte und der bekannten Sternwarte auf dem Mt. Wilson in Kalifornien übertroffen.

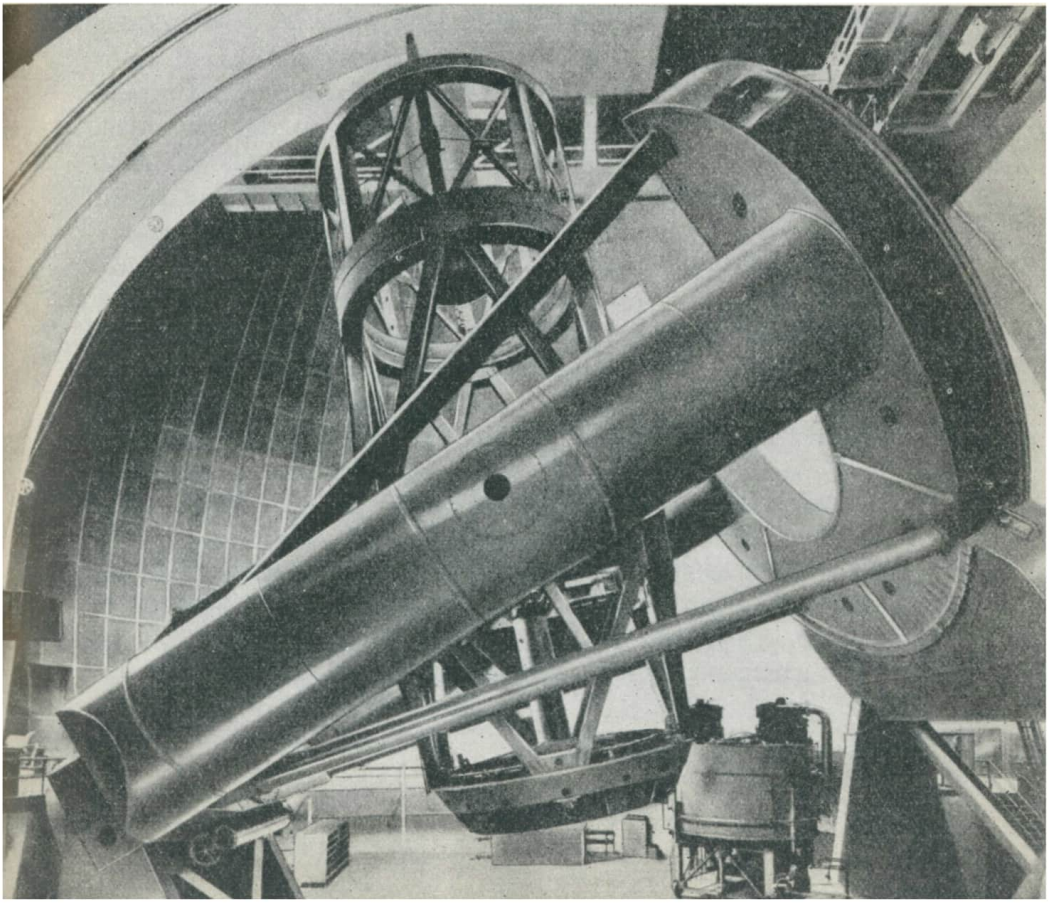
Neue, wunderschöne Mondaufnahmen wurden in den letzten Jahren von der Sternwarte auf dem Pic du Midi in den Pyrenäen (der Hoch-

gebirgsstation der Sternwarte von Meudon bei Paris) und von der Sternwarte auf dem Mt. Palomar geliefert (siehe Abbildungen auf den Seiten 35, 95, 169, 190 und 259).

Im Jahre 1960 gab in den USA G. P. Kuiper einen neuen photographischen Atlas des Mondes heraus, der aus 280 Photographien zusammengestellt worden war, die von der Lick-Sternwarte, der McDonald-Sternwarte und der Yerkes-Sternwarte sowie von den Sternwarten auf dem Mt. Wilson und Pic du Midi stammen.

Das U. S. Aeronautical Chart and Information Center bereitet gegenwärtig auf der Grundlage des Kuiperschen Atlas eine detaillierte Schichtenkarte des Mondes vor. Sie wird im Maßstab 1:1000000 und in Lambertscher Projektion die Ergebnisse der

Das Teleskop mit einem Durchmesser von 5 m auf dem Mt. Palomar



detaillierten Reliefmessungen der Mondoberfläche benutzen, die Z. Kopal am Pic du Midi mit seinen Mitarbeitern vornimmt.
Die Photographien des Mondes, die durch die großen Fernrohre aufgenommen wurden, haben ihren unzweifelhaften Wert auch für die Mondkartographie. W. Goodacre führt beispielsweise an, daß die Mondaufnahmen auf dem Mt. Wilson im wesentlichen dieselben Details erfassen, die der Beobachter durch einen 10zölligen Refraktor sehen kann. Aber ihr größter Wert besteht darin, daß sie noch nach Jahren bei der Lösung von Problemen, die sich durch Veränderungen auf der Oberfläche des Mondes ergeben, als Dokumente dienen können.

DIE PHYSIKALISCHEN VERHÄLTNISSE AUF DEM MONDE (SELENOPHYSIK)

Die „Mondkunde"

Die Wissenschaft vom Mond beschränkte sich bis zum Ende des 19. Jahrhunderts vorwiegend auf die Beschreibung der Oberfläche des Mondes und auf die Schaffung möglichst genauer Karten seiner sichtbaren Halbkugel. Darum ist in Analogie zu dem Begriff Geographie die Bezeichnung Selenographie, die von dem Namen der griechischen Göttin Selene (griech. selene, Mond) hergeleitet wurde, mit vollem Recht zutreffend. Die Entwicklung von Forschung, Wissenschaft und Technik in den letzten Jahrzehnten eröffnete auch für sie neue Möglickeiten. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts gewinnt auch ihr neuer Sektor, die sogenannte Selenodäsie, Bedeutung, die J. Franz (1901) und F. Hayn (1902) begründeten. Sie erforscht die Rotation des Mondes und bestimmt Länge, Breite und absolute Höhe ausgewählter Punkte auf dem Mond. Gleichzeitig damit taucht als völlig neues Fach auch die sogenannte Selenophysik auf, die in gewissem Maße eine Ähnlichkeit mit der physikalischen Geographie hat und zum Studium des Mondes neue physikalische Methoden benutzt, vor allem Photometrie, Spektralanalyse, Polarimetrie und Radiometrie.

Die Ergebnisse dieser Fächer faßt die sogenannte Selenologie zusammen, die der Geologie und Geophysik analog ist. Heute benutzt man diese Bezeichnung auch für die Kennzeichnung der Wissenschaft vom Mond überhaupt. Dementsprechend ist ein Selenologe allgemein ein Mondforscher, ohne Rücksicht darauf, ob er sich überwiegend nur mit Messungen oder der Kartierung der Oberflächenformationen des Mondes beschäftigt oder ob er sich auf die geologische Erklärung der Erscheinungen auf dem Mond spezialisierte. Von der Selenologie im engeren Sinne des Wortes werden wir in einem späteren Kapitel sprechen. In diesem Kapitel wollen wir die wichtigsten Ergebnisse der Selenophysik erwähnen.

Dichte und wahrscheinliche Zusammensetzung der Mondatmosphäre

Die Frage, ob der Mond eine sehr dünne Atmosphäre hat oder ob ihm jede Art von Atmosphäre fehlt, blieb bis vor kurzer Zeit unentschieden. Der Großteil der Astronomen entschied sich für die zweite Möglichkeit. Gegen die Existenz einer genügend dichten Gashülle auf dem Mond spricht bekanntlich eine Reihe von Tatsachen. So erscheint beispielsweise das Bild des Mondes im Fernrohr mit allen Einzelheiten immer scharf, sofern sich nicht der Einfluß unserer eigenen Atmosphäre störend bemerkbar macht. Am Rande der Mondscheibe fehlen alle Andeutungen von Nebel und Eintrübungen. Auf dem Mond gibt es keine sogenannten Dämmerungserscheinungen wie bei uns auf der Erde. Das Sonnenlicht wird hier nicht in einem gasförmigen Medium gestreut, und die von der Sonne beleuchtete Mondgegend geht unmittelbar in völlige Dunkelheit über. Schließlich verschwindet bei der Bedeckung eines Sternes durch den Mond der betreffende Stern hinter dem dunklen Rand des Mondes fast augenblicklich, ohne daß wir dabei ein allmähliches Schwächerwerden seines Lichtes wahrnehmen, wie das der Fall sein müßte, wenn der Mond eine entsprechend dichte Atmosphäre hätte. Durch den Einfluß der sogenannten Brechung oder Refraktion des Lichtes müßte der „bedeckte" Stern noch eine kurze Zeit zu sehen sein, nachdem er bereits hinter dem Mondrande verschwunden ist. Außerdem müßten wir ihn beim Wiederauftauchen einen Augenblick früher sehen können, als theoretisch zu erwarten ist. Mit anderen Worten: Die beobachtete Zeit der Bedeckung müßte etwas kürzer sein als die errechnete Zeit. G. B. Airy studierte Mitte des vergangenen Jahrhunderts sorgfältig etwa 295 genau beobachtete Bedeckungen von Sternen durch den Mond und kam zu dem Ergebnis, daß der direkt gemessene Halbmesser des Erdbegleiters etwa 2″ größer ist als der

Radioteleskop der Akademie der Wissenschaften der UdSSR ▸



Halbmesser, den man von den beobachteten Bedeckungen der Sterne ableitete. Wenn diese scheinbare „Verkürzung" des Mondhalbmessers durch die Refraktion des Sternlichtes in einer Mondatmosphäre verursacht wurde, so ginge daraus hervor, daß die Gashülle auf dem Mond etwa 200mal dünner als die irdische Atmosphäre ist. Hiernach hätte der Mond eine um ein Vielfaches dünnere Atmosphäre als das beste Vakuum, das durch eine einfache Kolbenpumpe erzielt werden kann. Airy selbst erläutert aber die genannte Nichtübereinstimmung zwischen dem Mondhalbmesser, der durch Messungen gewonnen wurde, und dem Radius, der sich durch Beobachtung der Bedeckungen ergab, keineswegs durch die von der Mondatmosphäre hervorgerufene Refraktion des Sternenlichtes, sondern er meint, daß der Grund dafür die sogenannte Iradiation sei, eine in das Gebiet der optischen Täuschungen gehörige Erscheinung. Als Ergebnis der Iradiation erscheinen uns helle Körper im dunklen Feld größer als – umgekehrt – dunkle Körper vor hellem Hintergrund; das erklärt sich daraus, daß sich die Erregung der Netzhaut des menschlichen Auges an der Stelle, wo das Bild des hellen Gegenstandes auffällt, auch auf die in der Nähe liegenden Zellen überträgt. Mit der Iradiation hängt zum Beispiel auch die bekannte Erscheinung zusammen, daß uns die helle Mondsichel im Vergleich zum übrigen Teil des Mondes, der mit aschgrauem Licht leuchtet, bedeutend größer erscheint. Diesen Zusammenhang deutet auch die bekannte englische Redewendung „Der alte Mond im Arm des neuen" an.

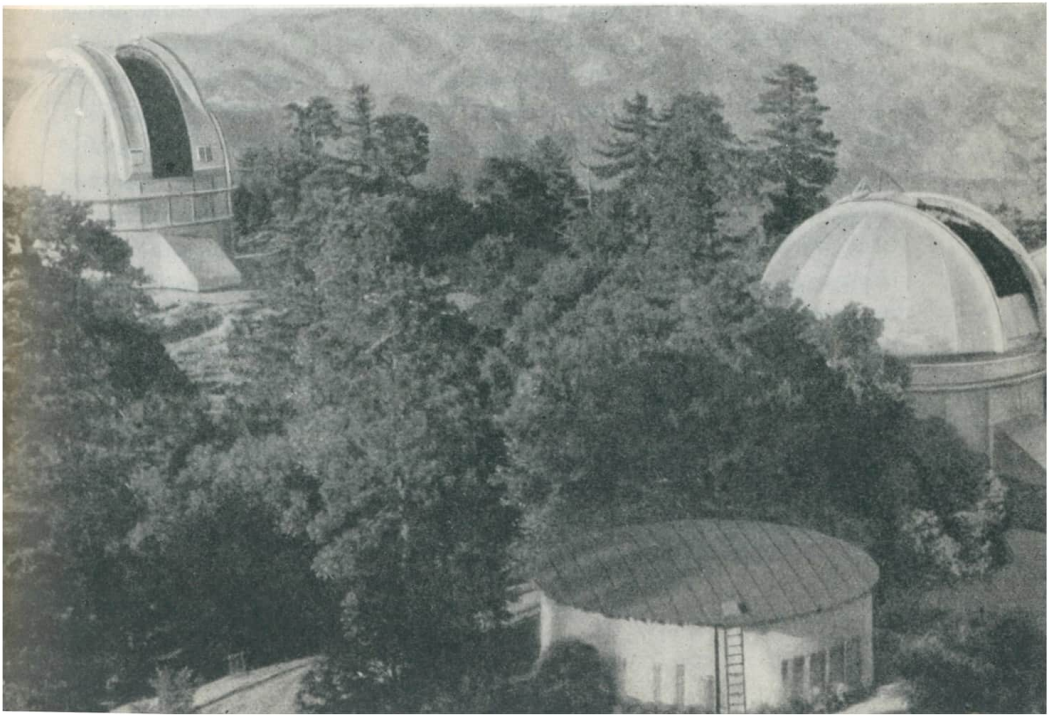
Demgegenüber verwiesen viele Astronomen schon im vergangenen Jahrhundert auf die Möglichkeit, daß sich auf dem Mond wenigstens eine lokale Atmosphäre erhalten hat, die vielleicht in der Gegenwart noch von zeitweiligen örtlichen Gasaustritten aus dem Inneren des Mondes oder durch teilweise Verdampfung bestimmter Stoffe an der Mondoberfläche ergänzt wird. Sie behaupteten das auf Grund von Beobachtungen, die leider nicht verbürgt sind.

So führt beispielsweise T. G. Elger an, daß er am 1. Februar 1887 beobachtet habe, daß die Schatten der Bergwälle im Inneren der

Wallebene Plato „unscharf“ und wie verwischt waren. Er meint, daß auf dem Mond angeblich doch irgendwelche, wenn auch sehr bescheidene Wolkenerscheinungen existieren. Auch C. Flammarion schreibt, daß er am siebenten Tag der Lunation angeblich häufig den östlichen Teil des Mare Serenitatis von der übrigen, von der Sonne noch nicht beleuchteten Gegend durch eine nicht scharfe, sondern sehr unbestimmte Grenze getrennt sah, die man für einen wirklichen Halbschatten halten konnte. In neuester Zeit werden weitere ähnliche Beobachtungen von T. W. Webb, A. C. Raynard, W. S. Franks u. a. verzeichnet. Den größten Teil dieser Beobachtungen kann man aber mit den besonderen Eigenschaften des Mondgeländes an den Stellen erklären, auf die sich diese Beobachtungen beziehen, so beispielsweise durch die verschiedene Neigung und Welligkeit der Oberfläche der Mondmeere. A. P. Moore schreibt den größten Teil dieser Beobachtungen dem Einfluß des aschgrauen Mondlichtes zu.

Sehr interessant sind die zeitweise beobachteten „Vernebelungen“

Sternwarte auf dem Mt. Wilson in Kalifornien, wo Pettit und Nicholson die Temperatur der Mondoberfläche maßen



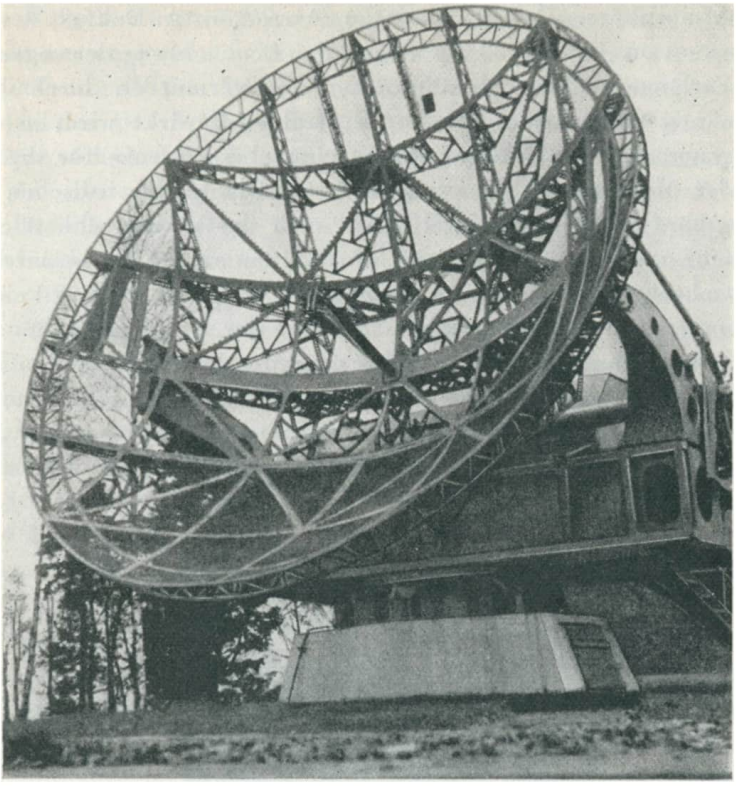
bestimmter Mondgegenden, von denen wenigstens einige eine ganz reale Grundlage haben und in letzter Zeit eine Bestätigung auch durch die Photographie erfuhren. So führt zum Beispiel schon C. Flammarion (im Jahre 1880) an, daß er „in zerklüfteten Gegenden, die sich nördlich von der Rille Hyginus erstrecken", unzählige Male einen besonderen, veränderlichen grauen Hauch beobachtete, der nicht einfach optischen Ursprungs war, sondern von Nebel herrühren konnte. Am 2. August 1939 beobachtete A. P. Moore unter sehr günstigen Bedingungen eine „deutliche Vernebelung" inmitten der Wallebene Schickard. Am 31. August 1944 sah hier H. P. Wilkins etwas Ähnliches: Bei der Beobachtung des Bodens dieses Kraters mittels eines 8,5zölligen Reflektors waren nur sehr wenige der sonst hier gewöhnlich sichtbaren kleinen Krater zu sehen. An ihrer Stelle konnte man eine große Zahl heller Flecken beobachten, die scharf mit ihrer dunklen Umgebung kontrastierten. In den Jahren 1865 und 1876 bemerkte E. Neison eine deutliche Vernebelung inmitten der bekannten Wallebene Plato. Dieser Mondkrater ist überhaupt bekannt als Schauplatz häufiger und sehr grundlegender Veränderungen, die lokalen atmosphärischen Erscheinungen zugeschrieben werden. So schreibt zum Beispiel H. P. Wilkins, wie er am 12. August 1944 um 4 Uhr Weltzeit beobachtete, daß der Boden dieser Wallebene außergewöhnlich dunkel war. Das ganze Amphitheater Platos war gleichmäßig dunkelgrau, viel dunkler, als es gewöhnlich bei Sonnenuntergang aussieht. Die gewohnten Einzelheiten waren nicht zu sehen. Statt dessen konnte man in der Nähe der Kratermitte einen großen hellen Fleck beobachten, dessen südlicher Rand sich deutlich in eine bestimmte Höhe über dem Boden erhob, während sein Nordrand eindeutig mit der umgebenden Ebene in einer Fläche lag. Da dieser Fleck früher eine schärfere Abgrenzung hatte, die den Charakter einer einfachen Erhebung aufwies, ist es klar, betont Wilkins, daß im Laufe der Zeit eine dunkle Wolke oder Dampf den Boden bis zur Höhe des Kraterrandes bedecken konnte. Einen ähnlichen Gedanken äußerten vordem T. G. Elger und W. Goodacre. Birt be-

obachtete im Inneren Platos angeblich sogar „Lichtblitze". Im Jahre 1952 versuchten H. P. Wilkins und A. P. Moore bei ihrem Besuch auf der Sternwarte in Meudon bei Paris unter sonst ausgezeichneten Beobachtungsbedingungen vergeblich, mit dem dortigen 33zölligen Refraktor bei 460facher Vergrößerung eine kleine Kratergrube im östlichen Teil Platos zu finden, die schon früher von W. H. Steavenson mit Hilfe eines 28zölligen Refraktors der Sternwarte von Greenwich entdeckt worden war. In den anderen Teilen dieser Wallebene waren demgegenüber sehr viele Details zu sehen. Einige Stunden später beobachtete der amerikanische Selenologe T. A. Cragg mittels eines 12zölligen Refraktors den Boden von Plato. Er war sehr überrascht durch die Feststellung, daß im Inneren dieser Wallebene, wo er früher viele Einzelheiten beobachtet hatte, nicht ein einziges Detail zu sehen war. Wilkins erklärte, daß sich im Inneren Platos deutlich ein verdunkelndes Medium zeigte, das sich im Verlaufe einiger Stunden von Osten nach Westen ausbreitete und zuletzt den ganzen Boden dieses Kraters bedeckte. Am 10. Februar 1949 beobachtete F. H. Thornton eine „deutliche Vernebelung" in der Gegend einer bekannten Rille, nahe dem Ringgebirge Aristarchus. A. P. Moore beobachtete am 20. August 1951 eine ähnliche Erscheinung auch im Inneren des Kraters Pickering. Alle diese Beobachtungen wurden aber am 21. Januar 1951 übertroffen, als der amerikanische Beobachter R. M. Baum bekanntgab, daß er in der Nähe der Wallebene W. Humboldt am südwestlichen Rande des Mondes eine „wirkliche Wolke" gesehen habe. Die ganze Erscheinung dauerte etwa 3 Stunden; das beobachtete Objekt veränderte in dieser Zeit seine Form. Im Oktober 1956 stellte der amerikanische Astronom D. Alter eine interessante Eintrübung in der bekannten Wallebene Alphonsus fest. Diese „Eintrübung" betraf offenbar nur einige Teile dieses Kraters; so war beispielsweise die bekannte, am inneren Fuße des westlichen Walles entlanglaufende Rille nicht zu sehen, während die übrigen Teile des Bodens dieser Wallebene ihren gewohnten Anblick boten. Daß es sich tatsächlich um eine zeitweilige „Vernebelung" dieser

Gegend des Mondes durch ein höchstwahrscheinlich in bestimmter Höhe über der Mondoberfläche befindliches Medium handelte, geht daraus hervor, daß die von D. Alter angefertigten dokumentarischen photographischen Aufnahmen dieser Erscheinung im ultravioletten Licht ein mit der visuellen Beobachtung übereinstimmendes Bild zeigen, während sie im infraroten Licht den völlig normalen Anblick dieser Gegend darbieten. Daß es sich hierbei nicht um den Einfluß der irdischen Atmosphäre handelt, ist daraus zu ersehen, daß die auf diesen Bildern festgehaltene umliegende Mondlandschaft (Krater Ptolemäus) auch auf den ultravioletten Photographien keinerlei Besonderheiten aufweist.

Aus diesen Beobachtungen ergibt sich höchstwahrscheinlich die Möglichkeit, daß es auf dem Mond offenbar auch in der heutigen Zeit zu zeitweiligen, wenn auch ziemlich seltenen Gasausbrüchen kommt, über deren nähere Beschaffenheit wir vorläufig nichts Bestimmtes wissen. Im Hinblick auf die am Mond herrschenden Bedingungen ist aber kaum damit zu rechnen, daß sich diese Gase in größerem Maße ausbreiten, für eine längere Zeit an bestimmten Stellen anhäufen und dort gewissermaßen eine lokale Atmosphäre bilden. Es scheint ziemlich sicher, daß sich diese Gase sehr schnell in den Raum zerstreuen und höchstens von Zeit zu Zeit einen kleinen Teil zur Bereicherung der außerordentlich dünnen Gashülle um diese kleine Welt beitragen können.

Wie dicht ist diese Hülle, und woraus setzt sie sich zusammen? Bis zum Jahre 1956 wußten wir von der „Atmosphäre" des Mondes nur so viel, daß sie grenzenlos dünn sein muß, weil wir sie sonst mit dem Spektroskop entdecken müßten. Aber außerdem wußten wir von ihr nichts, und viele Astronomen bestritten ihre Existenz überhaupt. In den Jahren 1943 bis 1948 versuchte der bekannte sowjetische Astronom W. G. Fessenkow aus der Polarisation des Mondlichtes wenigstens die sogenannte obere Grenze für die Masse der Mondatmosphäre zu bestimmen, das heißt ihre größtmögliche Menge. Er kam zu dem Ergebnis, daß sie höchstens etwa ein Millionstel (10^{-6}) der Masse der Erdatmosphäre betragen kann.

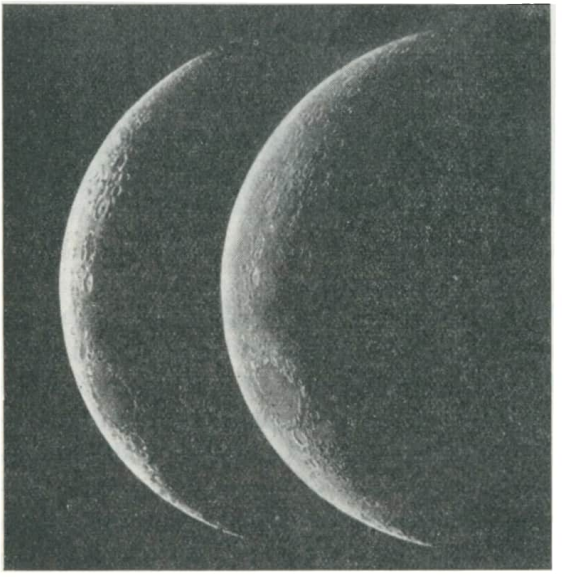


Radioteleskop der Sternwarte Ondřejov. Durchmesser der Parabolantenne 7,5 m

Demnach hätte die Mondatmosphäre eine Dichte von höchstens etwa $5 \cdot 10^{-4}$ der Dichte unserer Atmosphäre, und der barometrische „Druck" an der Oberfläche des Mondes wäre etwa 0,02 mm Quecksilbersäule. J. N. Lipski (1954) kam auf Grund derselben Methode zu ähnlichen Ergebnissen. Danach beträgt die Dichte der Mondatmosphäre etwa 10^{-4} der Dichte der Erdatmosphäre. Diese Ergebnisse erwiesen sich aber später als unhaltbar, denn aus vielen neuen Arbeiten wurde offenbar, daß die Dichte der Mondatmosphäre

entschieden kleiner sein muß als 10^{-6} der Dichte der irdischen Atmosphäre. Der französische Astronom A. Dollfus bestimmte schon im Jahre 1952 auf Grund der Beobachtung der sogenannten Verlängerung der Mondhörnchen, die vermutlich durch die Brechung (Refraktion) der Sonnenstrahlen bewirkt wird, in der angenommenen Mondatmosphäre eine obere Grenze für die Dichte der Mondatmosphäre von 10^{-9} der Dichte der irdischen Atmosphäre am Meeresspiegel; aber auch das schien schließlich noch sehr viel zu sein. In den Jahren 1954 und 1956 arbeiteten die tschechoslowakischen Astronomen F. Link und L. Neužil eine neue interessante Methode zum Nachweis der Anwesenheit auch einer ganz geringen Atmosphäre auf dem Monde aus, die sich aus freien Elektronen und positiv geladenen Ionen mit einer Dichte in der Größenordnung von etwa 10^{-12} zusammensetzt, also einer „Atmosphäre", die mit ihren Eigenschaften annähernd den obersten Tei-

Zunehmen der Mondsichel



len der sogenannten ionosphärischen F-Schicht der Erdatmosphäre in einer Höhe von etwa 400 km entspräche. Link setzt voraus, daß es, wenn am Himmel die Bedeckung einer entsprechend starken Radioquelle durch den Mond eintritt, in dieser Mondatmosphäre zur Refraktion der Strahlen des „Radiosternes" kommen müßte. Das würde sich durch eine geringe Verlängerung der beobachteten Dauer der Bedeckung gegenüber ihrer zuvor berechneten Zeit zeigen. Da es in den Jahren 1955 bis 1957 zu einigen Bedeckungen der bekannten Radioquellen 05,01 (Krebsnebel M 1) im Sternbild des Stiers und 06,01 in den Zwillingen kam, ergab sich eine ausgezeichnete Gelegenheit, nicht nur die genauere Lage und Form dieser Radioquellen zu bestimmen, sondern auch eventuelle Spuren der Mondatmosphäre zu registrieren. Auf dem bekannten Radioobservatorium in Jodrell Bank in England unterzogen sich C. H. Costain, B. Elsmore und G. R. Whitfield dieser Aufgabe. Sie beobachteten eine Verlängerung der Bedeckung des Krebsnebels von 0,4 bis 0,26 Minuten bei einer Wellenlänge von 3,7 m und schlossen daraus, daß die Dichte der Mondatmosphäre nur etwa 10^{-13}, also etwa ein Zehnbillionstel der Dichte der irdischen Atmosphäre betrage. Praktisch bedeutet das, daß in 1 cm^3 der Mondatmosphäre etwa 1000 Elektronen oder andere Teilchen gleicher Gesamtmasse enthalten sind. E. J. Öpik (1957) schließt aus dieser Beobachtung, daß die Höhe der Mondatmosphäre etwa 100 km beträgt und ihre maximal mögliche Dichte etwas größer ist, als Costain, Elsmore und Whitfield anführen: etwa 10^{-15} g/cm^3 oder 10^{-12} der Dichte der irdischen Atmosphäre an der Meeresoberfläche. Hiernach betrüge die Anzahl der Ionen oder Elektronen in 1 cm^3 der Mondatmosphäre etwa 1000 bis 10000. Der größte Teil dieses Mond„gases" setzt sich danach aus freien Elektronen zusammen, die aus der Mondoberfläche durch die ionisierende Wirkung der Sonnenstrahlen herausgeschleudert werden. Demnach wäre die Mondatmosphäre zum überwiegenden Teil eine Übergangserscheinung, die sich nur auf der von der Sonne bestrahlten Tagseite des Mondes bemerkbar macht. Es ist interessant, daß

bereits C. G. Wates auf die Anwesenheit einer ähnlichen „zeitweiligen" Atmosphäre auf dem Monde schloß, wenn auch aus einem etwas anderen Gesichtspunkt heraus. Dieser Gedanke hat eine sehr interessante Geschichte. Bei der Bedeckung des Planeten Jupiter durch den Mond am 24. Mai 1860 sah C. Flammarion kurze Zeit, nachdem sich die Jupiterscheibe mit dem Rand des Mondes berührt hatte, einen dunklen, unbestimmten Strich, der den Mondrand säumte und sich teilweise auch auf der Jupiterscheibe abzeichnete. Flammarion schrieb diese Erscheinung der angenommenen Mondatmosphäre zu. Im Jahre 1892 beobachteten dieses Phänomen auch W. H. Pickering und A. E. Douglas. Pickering stellte fest, daß der dunkle Streifen auf dem Hintergrunde der Jupiterscheibe eine Dicke von etwa 3″ hatte und daß er nur in der Nähe des beleuchteten Mondrandes sichtbar war. Es gelang Pickering, diesen rätselhaften Streifen auch zu photographieren. Im Jahre 1944 sahen den dunklen Streifen auf dem Jupiter während der Bedeckung durch den Mond erneut und unabhängig voneinander W. H. Haas, C. G. Wates und viele andere Beobachter, die ziemlich einheitlich seine Breite mit 3″ bis 5″ und in Übereinstimmung mit der Feststellung Pickerings angaben, daß man ihn nur in der Nähe des beleuchteten Mondrandes beobachten konnte. Nach C. G. Wates wird der genannte Streifen durch Dämpfe von Eis oder von gefrorenen Gasen (CO_2) verursacht, die von der Sonne im Verlaufe des Mondtages verdampft werden und sich wieder niederschlagen, wenn die Sonne untergegangen ist. Demnach würde auf dem Monde eine gewisse „zeitweilige" (temporäre) Atmosphäre existieren, die jeden Tag kurz nach Sonnenaufgang neu entsteht und nach Sonnenuntergang wieder verschwindet. Vorläufig muß man aber die Existenz des dunklen Streifens als zweifelhaft ansehen. J. E. Westfall nämlich führt zum Beispiel an, daß er am 31. August 1957, als der Mond den Planeten Saturn bedeckte, bei der Beobachtung durch einen 20zölligen Refraktor der Chabot-Sternwarte in Berkeley in Kalifornien auf der beleuchteten Mondseite von dem parallel zum Mondrand verlaufenden Streifen keine

Spur entdeckte. Auch die sorgfältige Auswertung der photographischen Aufnahmen erbrachte „keine außergewöhnlichen Erscheinungen".

C. S. Beals von der Sternwarte Victoria in Canada ist der Meinung, daß die Existenz einer „dünnen, vorübergehenden Atmosphäre

Meere und Krater auf dem Monde



auf dem Mond" mit Hilfe des Spektrogramms eines genügend hellen Sternes dicht vor seiner Bedeckung feststellbar sein muß. Dieser Versuch wurde aber bisher nicht durchgeführt.

Es ist erwähnenswert, daß Professor A. R. Khan aus Hyderabad in Indien schon im Jahre 1946 den Vorschlag unterbreitete, zum Zwecke der „Entdeckung" einer möglichen Mondatmosphäre Spektralaufnahmen der dunklen, unbeleuchteten Seite des Mondes zu machen. Wenn auf dem Monde eine ähnliche ionosphärische Schicht existiert wie auf der Erde, müßten dann darin mit Hilfe des Spektroskops die Linien des lunaren Polarlichtes feststellbar sein oder wenigstens „Lichter des Nachthimmels", die eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Polarlicht auf der Erde haben. Diesen Vorschlag versuchte im Jahre 1955 N. A. Kosyrew zu realisieren. Er verwendete hierzu einen 50zölligen Reflektor der Sternwarte auf der Krim. Der Spalt des angeschlossenen Spektrographen war während der etwa eine Stunde dauernden Belichtung so gelagert, daß er den Mondrand verfolgte, wo das „Phosphoreszieren" der Mondatmosphäre am besten sichtbar sein mußte; aber die Aufnahmen zeigten nur ein schwaches Spektrum des aschgrauen Lichtes und keinerlei andere Besonderheiten. Kosyrew zog aus dieser Beobachtung zwei sehr interessante Schlußfolgerungen: Auf der Erde ruft die aus Protonen und freien Elektronen bestehende Korpuskularstrahlung der Sonne das Polarlicht hervor, die Kathodolumineszenz der Ionosphäre. Auf dem Monde gibt es offenbar keine genügend dichte Atmosphäre, die ähnliche Erscheinungen hervorzubringen imstande wäre. An ihrer Stelle müßte es dort aber zur Entstehung eines „Polarlichtes" direkt auf der Oberfläche kommen. Bei den niedrigen Temperaturen der Nachtseite des Mondes beginnen viele Mineralien zu lumineszieren (siehe Seite 183). Hätte der Mond ein ähnliches Magnetfeld wie die Erde, müßten wir die Lumineszenz auch auf seiner Nachtseite beobachten. In diesem Falle würden die Lumineszenzzonen des „Polarlichtes" das aschgraue Licht überlagern. Aber nichts dergleichen konnte beobachtet werden. Es scheint deshalb auf dem Mond kein Magnetfeld

zu existieren. Der Einfall der Korpuskularstrahlung der Sonne auf die Mondoberfläche richtet sich nach den gleichen geometrischen Gesetzen wie der Einfall von Photonen; das heißt, die Wirkung der Korpuskularstrahlung kann man nur auf der beleuchteten Seite des Mondes verfolgen.

Kosyrew stellte schon im Jahre 1955 fest, daß die Intensität des „Polarlichtes" auf dem Monde, das heißt die Lumineszenz der Mondoberfläche, sehr schwanken kann, je nachdem, wie sich der Strom der von der Sonne auf den Mond fallenden Teilchen verändert. Eine Gruppe von Astronomen in Manchester in England knüpfte an die Beobachtungen Kosyrews an und steht nach der mündlichen Mitteilung von Professor Z. Kopal (vom Dezember 1960) vor der Bestätigung der Entdeckung, daß die Intensität der lumineszierenden Bestandteile des Mondlichtes sehr wahrscheinlich noch in weit kürzeren Intervallen schwankt, als bisher bekannt war. Diese Eigenschaft nähert die Lumineszenz des Mondes noch mehr den Erscheinungen des irdischen Polarlichtes an, von dem uns bekannt ist, daß es eine sehr veränderliche Erscheinung darstellt; es reagiert sehr empfindlich auch auf die kleinsten Veränderungen im Strom der in die Erdatmosphäre einfallenden Teilchen. Es ist nicht ausgeschlossen, daß in Zukunft empfindliche Instrumente auf verschiedenen Sternwarten der Welt ununterbrochen den Mond bewachen und den Verlauf der Lumineszenz seiner Oberfläche verfolgen werden. Diese Geräte können so zu wertvollen Helfern des Menschen bei seinem Vordringen in den kosmischen Raum werden, denn sie werden ihm jede erhöhte Gefahr, jeden plötzlichen erhöhten Zufluß gefährlicher Teilchen von der Sonne in den umgebenden interplanetaren Raum signalisieren. Sie könnten dadurch zu einer gewissen Analogie heutiger meteorologischer Stationen werden, die ununterbrochen den Verlauf der verschiedensten Witterungsfaktoren verfolgen und damit die Sicherheit des irdischen Flugverkehrs überwachen.

W. F. Edwards und L. B. Borst (1958) erwägen, ob neben den freien Elektronen und Ionen, die durch die ionisierende Wirkung

der Sonnenstrahlung ununterbrochen aus Mondgesteinen ausgestoßen werden, auch noch andere Quellen von Gasen auf dem Mond möglich sind. Sie kommen zu dem Schluß, daß nur zwei von mehreren Möglichkeiten der geschätzten Dichte der Mondatmosphäre (ihrer Meinung nach beträgt der Druck auf der Mondoberfläche etwa $2 \cdot 10^{-13}$ atm) am besten entsprechen: der natürliche radioaktive Zerfall, hauptsächlich von Uran U-238, wobei die seltenen Gase Krypton und Xenon entstehen, die zur Mondoberfläche diffundieren und sich dort allmählich häufen, und eine natürliche Diffusion von vorwiegend in den Mondgesteinen enthaltenen Gasen zur Mondoberfläche. Wie Berechnungen zeigen, wurde durch den natürlichen Zerfall von U-238 in den letzten 4 Milliarden Jahren auf dem Mond eine solche Menge Krypton und Xenon gebildet, daß eine Atmosphäre mit einem Druck von der Größenordnung 10^{-12} atm entstanden sein könnte. Wenn wir voraussetzen, daß etwa ein Zehntel dieser Menge zur Oberfläche diffundiert, bekommen wir um den Mond eine Gashülle mit einem Druck von 10^{-13} atm. Dies würde auch den Verhältnissen entsprechen, wie sie Costain, Elsmore und Whitfield auf der Grundlage ihrer Mondbeobachtungen dargestellt haben. Die Diffusion der Gase aus dem Inneren des Mondes zu seiner Oberfläche wird dadurch erleichtert, daß die Mondoberfläche, wie aus anderen Beobachtungen hervorgeht, offenbar entweder aus porösen Gesteinen besteht oder von einer Schicht dünnen Staubes bedeckt ist und daß sie ferner, wie ebenfalls Beobachtungen zeigen, an vielen Stellen von recht tiefen Klüften durchzogen wird. Daß uns in Zukunft eine knapp um den Mond fliegende Rakete ein Muster der Mondatmosphäre „mitbringen" könnte, halten Edwards und Borst für sehr unwahrscheinlich, denn unter Mondbedingungen können die einer durchdringenden Strahlung ausgesetzten Gasmoleküle unzerstört nur bis zu einer Höhe von etwa 10 km über die Oberfläche des Mondes aufsteigen.

Insgesamt zeigt sich also, daß der Raum um den Mond nahezu die Eigenschaften eines völligen Vakuums hat und sich auf diese Weise nur sehr wenig von dem umliegenden interplanetaren Raum unter-

scheidet, so daß eine „Mondatmosphäre" vom biologischen und astronautischen Standpunkt aus eigentlich nicht existiert. Eine gewisse Ausnahme bilden wohl nur die Stellen in der Gegend einiger Rillen, tektonische Brüche, dicht an der Oberfläche des Mondes, wo sich zeitweise bestimmte „größere" Mengen von Gasen aus tieferen Schichten der Mondrinde anhäufen.

Warum sich auf dem Mond zum Unterschied von unserer Erde bis zum heutigen Tag keine genügend dichte Atmosphäre erhalten hat und warum der Mond auch heute keine behalten kann, geht aus der kinetischen Theorie der Gase hervor. Danach sind die Gasmoleküle in ununterbrochener Bewegung, deren Geschwindigkeitsquadrat proportional der Wärme und umgekehrt proportional dem Molekulargewicht des Gases ist. So beträgt zum Beispiel bei 0 °C die mittlere Molekulargeschwindigkeit des Wasserstoffmoleküls 1840 m/s, des Heliummoleküls 1310 m/s, des Wasserdampfmoleküls 620 m/s. In einer Gaswolke kommt es zu ununterbrochenen Zusammenstößen einzelner Moleküle, wobei ein Molekül einem anderen Molekül einen beträchtlichen Teil seiner Bewegungs- oder kinetischen Energie abgeben kann. Zu diesen Zusammenstößen und gegenseitigen Übertragungen der Geschwindigkeit kommt es natürlich um so häufiger, je dichter das betreffende Gas und je höher seine Temperatur ist. Wenn der Fall eintritt, daß ein Gasmolekül, welches sich von der Oberfläche des Planeten oder Mondes wegbewegt, die Entweich- oder parabolische Geschwindigkeit (auf der Erde 11,2 km/s, auf dem Mond 2,4 km/s) erreicht, überwindet es die Anziehungskraft des „mütterlichen" Körpers und entweicht unwiederbringlich in den Raum.

Die in unserer Atmosphäre vorkommenden leichten Gase, zum Beispiel Sauerstoff, Stickstoff und Wasserdampf, müssen aus der Mondatmosphäre schon lange entwichen sein. Sind dort auch nur Spuren von Gasen verblieben, so können das nur einige allerdings stark verdünnte Gase mit großem Molekulargewicht, zum Beispiel CO_2, SO_2, sein. H. Shapley nimmt an, daß auf dem Mond eine sehr dünne Atmosphäre vorhanden ist, die sich aus schweren Edelgasen

zusammensetzt, hauptsächlich Argon, das durch den Zerfall radioaktiver Isotope des Kaliums K-40 entsteht und aus den Mondgesteinen durch den ununterbrochenen Aufprall von Meteoriten befreit wird.

Die Temperatur auf dem Monde

Der Mond wird im gleichen Maße wie unsere Erde von der Sonne beleuchtet, und da auch seine Entfernung von der Sonne praktisch die gleiche ist, müßte die durchschnittliche Temperatur auf dem Monde der Durchschnittstemperatur auf der Erde gleichkommen. Der Mond hat aber keine genügend dichte Atmosphäre, die die Temperatur tagsüber mäßigen und nachts bewahren könnte. Deshalb sind die Tagestemperaturen auf dem Monde im Durchschnitt bedeutend höher und in der Nacht wieder bedeutend niedriger als auf der Erde. Die Amplitude der täglichen Temperaturschwankung ist also auf dem Mond weitaus größer als auf unserem Planeten. Dieser Unterschied wird noch dadurch verstärkt, daß der Tag und ebenso die Nacht auf dem Mond beinahe 15 Erdentage dauern.
Die Temperatur der Oberfläche des Mondes können wir heute direkt messen. Der Mond sendet neben der sichtbaren Strahlung (dem Licht) auch langwellige unsichtbare Wärmestrahlung aus. Zum größten Teil besteht diese Mondwärmestrahlung, die selbst verschwindend klein ist, aus der reflektierten Wärmestrahlung der Sonne, und nur ein ganz kleiner Rest entfällt auf die eigentliche Wärmestrahlung des Mondes. Es ist dies die von der Mondoberfläche ursprünglich eingefangene und wieder in den kosmischen Raum emittierte (ausgesandte) Wärmestrahlung. Die Mondwärme kann man mit Hilfe besonderer außerordentlich empfindlicher Einrichtungen messen, die man Bolometer und Thermoelemente nennt. Die von der Mondoberfläche ausgesandte Wärme kann von der „Sonnenwärme“ verhältnismäßig leicht dadurch getrennt werden, daß die Mondstrahlung, bevor wir sie auf das Gerät einwirken

lassen, durch eine mit Wasser gefüllte transparente Küvette geleitet wird. Diese läßt die von der Mondoberfläche ausgesandte langwellige Wärmestrahlung nicht durch; sie läßt aber die Sonnenstrahlung passieren. Indem wir die Gesamtstrahlung des Mondes messen und sie mit der Strahlung vergleichen, die die Wasserküvette durchlaufen hat, können wir leicht die Größe des fehlenden Teiles der Mondstrahlung feststellen, also die Mondwärme selbst. Ähnliche Messungen ermöglichen es uns, die eigene Temperatur der Mondoberfläche auszurechnen. Den ersten gelungenen Versuch in dieser Richtung unternahm Lord Rosse (1870), als er auf der Grundlage seiner Beobachtungen feststellte, daß die Temperatur am Mondäquator 3 Tage nach Vollmond zwischen 75 °C (in der Nähe des Terminators) und 200 °C schwankt. Die tägliche Temperaturamplitude, also der Unterschied zwischen der höchsten, der Mittagstemperatur, und der niedrigsten, der Nachttemperatur, auf dem Mond beträgt nach Rosse mehr als 300 °C. Verey und Alleghany stellten später fest, daß sich die Temperatur der Mondoberfläche verhältnismäßig sehr rasch ändert. Eine bestimmte Stelle des Mondäquators, auf die die Sonnenstrahlen unter einem Winkel von etwa 15 ° auftreffen, hat eine Temperatur von 0 °C. In der Zeit, in der die Sonne senkrecht darauf scheint, beträgt seine Temperatur annähernd 100 °C. In neuerer Zeit machten sich um die Messung der Temperatur auf dem Mond besonders W. W. Coblentz (1925 bis 1927), E. Pettit und S. B. Nicholson (1927, 1930) und W. M. Sinton (1955) verdient.

Nach Pettit und Nicholson beträgt die Temperatur des subsolaren Punktes auf dem Mond, das ist der von der Sonne senkrecht bestrahlte Ort, zur Zeit des Vollmondes (dann liegt dieser Punkt im Zentrum der sichtbaren Halbkugel) 134 °C. An einem Punkt, der von diesem 0,5 Mondhalbmesser entfernt ist, maßen Pettit und Nicholson eine Temperatur von 122 °C, an einem 0,75 Mondhalbmesser entfernten Punkt 102 °C. An einem Punkt mit einer Entfernung von 0,9 Mondhalbmesser maßen sie 77 °C. Knapp am Rande des Mondes stellten sie eine Temperatur von 67 °C fest.

Demgegenüber beträgt die Temperatur des subsolaren Punktes im ersten und letzten Viertel, wenn er also knapp am Mondrande liegt, nur 85 °C. Dieser unerwartete Unterschied kann nach Pettit und Nicholson wohl damit erklärt werden, daß die zahlreichen Unebenheiten am Mondrande die in Richtung zum Beobachter verlaufende Wärmestrahlung stark zerstreuen, so daß sich ein Teil davon unterwegs verliert. Die Minimaltemperatur der unbeleuchteten – nächtlichen – Mondhälfte schätzen Pettit und Nicholson auf —153 °C.

Im Jahre 1927 stellte E. Pettit eine interessante Tatsache fest. In diesem Jahre sollte am 14. Juni eine totale Mondfinsternis eintreten, und Pettit maß kurz vor Beginn der Finsternis die Temperatur einer bestimmten, etwa 2′ vom südlichen Mondrand entfernt liegenden Stelle. Er stellte fest, daß sie 69 °C betrug. Sobald aber auf diese Stelle der Halbschatten der Erde fiel, sank ihre Temperatur rasch ab, und nach etwa einer Stunde, zu Beginn der totalen Verfinsterung, betrug sie schon —63 °C. Nach etwa weiteren 20 Minuten, als diese Stelle schon von dem Kernschatten bedeckt wurde, vollzog sich ein sehr schnelles weiteres Absinken bis auf —103 °C. Nach den verbleibenden 2 Stunden und 20 Minuten der totalen Verfinsterung verlangsamte sich das Tempo des Absinkens der Temperatur bedeutend. Am Ende der totalen Finsternis wies der untersuchte Punkt eine Temperatur von —121 °C auf. Nach den folgenden 20 Minuten der neuen partiellen Finsternis erhöhte sich die Temperatur auf —113 °C, und dann begann sie in schnellerem Tempo zu steigen. Etwa nach 30 Minuten hatte die Stelle wieder eine Temperatur von 57 °C.

Wie als erster Epstein bemerkte, kann man aus diesen Beobachtungen ableiten, daß das Material der Mondoberfläche ein sehr guter Isolator ist, daß sie also eine sehr kleine Wärmekapazität besitzt. Die Oberfläche des Mondes kann also kaum aus Granit, Kalkstein oder anderen an der Erdoberfläche üblichen Gesteinen bestehen. Eher darf man annehmen, daß sie aus Bimsstein (einer besonderen Art poröser Lava), vulkanischer Asche oder anderen porösen oder staubförmigen Materialien besteht. Der holländische Forscher

A. J. Wesselink und gemeinsam mit ihm auch einige sowjetische Forscher zeigten in neuerer Zeit, daß es auf der Erde kein Material gibt, das unter normalen Umständen ähnlich extreme Wärmeeigenschaften aufweist, wie sie die Mondoberfläche besitzt, und daß ähnliche Eigenschaften nur ein pulverisiertes, also staubförmiges Material im hohen Vakuum haben kann. Nach Wesselink braucht man sich nicht vorzustellen, daß die Staubdecke auf dem Mond sehr dick ist, denn die Wärmeamplituden reichen bei Finsternissen offenbar nur wenige Millimeter tief. Die Korngröße dieser angenommenen Staubdecke schätzt Wesselink auf 0,3 bis 0,1 mm.

Als eines der interessantesten Ergebnisse der neuesten Mondforschung muß man die Feststellung ansehen, daß bestimmte Stellen der Mondoberfläche (zum Beispiel der Boden des Mondkraters Tycho) bei Verfinsterung des Mondes ein bedeutend langsameres Absinken der Temperatur aufweisen als ihre nahe Umgebung; sie bleiben für die Zeit der Finsternis relativ wärmer. Wodurch das hervorgerufen wird, kann man vorläufig nicht mit Bestimmtheit entscheiden. Es schien eine naheliegende Erklärung zu sein, daß sich unter diesen Stellen der Mondoberfläche vielleicht bis heute eine vulkanische Tätigkeit abspielt, die die Ursache einer bestimmten Temperaturerhöhung sein könnte; aber es sind auch andere Auslegungen möglich. Die Ursachen der beobachteten Erscheinung können zum Beispiel von dem unterschiedlichen und uns nicht näher bekannten stofflichen oder physikalischen Zustand verschiedener Stellen auf dem Monde abhängen.

Wenn auch die Frage der Staubdecke auf dem Mond noch immer nicht endgültig entschieden ist, so kann man doch annehmen, daß die Mondoberfläche an vielen Stellen von einer ziemlich starken Schicht mineralischen Materials bedeckt sein muß, einem feinen Staub, gröberem Sand und kleineren und größeren Felsblöcken, den Produkten eines allmählichen, Tausende und Millionen von Jahren währenden Zerfalls und allmählicher Zerstörung der Mondoberfläche, besonders der Berggipfel, durch die Wirkung der heftigen Temperaturunterschiede. Durch rasche Erwärmung und darauf



Schuttkegel des Monte Pelmo in den italienischen Alpen (Dolomiten)

folgende starke Abkühlung, die von Ausdehnung und darauf folgender Zusammenziehung oder Disjunktion und Detraktion (von Bülow, 1956) begleitet wird, kommt es zur allmählichen Zerstörung der Mondoberfläche und durch die Wirkung der Gravitation unter Umständen zur Ablagerung und Häufung der Produkte dieser „Wärmeverwitterung" in nahen Niederungen, auf Berghängen, in Bergtälern, Rillen usw.

Während der Mondfinsternis am 13. März 1960 entdeckten Shortil, Conlex und Borough auf dem Dominion Observatory, daß sich die Krater Tycho, Copernicus und Aristarchus langsamer abkühlten als die benachbarte Gegend. Der Krater Tycho zum Beispiel erhielt sich über die ganze Zeit der Finsternis eine gleichbleibende Temperatur, die etwa um 40 bis 60 °C höher lag als die seiner Umgebung. Diese Tatsache bestätigte im Verlaufe der Mond-

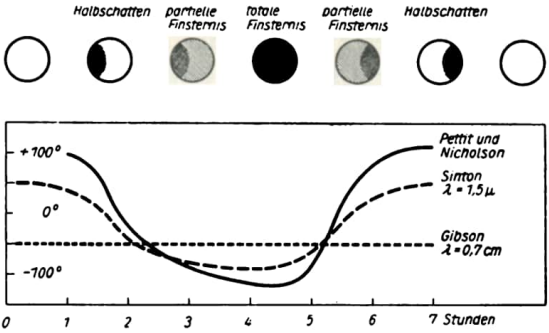
finsternis vom 5. September 1960 W. M. Sinton, der feststellte, daß die Temperatur des Kraters Tycho während der völligen Finsternis ungefähr –35 °C blieb. Dies ließe sich damit erklären, daß die isolierende Staubschicht in der Gegend dieses Kraters eine geringere Stärke aufweist als die der Umgebung und etwa 0,3 mm beträgt.

Die Wirkung der mechanischen Verwitterung des Gesteines wird gewöhnlich entweder überschätzt oder auch unterschätzt. Insgesamt ist klar, daß sich Veränderungen, zu denen es auf dem Monde auf Grund der mechanischen Verwitterung kommt, während einer kurzen Zeitspanne unserer Beobachtung entziehen. Man kann damit schwerlich tatsächliche oder scheinbare Veränderungen größeren Ausmaßes, etwa Formveränderungen oder sogar das Verschwinden ganzer Krater, die Entdeckung neuer Rillen u. ä. erklären. Andererseits ist es allerdings gleichfalls ein Fehler, diese Wirkung zu unterschätzen, wie das beispielsweise von Bülow (1956) tut, der von „nicht tief reichender Wirkung mechanischer Verwitterung" auf der Mondoberfläche spricht.

Auf die Oberfläche des Mondes wirkt offenbar nicht nur die Wärmeerosion, sondern auch eine ziemlich ausgedehnte Strahlungserosion überhaupt. Auf sie treffen nämlich nicht nur Wärmestrahlen aus dem Weltraum auf, sondern auch durchdringende ultraviolette Strahlen, Röntgenstrahlen, kosmische Strahlung und wohl auch Korpuskularstrahlen der Sonne, die hauptsächlich aus Protonen und Elektronen bestehen. Nach K. Buettner (1952) wirkt am zerstörendsten die sogenannte primäre kosmische Strahlung, die 10 bis 20 cm tief in die felsige Mondoberfläche eindringt und hier einerseits Kernveränderungen, andererseits eine starke Ionisation der Atome bewirkt, die die mineralischen Bestandteile der Mondgesteine bilden. Das hat schließlich eine völlige Desintegration (Zerstörung) der Kristallstruktur auf der Mondoberfläche zur Folge, chemische Veränderungen im Mondmaterial und endlich auch den mechanischen Zerfall. Buettner erklärt hiermit auch, warum die Mondoberfläche im Durchschnitt bedeutend dunkler ist als die

Oberfläche der Erde. Die ionisierende kosmische und solare Korpuskularstrahlung vermag nämlich im Verlaufe einer entsprechend langen Zeit auch bedeutende farbliche Veränderungen hervorzurufen. Das kann damit bewiesen werden, daß zum Beispiel manche irdischen Mineralien durch die Einwirkung ionisierender Strahlung deutlich dunkeln.

Pettit und Nicholson maßen die Mondtemperatur mit Hilfe eines Thermoelementes, das auf normale Wärmestrahlung empfindlich ist. Diese Strahlung entspringt unmittelbar der Oberfläche des Mondes und keineswegs dem Mondinneren, so daß die gemessenen Werte sich nur auf die Oberflächentemperaturen des Mondes beziehen. Im Jahre 1954 maß W. M. Sinton erneut die Temperaturen auf dem Monde. Er benutzte hierzu einen besonderen modernen Detektor für infrarote Strahlung, der bedeutend empfindlicher war als die bis dahin benutzten Thermoelemente und der auch infrarote Strahlung größerer Wellenlänge einzufangen vermochte, als sie Pettit und Nicholson untersuchen konnten. Diese Strahlen erreichen uns nicht mehr von der Oberfläche des Mondes aus, sondern aus einer bestimmten geringen Tiefe unter der Oberfläche, wohin zwar die von E. Pettit und Nicholson gefundenen heftigen Temperaturveränderungen noch reichen, aber nicht mehr so stark wie an der Oberfläche wirksam werden. Darum hat die von Sinton gewonnene Kurve der Temperaturveränderungen einen gemäßigteren Verlauf, und auch die von ihm festgestellte Durchschnittstemperatur auf dem Monde ist etwas niedriger als die von Pettit und Nicholson ermittelte. Nach Sinton beträgt die höchste Temperatur auf dem Monde annähernd 77 °C, die niedrigste —153 °C. Hieraus ist zu ersehen, daß in einer bestimmten, nicht sehr großen Tiefe unter der Mondoberfläche, wo die Temperaturschwankungen der Oberfläche nicht mehr hinreichen, eine bestimmte gleichmäßige Temperatur herrschen muß, ähnlich wie das auf der Erde in der sogenannten neutralen Zone der Fall ist, wo die Temperatur das ganze Jahr über gleich bleibt und annähernd der sogenannten mittleren Jahrestemperatur des gegebenen Ortes entspricht. Die



Absinken der Temperatur der Mondoberfläche während einer Mondfinsternis

Tiefe der neutralen Zone auf der Erde hängt von mehreren Faktoren ab, von denen der wichtigste die geographische Lage ist. In Mitteleuropa beträgt sie etwa 20 bis 25 m. Gehen wir von der neutralen Zone weiter in die Tiefe, beginnt die Temperatur wieder gleichmäßig zuzunehmen; das kommt daher, daß es in tieferen Teilen der Erdkruste zu einer Anhäufung von Wärme kommt, die beim radioaktiven Zerfall von Elementen im Erdinneren entsteht. Diese Wärme strömt allmählich zur Erdoberfläche und entweicht dort in den kosmischen Raum. Veränderungen der Temperatur mit der Tiefe werden gewöhnlich durch die sogenannte geothermische Stufe ausgedrückt: Das ist die Tiefe (in Metern), die wir hinabsteigen müssen, bis die Temperatur jeweils um 1 °C steigt. Eine geothermische Stufe beträgt gewöhnlich 33 m. Nach H. N. Russel liegt die neutrale Zone auf dem Mond viel näher an der Oberfläche als auf der Erde. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die Mondoberfläche ein sehr schlechter Wärmeleiter ist. Während die Oberfläche des Mondes wärmer als kochendes Wasser und kälter als flüssige Luft ist, ändert sich die Temperatur in einer Tiefe von mehr als 30 cm nur noch ganz unmerklich innerhalb einer Spanne von wenigen Graden um den Gefrierpunkt. Diese Schätzung Russels erwies sich als richtig, wie sich im Jahre 1958 zeigte, als J. E. Gibson die Mondtemperatur mit Hilfe eines auf der Welle 0,9 cm arbei-

tenden speziellen Radioteleskops zu messen versuchte. Die „Wärmestrahlung" dieser Wellenlänge, die uns aus tieferen Mondgegenden unterhalb der Oberfläche erreicht, zeigt konstante Temperatur. Nach Z. Kopal liegt die neutrale Temperaturzone auf dem Monde in einer Tiefe von etwa 1 m. Zukünftige Astronauten, die auf dem Mond den Auswirkungen der heftigen Temperaturschwankungen ausweichen wollen, werden sich also in die Erde, oder besser gesagt in den Mond, eingraben müssen. Vielleicht wird es genügen, daß man die Rakete oder eine andere ähnliche Einrichtung, in der sich die Menschen aufhalten werden, mit einer genügend starken Schicht auf der Mondoberfläche gewonnenen Staubes bedeckt.

In den Jahren 1952 und 1953 maßen N. L. Kaidanowski, M. T. Turusbekow und im Jahre 1956 S. E. Chaikin die Temperatur auf dem Mond mit Hilfe der Radiomethode, und zwar bei einer Wellenlänge von 3,2 cm und 10 cm (Radioteleskope mit Durchmessern von 4 m und 7,5 m). Im April 1953 maßen sie im Verlaufe der Lunation bei einer Wellenlänge von 3,2 cm eine mittlere Temperatur von -140 ± 20 °C und bei einer Wellenlänge von 10 cm -143 ± 20 °C. Daß es sich ebenfalls um Temperaturen tieferer Schichten unterhalb der Oberfläche handelt, ist daraus zu ersehen, daß während der Mondfinsternis am 29. Februar 1952 die Temperatur bei einer Wellenlänge von 3,2 cm unverändert blieb. Der japanische Astronom Akabane Kenji bestimmte im Jahre 1954 auf einer Wellenlänge von 3000 MHz die maximale Temperatur am Mondäquator mit 117 °C, die minimale mit — 33 °C (mit einer Abweichung von etwa 50 °C). Demnach betrug die mittlere Temperatur der von ihm gemessenen „Schicht" — 52 °C. Die maximale Temperatur wurde immer mehrere Tage nach Vollmond gemessen. Die radioastronomische Erforschung des Mondes bringt uns sehr interessante Ergebnisse, die für die Selenologie bedeutsam sind.

Es ist wirklich eine merkwürdige Sache um die menschliche Wissenschaft: Sie ermöglichte es dem Menschen tatsächlich, früher in das Innere des Mondes „einzudringen", als die Oberfläche seines Heimatplaneten zu verlassen.

Struktur und Zusammensetzung der Mondoberfläche

Der überwiegende Teil des Lichtes, das vom Mond zu uns kommt, ist reflektiertes Sonnenlicht. Eine bloße Spektralanalyse des Mondlichtes vermag uns deshalb keine Informationen über die chemische Zusammensetzung und die physikalische Struktur der festen Mondoberfläche zu geben. Es gibt aber verschiedene „indirekte" Methoden, mit deren Hilfe wir über Struktur und wahrscheinliche Zusammensetzung der sichtbaren Oberfläche des Mondes wenigstens viele Andeutungen erlangen können. Dazu gehören vor allem Photometrie, Polarimetrie und Kolorimetrie des Mondes. Mit der Photometrie des Mondes, der Messung der Helligkeit sowohl des ganzen Mondes als auch einzelner Punkte an der Oberfläche, beschäftigten sich besonders W. H. Pickering, H. Rosenberg (1919), F. W. P. Götz (1921) und in neuerer Zeit W. G. Fessenkow (1928, 1929), N. P. Barabaschew (1927), A. W. Markow (1923, 1927, 1948, 1950), N. S. Orlowa (1953 bis 1955), W. A. Fedorez (1952), N. N. Sytinskaja (1953), W. W. Scharonow (1930, 1936, 1939), K. Graff (1949) und zahlreiche andere Autoren. H. Rosenberg und F. W. P. Götz stellten übereinstimmend fest, daß auf dem Mond Stellen der verschiedensten Helligkeit in Größenklassen von $-0^{m}\!.7$ (zentraler Gipfel des Kraters Aristarch, hellste Stelle auf der Mondoberfläche überhaupt) bis zu $+0^{m}\!.6$ (östlicher Teil des Oceanus Procellarum zwischen den Kratern Kraft und Seleucus) vorhanden sind. Photometrische Messungen, also die Feststellung der Helligkeit verschiedener Stellen auf dem Mond, ermöglichen uns auch, ihre Albedo (siehe Seite 42) zu berechnen und sie mit der Albedo verschiedener irdischer Gesteine zu vergleichen. Ein solcher Vergleich gewährleistet an und für sich natürlich keine genügende Sicherheit über die stoffliche Zusammensetzung des Mondes; nichtsdestoweniger kann er uns wenigstens teilweise darüber informieren, welche Stoffe oder Mineralien auf dem Mond existieren könnten und welche Stoffe dort nicht existieren können. Aus den Messungen von W. W. Scharonow ergibt sich, daß die Albedo an den hellsten



Erloschener Krater eines Vulkans auf Island

Stellen des Mondes 0,13 bis 0,18 beträgt, an den dunkelsten Stellen 0,03 bis 0,02. Die gesamte, sogenannte mittlere Albedo des Mondes schätzt Scharonow auf 0,079. Schon diese Feststellung an und für sich ist sehr wertvoll. Es zeigt sich, daß die Mondoberfläche im Durchschnitt sehr dunkel ist und daß auch die hellsten Stellen auf dem Monde aus irgendwelchen verhältnismäßig sehr dunklen Stoffen zusammengesetzt sein müssen. Das widerlegt von vornherein die Meinung von S. E. Peals (1880), H. Hörbiger und Ph. Fauth (1913, 1925), daß die Mondoberfläche mit Eis bedeckt sei, denn die Albedo von Eis ist um vieles größer als die der Mondoberfläche (0,4 bis 0,3). Die Theorie von der Anwesenheit von Eis auf der Mondoberfläche widerlegen aber auch die Ergebnisse der modernen

Wärmemessungen auf dem Mond und einige neuere Untersuchungen und Laborexperimente mit der Verdampfung von Eis im Vakuum. Nach V. Vand (1945) beträgt zum Beispiel die Geschwindigkeit der Verdampfung des Eises im Vakuum in Gramm je Sekunde bei einer Temperatur von — 30 °C 0,0046, bei — 20 °C 0,0012, bei — 10 °C 0,03 und bei 0 °C 0,07.

Auf dem Monde, der frei von jeder Atmosphäre und bei Tage einer Temperatur von über 100 °C ausgesetzt ist, würde das Eis in verhältnismäßig kurzer Zeit völlig verdampfen und in den Raum entweichen. A. W. Chabakow (1949) kam auf der Grundlage der festgestellten Albedo verschiedener Stellen auf der Mondoberfläche zu der Meinung, daß auf dem Monde Mineralien existieren könnten, die den irdischen Lipariten ähnlich sind, Eruptivgesteinen, dem Granit verwandt, oder Basaltlava und ihre Tuffe. Der größte Teil der Mondoberfläche ist nach seiner Meinung von dunkler, neutral grauer Farbe und läßt sich mit der „grauen Erde" oder dem Gneis vergleichen. In der Gegend der Meere sind nach Chabakow mit größter Wahrscheinlichkeit Gesteine vorhanden, die sich in einem stark „zerkleinerten Zustand" befinden, der an feinen Staub oder Sand erinnert.

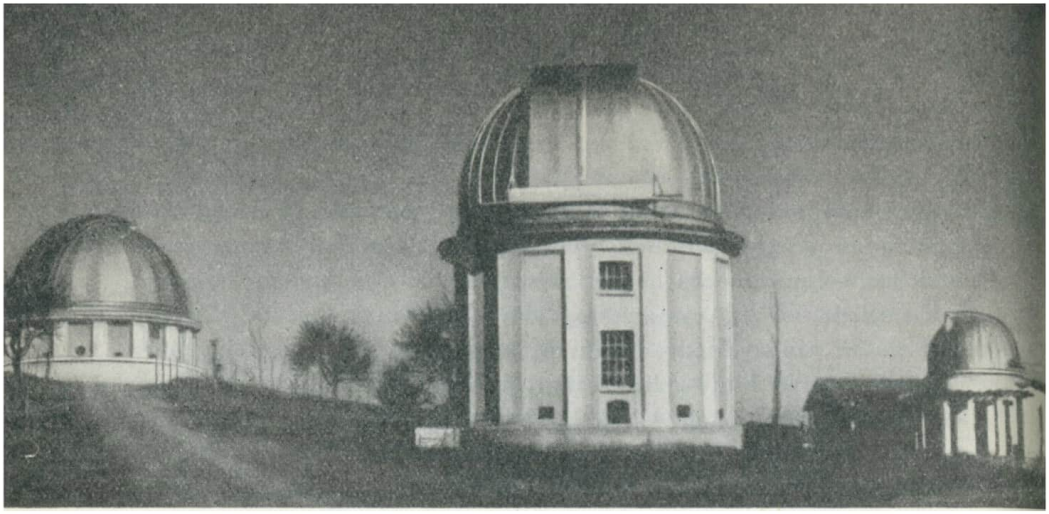
Sehr interessante Angaben vermittelt die Messung der Polarisation des Mondlichtes. Einen Lichtstrahl stellen wir uns als eine wellenförmige, schwingende Bewegung vor, die sich im Raum verbreitet. Wenn die Schwingungen der Lichtstrahlen in einer Richtung ihre maximale und zu gleicher Zeit in der darauf senkrecht stehenden Richtung ihre minimale Intensität haben, so sagen wir, daß ein solches Licht polarisiert ist. Die Polarisation des Lichtes entsteht einerseits bei Reflexion des Lichtes, andererseits auch bei der Brechung der Lichtstrahlen, beim Durchgang des Lichtes durch bestimmte Stoffe. Die Polarisation kann entweder eine totale sein – dabei ist die minimale Intensität Null – oder eine partielle, je nach der Art des Stoffes, der die Polarisation des Lichtes hervorruft. Teilweise Polarisation entsteht beim Einfall des Lichtes auf einen bestimmten Stoff unter einem beliebigen Winkel. Demgegenüber

erfolgt totale Polarisation immer nur, wenn das Licht in einem ganz bestimmten Winkel auf den betreffenden Stoff fällt. Dieser sogenannte Polarisationswinkel ist für jeden Stoff ein anderer. Auf Grund dieser Tatsache können wir aus der Polarisation des von verschiedenen Stoffen – und daher auch von der Mondoberfläche – reflektierten Lichtes zu Schlußfolgerungen über ihre wahrscheinliche Zusammensetzung gelangen. Die Polarisation des Mondlichtes entdeckte schon im Jahre 1811 D. F. Arago. Mit ihrer Erforschung beschäftigten sich später hauptsächlich J. Bird, W. C. Bond, W. Huggins, A. Secchi, Lord Rosse und J. Landerer. Lord Rosse bestimmte im Jahre 1877 den Winkel der maximalen Polarisation des Mondlichtes und äußerte einen sehr interessanten Gedanken, zu dem wir noch einmal zurückkehren werden. Er meinte, die Mondoberfläche bestehe aus Mineralien, die an das sogenannte vulkanische Glas erinnern, das durch die schnelle Abkühlung des sehr viskosen, zähflüssigen Magmas entsteht. Da die Moleküle einer solchen Schmelzmasse nicht genügend Zeit und Freiheit haben, sich zu mineralischen Kristallen zu ordnen, entsteht ein Gestein mit einer markant glasartigen (hyalinen) Struktur.

Mit der Erforschung der Polarisation des Mondlichtes beschäftigte sich schon vor Rosse auch der russische Physiker Petruschewski (1875). J. Landerer (1889 bis 1910) stellte fest, daß der Winkel der maximalen Polarisation der Mondoberfläche $33\,°17' \pm 7'$ beträgt. Hiernach würde sich die Mondoberfläche mit ihrer Polarisationsfähigkeit am stärksten den irdischen Vitrophyren (eine Art Porphyr mit glasiger Grundmasse) und Quarzporphyren nähern, bei denen der Winkel der maximalen Polarisation $33\,°10'$ und $33\,°52'$ beträgt. Aus dem Winkel der maximalen Polarisation der Mondgesteine kann man auch ihren sogenannten Brechungsindex ableiten. Dieser müßte nach den Ergebnissen Landerers dem Wert 1,51 bis 1,53 gleichen. Einen ähnlichen Brechungswinkel haben von den irdischen Mineralien und Gesteinen, wie A. W. Chabakow anführt, zum Beispiel einige saure vulkanische Gläser, Kalifeldspate, Albit, Leuzit, Zeolithe, Pyrit, Chalkopyrit, Chalzedone, Gipsstein

und viele andere Mineralien. Von den geläufigsten und bekanntesten Mineralien nähern sich Quarz (1,54) und Steinsalz mit ihrem Brechungsindex dem der Mondoberfläche am meisten. Der Mond besteht ganz gewiß nicht aus Steinsalz, und sicherlich können wir auch auf seiner Oberfläche nur schwer Chalzedon finden, der sich bekanntlich durch Ausscheidung von Quarz aus Thermalwässern und durch einen Niederschlag in den Höhlungen verschiedener Eruptivgesteine bildet. Interessant ist es aber, daß in der von Chabakow angeführten Aufzählung von Mineralien die schon genannten vulkanischen Glase wiederzufinden sind. In neuester Zeit kritisierte N. P. Barabaschew (1927, 1945) die Ergebnisse der Messungen Landerers und seine Methode der einfachen Übertragung der Ergebnisse der polarimetrischen Messungen im Labor auf die Verhältnisse auf dem Mond. Barabaschew meint, daß der Wert solcher einfachen Vergleiche sehr problematisch sei, weil es sich beim Mond nicht um einfache Mineralien handelt, sondern um mineralogisch komplizierte Gesteine, die aus großer Entfernung beobachtet werden. Das hat zweifellos großen Einfluß auf die Ergebnisse unserer Messungen und macht unsere Aufgabe weitaus komplizierter, als es uns auf den ersten Blick scheint.

In Frankreich beschäftigte sich mit der Erforschung der Polarisation des Mondlichtes in neuerer Zeit besonders B. Lyot (1929), der sich hauptsächlich um die Lösung des Problems der Oberflächenstruktur des Mondes bemühte. Seiner Meinung nach treffen sich in der Gegend der Meere frische, unzerstörte Gesteinsflächen mit solchen, die von fein zerkleinerter, sandförmiger oder, besser gesagt, staubförmiger Materie bedeckt sind. Diese erstreckt sich über den Großteil der Mondoberfläche. Mit ihren Polarisationseigenschaften nähert sie sich am stärksten den staubförmigen Aschen irdischer Vulkane. Die hellen Gebirgsgegenden, meint Lyot, bestehen zum Unterschied von den Meeren aus sauren, heller gefärbten vulkanischen Gesteinen. Diese Schlußfolgerung Lyots stimmt sehr gut mit der früher erwähnten Feststellung Barabaschews (1927) überein, daß die Oberfläche der Meere von offenbar dunklen



Das Observatorium auf der Krim

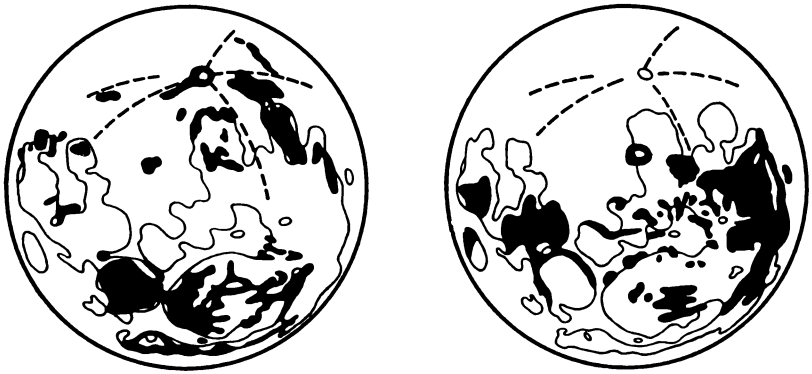
Basaltlaven im Zustand sehr feiner Bruchstücke gebildet wird. Die kleinen Unterschiede in der Polarisationswirkung verschiedener Mondgegenden erklärt Lyot durch den ganz ähnlichen kristallinen Bau des Großteils der Mondgesteine.

Nach K. von Bülow (1956) zeigt uns die Mondoberfläche das Bild einer ursprünglich erkalteten Rinde, die von einer dünnen Staubschicht und an einigen Stellen (Meere) auch von vulkanischen Ergußgesteinen bedeckt ist. Die ursprüngliche Erdrinde ist heute zu 75% mit Ablagerungsgesteinen und älteren und jüngeren Eruptivgesteinen bedeckt, so daß sie uns nicht direkt zugänglich ist. Die Gesteinsoberfläche des Mondes besteht im Gegensatz dazu aus ursprünglichem Magma, das unter planetaren Bedingungen erstarrt ist. Von Bülow äußert sich nicht näher über die wahrscheinliche Struktur dieser Gesteine. Man kann annehmen, daß sie verschiedene spezifische Eigenschaften aufweist. Der Mangel an Atmosphäre auf dem Mond muß notwendigerweise das schnelle Entweichen der im Magma enthaltenen Gase und Dämpfe unterstützen und zu einer bimsstein- oder schlackenartigen Form der entstehenden Gesteine führen. Gleichzeitig damit kühlt sich auch das Magma, das der Kälte des umliegenden Raumes ausgesetzt ist, sehr schnell ab. Das

führt zu seiner unvollständigen Kristallisation und zur Entstehung einer glasartigen holokristallinen oder hemikristallinen Struktur. Der glasige oder wenigstens teilweise glasige und poröse Charakter der Gesteine auf der Mondoberfläche trägt zur Sicherung einer geringen Wärmekapazität der Mondoberfläche bei und führt zu einer relativen Permanenz der entstandenen Oberflächenformationen, weil die Gesteine mit überwiegend glasiger Struktur der „Verwitterung" weitaus stärkeren Widerstand entgegensetzen als vollständig kristallisierte Gesteine.

Viele Forscher versuchten in moderner Zeit zu bestimmten Schlußfolgerungen über die mineralische Zusammensetzung der Mondoberfläche auch auf der Grundlage kolorimetrischer Messungen zu kommen, das heißt, sie versuchten, die Färbung bestimmter Teile der Mondoberfläche festzustellen und diese dann mit der Färbung der verschiedenen irdischen Gesteine zu vergleichen. Schon J. H. Mädler nahm wahr, daß die Mondoberfläche nicht völlig farblos ist, sondern daß viele Mondgegenden eine mehr oder weniger deutliche Färbung besitzen. Er weist zum Beispiel darauf hin, daß das Mare Serenitatis und ebenso das Mare Crisium grünlich sind oder, genauer gesagt, traubenartig gelbgrün. Das Mare Frigoris und der Palus Somniorum sind gelb und zeigen stellenweise eine Färbung ins Rötliche. Demgegenüber entdeckt J. Franz auf dem Mond keine deutlichen Farbunterschiede; als einzige „farbige Stellen" auf dem Monde führt er die Krater Aristarchus und Dionysius an, die seiner Meinung nach schwach bläulich sind. A. F. Warth (1922) sieht aber auf dem Mond eine ganze reiche Skala von Farben. So ist zum Beispiel seiner Meinung nach der Krater Clavius schwach rosa, während westlich davon schließlich sogar zimtfarbene Flecken auf deutlich blauem Grund zu sehen sind und am südlichen Hang des Kraters Maginus endlich ein deutlich grüner Fleck. L. Rudaux malte auf der Grundlage visueller Schätzungen im Jahre 1928 schließlich eine farbige Mondkarte. Die überwiegenden Farbschattierungen (Nuancen) auf dieser Karte sind zimtbraun, rot und dunkelolivgrün. Demgegenüber betonen N. N. Sytinskaja, L. N.

Radlowa (1941) und W. W. Scharonow, daß es auf dem Mond keine deutlichen Farbunterschiede gibt. Seine Oberfläche sei grau. Sytinskaja vergleicht seine Farbe mit der Farbe mancher Meteorite. Es ist klar, daß die Schätzung der Farben auf dem Mond allein durch direkte visuelle Beobachtungen zu keinem vollständigen Erfolg führt, weil sich subjektive Faktoren stark bemerkbar machen. Darum ist es notwendig, die visuelle Methode durch die objektive photographische Methode zu ersetzen. Den ersten gelungenen Versuch in dieser Richtung machten A. Miethe und B. Seegert (1911), die den Mond durch Spezialfilter photographierten, die einerseits ultraviolette und andererseits orange Strahlen auf hierfür besonders präparierte Platten durchließen. Sie erforschten, welche Stellen der



Farbaufnahmen des Mondes nach Miethe und Seegert. Auf der linken Darstellung sind die rötlichen, auf der rechten die grünlichen Stellen der Mondoberfläche schwarz gekennzeichnet

Mondoberfläche diese Strahlen reflektieren und welche sie absorbieren. Dabei stellten sie fest, daß zum Beispiel das Mare Serenitatis, der westliche Teil des Mare Imbrium und das Mare Frigoris ultraviolette Strahlen stark absorbieren und daß das Mare Foecunditatis, das Mare Crisium und der überwiegende Teil des Oceanus Procellarum diese Strahlen reflektieren. Es ist klar, daß diese Unterschiede hauptsächlich von der verschiedenen mineralischen Zu-

sammensetzung dieser Mondgebiete bewirkt werden. Ein besonders dunkler, die ultraviolette Strahlung stark absorbierender Fleck wurde östlich vom Krater Aristarch festgestellt. Diesen Fleck entdeckte schon ein Jahr zuvor (im Jahre 1910), und zwar mit einer ähnlichen Methode, R. Wood. Er äußerte die Meinung, daß die außergewöhnliche Absorption der ultravioletten Strahlen an dieser Stelle der Mondoberfläche durch Schwefelblüte auf vulkanischem Tuff hervorgerufen wird. A. W. Chabakow (1949) brachte sie demgegenüber mit reichem Vorkommen an Eisenoxyden in dieser Mondgegend in Verbindung.

In den Jahren 1923 und 1924 bewies T. J. Hargreaves die Existenz von Farbschattierungen auf dem Monde auf photographischem Wege, indem er auf Agfaplatten die ersten Farbbilder der Mondmeere und einiger Kontinente anfertigte. Auf seinen Aufnahmen ist das Mare Serenitatis zimtbraun mit einem schmalen olivgrünen Gürtel im Südwesten, ebenso das Mare Imbrium und ein Teil des Kaukasusgebirges. Der Krater Aristarch und seine nähere Umgebung haben eine orange und grünlichgelbe Schattierung. Seine Beobachtungen ergänzte im Jahre 1931 P. Keenan, der den Mond mit einem 36zölligen Fernrohr in den verschiedensten Gebieten des Spektrums (von 330 m bis 740 m) photographierte und feststellte, daß das Mare Serenitatis und der Lacus Somniorum deutlich blau sind, während das Mare Nubium schwach grünlich ist. Auch verschieden extrem dunkle Flecken auf dem Mond zeigen eine schwach grünliche Schattierung. Keenan drückt die Überzeugung aus, daß die Farben auf dem Mond deutlich ausgeprägt sind und mit den irdischen Gesteinen verglichen werden können.

Diese schon früher gewonnenen Ergebnisse wurden in moderner Zeit wiederum bestätigt und erweitert von N. P. Barabaschew und I. K. Kowal (1952, 1953), die auf der Sternwarte von Charkow eine Reihe Photographien des Mondes auf moderner photographischer Farbemulsion anfertigten. Sie stellten fest, daß das Mare Crisium im südlichen Teil grünlich und im nördlichen rostrot ist, während das Mare Foecunditatis im südlichen Teil rostrot und im

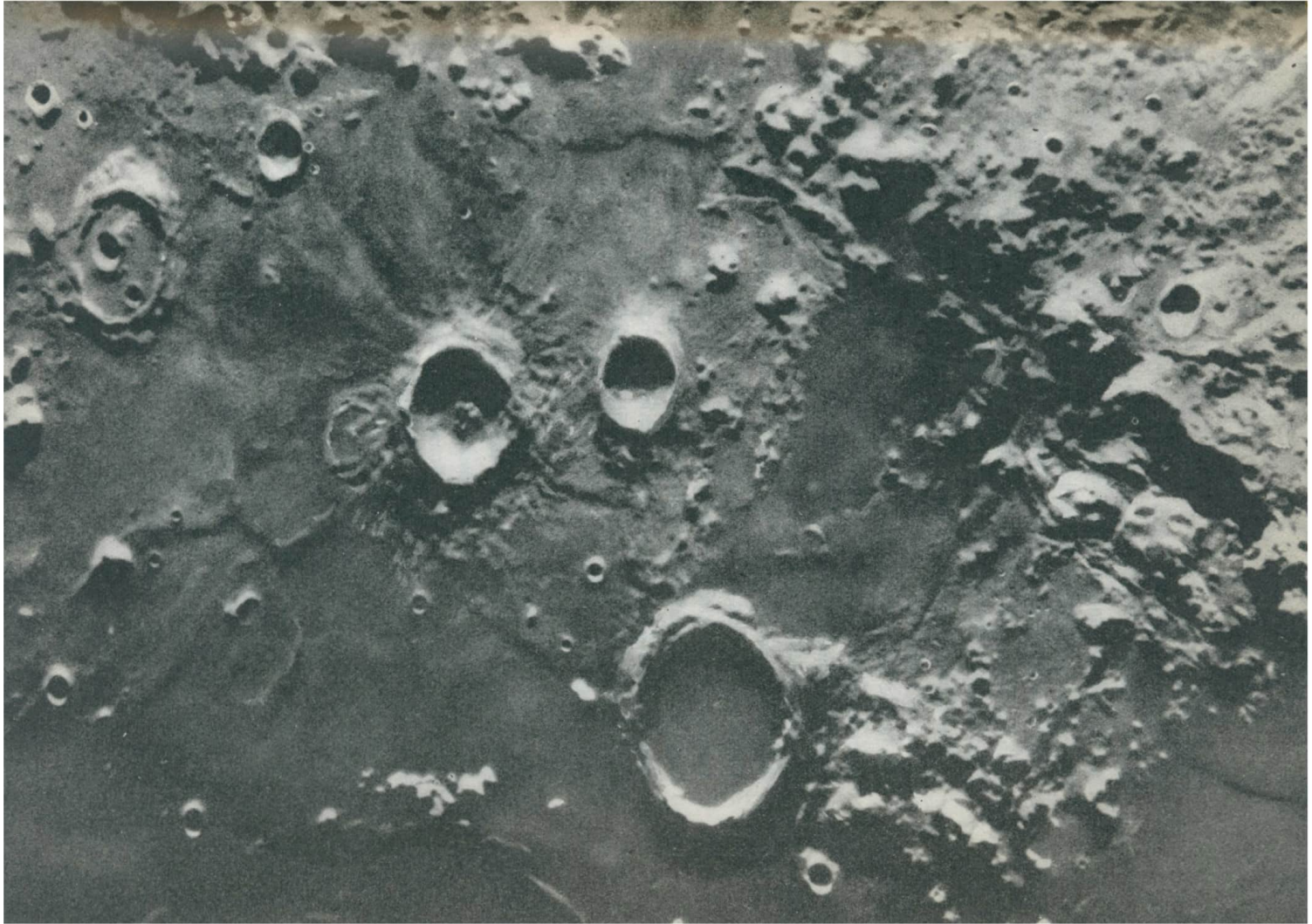
nördlichen grünlich ist. Das Mare Tranquillitatis ist bläulich und das Mare Serenitatis ist – in Übereinstimmung mit den Beobachtungen von T. J. Hargreaves – im Inneren rötlich, während es an seinen südlichen Ufern grünliche Streifen aufweist, die es gewissermaßen umschließen. Das Mare Imbrium hat nach Barabaschew und Kowal eine fleckige Struktur mit rötlichen, grünlichen und roströtlichen Gegenden. Die Ausmaße dieser Flecken sind verschieden; der kleinste davon, den man auf diesen Photographien noch erkennen kann, überschreitet 22 km nicht. Der Oceanus Procellarum ist grünlich, nur sein Südrand scheint roströtlich. Das Mare Humorum ist rötlich und ebenso das Mare Nubium, in dem man grünliche Flecken beobachten kann (vergleiche oben P. Keenan). In der Umgebung des Kraters Tycho kann man rötliche Flecken beobachten; dasselbe kann man auch von seinen Strahlen sagen. Ebenso ist das Mare Frigoris und der Boden des Kraters Plato deutlich rötlich. Besonders interessant ist es, daß Barabaschew und Kowal im Zentrum der Mondscheibe und in der Nähe des Mondsüdpoles zahlreiche rötliche Gegenden fanden, während die dem Mare Tranquillitatis anliegenden Kontinente grünlich aussahen. Barabaschew vermerkt weiter, daß alle Mondmeere eine sehr komplizierte Mosaikstruktur aufweisen und sich aus verschieden großen Flecken eng nebeneinanderliegender Farbschattierungen zusammensetzen. Daraus ist zu ersehen, daß Farbschattierungen auf dem Mond nicht nur existieren, sondern daß sie auch intensiv genug sind, sie mit den Farben der irdischen Gesteine zu vergleichen. Das gibt uns die Möglichkeit, die hier gewonnenen Daten auch zur Erklärung einer Reihe von Fragen zu benutzen, die mit dem Ursprung der verschiedenen Oberflächenformationen auf dem Monde verbunden sind.

Andere sowjetische Forscher, zum Beispiel A. A. Chabakow und N. N. Sytinskaja, betonen aber, daß noch eine Erklärung für die Tatsache gefunden werden muß, daß die bisher auf der Mondoberfläche festgestellten Farbschattierungen im Vergleich mit den Farbschattierungen zum Beispiel einiger Planeten sehr schwach und kaum faßbar sind. Nach N. N. Sytinskaja (1952) sind die

Farbunterschiede auf dem Monde in Wirklichkeit sehr gering, so daß die charakteristische Eigenschaft der Mondoberfläche ihre Einfarbigkeit ist, die Färbung aller Details in den gleichen braungrauen Schattierungen. Auch nach A. W. Chabakow (1949) kann man den Großteil der Mondoberfläche als farblos grau bezeichnen. Aus genauen Beobachtungen und Messungen geht hervor, daß sogar die Gipfel der höchsten Mondberge und Kraterwälle im Inneren des Oceanus Procellarum, die uns leuchtend weiß erscheinen, in Wahrheit eine graue Farbe haben. Chabakow erläutert das einerseits damit, daß ein überwiegender Teil des Mondes, wenn nicht sogar seine ganze Oberfläche, mit einer ungleich starken Schicht sehr feinen und wenig farbigen Staubes bedeckt ist. Andererseits werden jedoch die Farben des Mondes durch die Entfernung und durch die wie ein starkes Filter wirkende Erdatmosphäre abgeschwächt. Man muß auch den Umstand in Erwägung ziehen, daß es auf dem Mond keine Atmosphäre gibt oder wenigstens keine, die genügend dicht ist und den chemisch hochaktiven Sauerstoff enthält. Die lebhaften Farben der Gesteine auf der Erde sind nämlich größtenteils das Ergebnis der Verwitterung, also der Oxydation ihrer mineralischen Bestandteile. Die lebhaftesten Farben bei der Beobachtung des Mondes finden wir in den Meeren, die größtenteils gelbrot oder zimtbraun gefärbt sind. Daraus schließt Chabakow auf die Anwesenheit leuzitischen Basalts oder anderer ähnlicher vulkanischer Ergußgesteine. Außerdem hält es Chabakow für wahrscheinlich, daß die Farbschattierungen auf dem Monde, ebenso wie auf der Erde, überwiegend durch die Verteilung der Eisenverbindungen bestimmt werden, die in den Gesteinen sehr häufig sind. Die Meere zeigen am deutlichsten Verfärbungen, weil sie mit dunklen, besonders eisenreichen Gesteinen erfüllt sind. Chabakow meint, daß die rötlichen Schattierungen einiger Gegenden auf dem Mond Spuren chemischer Verwitterung und ebenso der Oxydation von Gasen sind, die bei vulkanischen Ausbrüchen frei wurden. Die rötliche Farbe einer Reihe heller Streifen, die schon Miethe und Seegert feststellten, spricht seiner Meinung nach für den Gedanken, daß in früheren

Zeiten aus den heutigen „Strahlenkratern" eine bedeutende Menge Gas und Wasser frei wurde. Chabakow ist der Ansicht, daß auf dem Monde in früherer Zeit eine dünne Atmosphäre sowie Spuren von Wasser vorhanden waren, daß aber diese Gase und das Wasser von der Oberfläche des Mondes schon lange entwichen sind. Seiner Meinung nach hilft uns das Studium der Farbschattierungen auf dem Monde in Verbindung mit dem Studium der Morphologie der Mondoberfläche, eine klare Vorstellung von dem relativen Alter verschiedener Gegenden auf dem Monde zu gewinnen.

N. N. Sytinskaja (1952, 1958) sucht eine Erklärung für die Einfarbigkeit des Mondes in den Folgen des ununterbrochenen Aufpralles kleiner Meteorite auf die Mondoberfläche. Sie verwirft die Meinung, daß die Mondoberfläche, wie wir sie heute sehen, die aus erstarrtem Magma entstandene, entblößte, ursprüngliche Mondoberfläche ist. Es sei schwer verständlich, meint Sytinskaja, daß sich der Mond in den Milliarden Jahren seiner Existenz überhaupt nicht verändert habe. Auf die Erde fällt ununterbrochen eine riesige Menge von Meteoriten, von denen der größte Teil allerdings in der Erdatmosphäre „verbrennt", bevor sie noch zur Erdoberfläche vordringen. Eine annähernd gleiche Zahl von Meteoriten und meteorischem Staub fällt ununterbrochen auch auf den Mond. Die in letzter Zeit mit Hilfe von Raketen durchgeführten Forschungen verzeichnen zum Beispiel in Erdnähe eine Häufigkeit des Zusammenprallens mit Mikrometeoriten von 1 Aufprall je cm^2 und je Minute (O. Berg, J. Meredith: J. Geophys. Res. 61, 4, 1956). Es läßt sich ausrechnen, daß sich bei Erhaltung aller auf den Mond aufprallenden Meteoriten im Verlaufe von etwa einer Milliarde Jahren schon eine Gesamtschicht von 1 cm Dicke bildete. In mehreren Milliarden Jahren wären das mehrere Zentimeter meteoritischen Materials. Diese Schicht würde alle Unterschiede und Klarheiten der verschiedenen Stellen auf der Mondoberfläche verwischen und ihr eine einförmige, dunkle Färbung verleihen. Da dem nicht so ist,



muß irgendein Faktor existieren, der den meteoritischen Stoff beseitigt. Ein solcher Faktor ist die kinetische Energie der aufprallenden Meteorite. Nach den Berechnungen K. P. Stanjukowitschs und anderer Autoren ist die kinetische Energie auch ganz kleiner Meteoriten genügend groß, um beim Aufprall eines solchen Meteoriten auf der Mondoberfläche einen kleinen Ausbruch zu bewirken, wobei sich nicht nur der Meteorit selbst, sondern auch ein Teil der Mondoberfläche in Gas verwandelt. Ein Teil des beim Ausbruch freigewordenen Materials fliegt in den interplanetaren Raum, ein Teil setzt sich an der Mondoberfläche ab. In welcher Form man es dort vorfindet, können wir nur vermuten, sagt Sytinskaja. Wir können annehmen, daß die Meteoriteneinfälle ununterbrochen die obersten Schichten beseitigen und daß auf diese Weise die ursprüngliche Mondoberfläche ständig erneuert wird.

Eine ähnliche Ansicht vertritt auch der amerikanische Astronom F. Whipple. Seiner Meinung nach bildet sich auf dem Mond im Laufe der Zeit durch ununterbrochene Meteoriteneinfälle (und auch durch andere Einflüsse) eine Staubschicht; aber dieser Staub, der dem Einfluß der Korpuskularstrahlung der Sonne und der ununterbrochenen Einwirkung des Aufpralles von Molekülen, Atomen und Ionen interplanetarer Gase ausgesetzt ist, verfestigt sich im Laufe der Zeit und verwandelt sich in einen dunklen, spröden und porösen Stoff. Whipple meint, daß auf dem Monde praktisch kein freier Staub existiert und daß man deshalb auch nicht zu fürchten braucht, daß Staubwolken auf dem Monde in Zukunft die Arbeit von Raketentriebwerken und anderen auf der Mondoberfläche gelandeten Motoren unmöglich machen könnten. Bei der Bewegung besonders schwerer Fahrzeuge auf der Oberfläche der Mondmeere werden aber die Reisenden immer in der Gefahr schweben, in von Gasen herrührende Hohlräume unter der Oberfläche zu stürzen.

Es gibt aber noch eine andere Möglichkeit. Die hohe Temperatur bei den Ausbrüchen verändert die Eigenschaften der Materie; daher bedeckt sich der Mond mit Schmelzprodukten, die vielleicht der schwarzen Kruste geschmolzener Meteoriten analog sind. Sytin-

skaja (1958) stellt sich diesen Vorgang etwa so vor, daß es beim Aufprall eines Meteoriten auf die Mondoberfläche zu einer mächtigen Explosion kommt, wobei an der Mondoberfläche eine Gesteinsmenge verdampft, die die Masse des Meteoriten um ein Vielfaches übertrifft. Ursprünglich im Gestein enthaltene Silikate vom Typ des Olivins werden durch die bei der Explosion entstehende Wärme zerlegt und bilden dunkle Eisenoxyde vom Typ FeO, Fe_2O_3 und Fe_3O_4. Ihre Dämpfe verwandeln sich dabei in einen besonderen porösen Stoff, der sich an allen Details der Oberfläche, einschließlich der steilen Berghänge, absetzt.

Die dunklere Farbe der Meere erklärt Sytinskaja damit, daß die Gesteine an diesen Stellen der Mondoberfläche weit mehr Eisen enthalten als die Kontinente, so daß die „Produktion" dunkler Eisenoxyde hier weitaus intensiver ist.

Nach Sytinskaja ist die Oberfläche des Mondes von einem porösen Stoff voller Blasen bedeckt, der stärker als Staub oder Bimsstein an die Schlacke erinnert, die an der Oberfläche irdischer Lavaströme entsteht. Wir wissen noch nicht, ob diese „Schlacke" die ganze Mondoberfläche bedeckt oder Teile davon unbedeckt läßt. Kolorimetrische und photometrische Beobachtungen können nur dann einen Sinn haben, wenn auf dem Monde wenigstens an einigen Stellen seine ursprüngliche, später nicht veränderte Oberfläche der Beobachtung zugänglich ist. Der Vergleich der Helligkeit und der Farben der Formationen auf dem Monde mit den irdischen Gesteinen kann für sich allein noch keine exakten Ergebnisse garantieren, denn die Verfärbung von Mineralien und insbesondere von Gesteinen ist sehr wechselhaft; sie ändert sich von einer Stelle zur anderen. Unter verschiedenen Gesteinsproben können wir solche finden, die sich hinsichtlich Albedo und Farbe der Mondoberfläche nähern; aber zuverlässige Ergebnisse können wir nur mit Hilfe statistischer Methoden erarbeiten, also indem wir erforschen, wie häufig sich an einem bestimmten Gestein eine bestimmte Helligkeit und Verfärbung zeigt. Einzig mit Hilfe dieser Methode können wir die Wahrscheinlichkeit oder Unwahrscheinlichkeit des Vorkommens einer

bestimmten Gesteinsart auf der Mondoberfläche abschätzen. So kann man zum Beispiel unter den Kalkgesteinen eine dunkle Probe feststellen, die nach Albedo und Färbung der Mondoberfläche ähnelt. Aber die statistische Methode zeigt uns deutlich, daß solche Kalksteine nur sehr selten vorkommen. Die üblichen Kalksteine sind hell, und darum ist ihre Anwesenheit auf der dunklen Mondoberfläche unwahrscheinlich.

Die statistische Methode zeigt uns, daß alle Sedimentgesteine, Kalkgesteine, Mergel, Sandsteine, Tone und Sande, mit ihrer Albedo und Farbe nicht im entferntesten der Mondoberfläche ähneln. Auch frühere Annahmen, daß die hellen Mondkontinente aus Granit oder liparitischen oder trachytischen Laven bestehen, werden im Lichte der statistischen Methode unhaltbar, weil saure und mittelsaure Magmagesteine, also Gesteine, die mehr als 65% und 52 bis 65% freien Quarz (SiO_2) enthalten, bedeutend heller als der Mond und auch viel „bunter" gefärbt sind. Sytinskaja äußert darum die Ansicht, daß sich die Kontinente auf dem Mond aus sogenannten basischen Gesteinen (weniger als 52% SiO_2) zusammensetzen, die an Gabbro, Basalt und Diabas erinnern, während die Mondmeere von ultrabasischen Gesteinen (ohne freies SiO_2) der Typen Peridotit, Pyroxenit und Dunit bedeckt sind.

In letzter Zeit wurde zur Erforschung der stofflichen Zusammensetzung der Mondoberfläche auch die Methode der sogenannten Lumineszenzanalyse benutzt. Auf der Mondoberfläche trifft, wie bereits erwähnt, neben einer Reihe anderer Strahlung auch eine kurzwellige ultraviolette Sonnenstrahlung auf, die einerseits von der Sonne selbst, andererseits von der Sonnenkorona ausgesandt wird. Auf der Erde wird der überwiegende Teil dieser lebensschädigenden (antibiotischen) Strahlung von der sogenannten Ozonschicht in einer veränderlichen Höhe von 20 bis 40 km über der Erdoberfläche abgehalten. Auf dem Mond, wo es keine Atmosphäre gibt und also auch kein Ozon (O_3), das durch die Wirkung der ultravioletten Strahlen aus normalem molekularem Sauerstoff (O_2) entsteht, fällt die ultraviolette Strahlung in uneingeschränkter Menge auf die

Mondoberfläche. Sie bewirkt dort durch Absorption das Lumineszieren, eine Tatsache, die erst seit kurzer Zeit bekannt ist.
Die Ansicht über eine mögliche Lumineszenz der Mondoberfläche äußerte erstmalig der tschechoslowakische Astronom F. Link (1946), der schon im Jahre 1933 eine differenzierte photometrische Theorie der Mondfinsternis ausarbeitete. Er zeigte erstmalig, daß bei Mondfinsternissen der Halbschatten der Erde in der Nähe des Kernschattens viel heller ist, als er der Theorie nach sein dürfte. Es gibt nur zwei mögliche Erklärungen für diese Erscheinung. Entweder kommt es bei der Verfinsterung des Mondes in einer Höhe von 20 bis 80 km über der Erdoberfläche zu einer abnormalen Refraktion des Sonnenlichtes in der Erdatmosphäre, was Link für unwahrscheinlich hält, oder man kann den so beobachteten „Überschuß an Licht" (excès de la lumière), wie ihn Link nennt, als Lumineszenz der Mondoberfläche erklären, die durch die ultraviolette und vielleicht auch korpuskulare Sonnenstrahlung hervorgerufen wird. Der Beobachter auf dem Mond sieht zur Zeit der Mondfinsternis diese Erscheinung als Sonnenfinsternis. Wenn die Oberfläche des Mondes sich mit dem Halbschatten bedeckt, sieht dieser Beobachter am Himmel die teilweise von der Erde verdeckte Sonne. Mit dem Fortschreiten der Verfinsterung und der stärker werdenden Verdeckung der Sonnenscheibe beginnen in der Strahlung, die die Mondoberfläche trifft, immer stärker die aus der Sonnenumgebung, der Chromosphäre und Korona, ausgesandten ultravioletten Strahlen zu überwiegen. Diese Strahlen rufen in den Gesteinen auf der Mondoberfläche offenbar Lumineszenz hervor. Diese bewirkt, daß dem Beobachter auf der Erde der Halbschatten der Erde heller erscheint, als er der Theorie nach sein dürfte.
Im Jahre 1947 setzte Link die Größe des lumineszierenden Teiles des Mondlichtes mit 10% des Gesamtlichtes bei Vollmond fest. Gleichzeitig zeigte er, daß die Lumineszenz der Mondoberfläche – wie das auch aus den Messungen des Gesamtlichtes des Mondes durch G. Rougier (1933) hervorgeht – im Laufe der Zeit einer deutlichen Fluktuation unterliegt. Link erklärt das mit der Schwankung

der sogenannten Solarkonstanten, einer Einheit, die die Größe der auf die Erde fallenden Sonnenstrahlung angibt (der Durchschnittswert der Solarkonstante wird mit 1,9 Kalorien je cm^2 und Minute angegeben).

Über den Zusammenhang zwischen der gesamten „Helligkeit" der Mondfinsternis und der Sonnentätigkeit äußerte sich bereits A. Danjon (1920). Aber erst Link entdeckte den Mechanismus, mit dessen Hilfe sich die genannte Sonnentätigkeit auch auf dem Mond bemerkbar macht. Das ist die Lumineszenz des Mondes und ihre Veränderung, die durch den verschieden starken Einfall der wirklichen Strahlung auf die Mondoberfläche bewirkt wird. Link schreibt hier die Hauptrolle den ultravioletten Strahlen zu. Die korpuskulare Sonnenstrahlung kann seiner Meinung nach eine gewisse Lumineszenz nur im Inneren des Schattens hervorrufen, wo die optische Aufhellung nur noch sehr schwach ist.

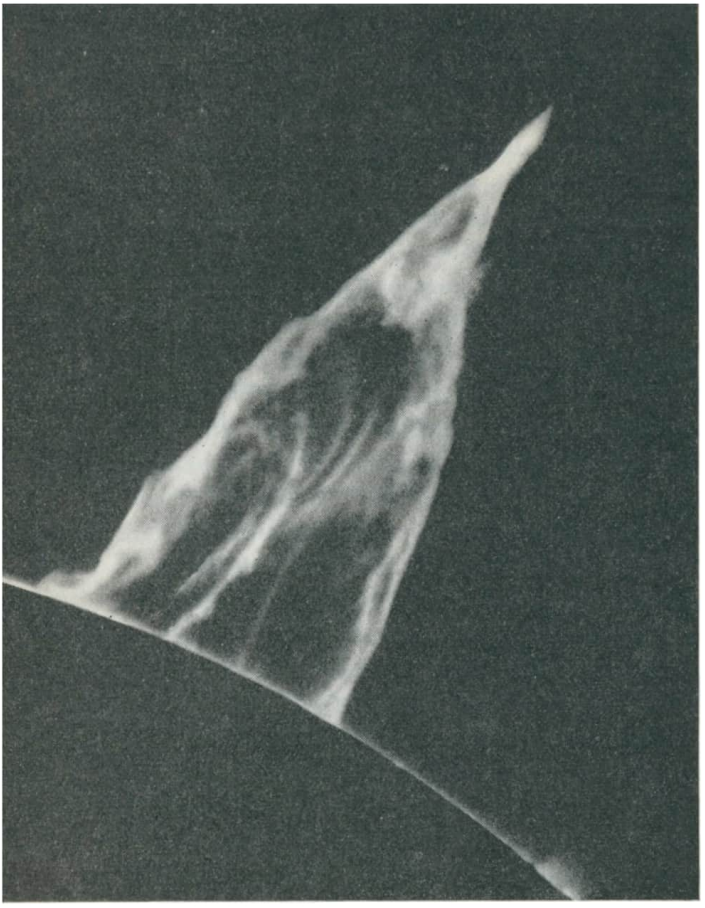
Link äußert die Überzeugung, daß auf der Grundlage spektrophotometrischer Messungen die Feststellung der Existenz schwachlumineszierender Banden im Mondspektrum und damit die Gewinnung bestimmter Informationen über die Eigenschaften der Mondoberfläche möglich ist. Die Lumineszenzerscheinungen können uns nach Link auch einige auf dem Mond beobachtete Veränderungen erklären. So gibt es zum Beispiel im Mare Serenitatis den kleinen Krater Linné, der von einem hellen Saum umgeben ist. Manche Beobachter führen an, daß dieser Saum sich von dem Augenblick an vergrößert, wo Linné in den Halbschatten tritt. Sie erklären das damit, daß es in der Umgebung dieses Kraters infolge der Finsternis zu Temperaturrückgang und Bildung von Reif aus gefrorenen Gasen und Dämpfen kommt. Link äußert demgegenüber die Ansicht, daß der Linnésche „Fleck" eine größere Lumineszenzfähigkeit als seine Umgebung hat, wodurch seine Sichtbarkeit mit dem Absinken der optischen Strahlung steigt.

Im Jahre 1949 berechnete Link auf der Grundlage von Beobachtungen, daß die Schwankung der Solarkonstanten von 1% auf dem Mond eine etwa 30mal größere Veränderung der Helligkeit hervor-

ruft. Das vermag man nur dann zu begreifen, wenn man voraussetzt, daß sich an der Lumineszenz des Mondes hauptsächlich die extrem kurzwelligen ultravioletten Strahlen beteiligen und vielleicht noch die Korpuskularstrahlen. Schon Abbot (1942) zeigte, daß die Schwankung der Solarkonstanten zu den kurzen Wellen hin steigt, so daß sie zum Beispiel bei 3500 Å schon einen 6mal größeren Wert erreicht. Es ist sehr wahrscheinlich, daß sie nach dem kurzwelligen Ende des Spektrums hin noch größere Werte erreichen kann, was sich dann in bedeutend größeren Schwankungen der auf dem Monde beobachteten Helligkeit widerspiegelt.

Link schlägt vor, zur Erforschung der Mondlumineszenz die sogenannte Restintensität oder Tiefe der Fraunhoferschen Linien zu benutzen. Das Sonnenspektrum besteht aus dem hellen, kontinuierlichen Hintergrund, der durch die dunklen Fraunhoferschen Linien unterbrochen ist. Bei photometrischer Erforschung photographischer Aufnahmen der Spektren durchleuchten wir sie; im Mikrophotometer wird ihre Durchsichtigkeit oder „Dichte" festgestellt. Die Fraunhoferschen Linien haben gewöhnlich eine Intensität von 0,1 des kontinuierlichen Hintergrundes des Spektrums. Link errechnet, daß bei einer Existenz der Lumineszenz auf dem Monde die Intensität der Fraunhoferschen Linien im Mondspektrum um etwa 0,1 und 0,2 schwanken muß. Er schlägt vor, Spektren verschiedener Mondgegenden durch große Spektrographen entsprechend herzustellen und die Dichte der Fraunhoferschen Linien auf diesen Spektralaufnahmen – besonders der sehr intensiven Linien Hα, K und H – mit ihrer Dichte im Sonnenspektrum zu vergleichen. Diese Methode hat ihren besonderen Vorzug vor allem darin, daß sie nicht von den Schwankungen der Durchsichtigkeit der Erdatmosphäre abhängig ist, wie zum Beispiel die Methode der Messung der Dichte des Halbschattens. Natürlich liegt ihr Vorzug auch darin, daß man sie jederzeit benutzen kann, auch außerhalb der Finsternisse.

Als zweite Methode zur Aufdeckung der Lumineszenz des Mondes schlägt Link die Beobachtung der Zunahme der Helligkeit an



Fontäne glühender Gase (Protuberanz), am 11. April 1959 auf der Sonne beobachtet; sie erreichte eine Höhe von 340000 km

bestimmten Stellen des Spektrums während der Mondfinsternis vor. Diese beiden von Link vorgeschlagenen Methoden wurden später praktisch angewandt; beide führten zu positiven Ergebnissen. Die Methode der Restintensität benutzten in Frankreich J. Dubois (1949, 1952) und in der UdSSR N. A. Kosyrew (1955). Die Methode der Zunahme der Helligkeit benutzten in Frankreich J. Dubois (1953, 1954) und in Italien M. Cimino, Frau T. Fortini, Frau M. A. Giannuzzi (1954) und A. Fresa (1953, 1954, 1957).

Aus den zahlreichen und sehr interessanten Ergebnissen, die von

diesen Beobachtern gewonnen wurden, nehmen wir hier nur einige heraus. M. Cimino und T. Fortini stellten bei der Mondfinsternis am 18., 19. Januar 1953 eine Helligkeitszunahme bis zu 30% fest. Hierbei widmeten sie auch dem Krater Linné besondere Aufmerksamkeit, dessen Spektrum aber während der Finsternis keinerlei Veränderungen aufwies. M. Cimino und A. Fresa verfolgten bei der totalen Verfinsterung des Mondes am 13., 14. Januar 1957 mit dem photoelektrischen Photometer vier ausgesuchte Punkte auf dem Monde:

1. den Westrand des Mare Foecunditatis in der Gegend des Kraters Langrenus,
2. den südlichen Teil des Mare Crisium,
3. die Gegend südlich des Kraters Grimaldi und
4. den Krater Krüger.

Sie stellten fest, daß der Punkt 1 im Laufe der Verfinsterung seine Helligkeit annähernd nach der Theorie veränderte, aber der Punkt 2 (Mare Crisium) einen deutlichen Überschuß an Helligkeit aufwies.

J. Dubois beobachtete während der Finsternis im Jahre 1953 einen deutlichen Helligkeitsüberschuß im Zentrum des Mare Foecunditatis (λ 45 °, β 3 °) zwischen den Wellenlängen 4200 Å und 4700 Å mit einem Maximum bei 4350 Å und zwischen 4800 Å und 5200 Å mit einem zweiten Maximum bei 5050 Å. Der gemessene Überschuß betrug 20 bis 60%. Bei der Verfinsterung im Jahre 1954 beobachtete Dubois im Westteil des Oceanus Procellarum (55 °, 10 °) einen Helligkeitsüberschuß zwischen 4200 Å und 4750 Å mit einem Maximum bei 4450 Å und einer maximalen Größe von 15%.

Die reichsten Ergebnisse bescherte die Methode der Restintensität. Im Herbst des Jahres 1955 beobachtete N. A. Kosyrew mit dem 50zölligen Reflektor der Sternwarte auf der Krim, an dem ein Spektrograph mit der Dispersion von 15 Å/mm angeschlossen war, in der Nähe der Doublette H und K das Mare Serenitatis, das Mare Imbrium, den gebirgigen zentralen Teil des Mondes und den Boden einiger Krater (Plato, Schickard, Kopernikus) sowie auch den bekannten durch Wood entdeckten dunklen Flecken beim Aristarchus.

Er sah überall einen annähernd ähnlichen Kontrast der genannten beiden Linien wie im Sonnenspektrum mit Ausnahme des Strahlensystems Aristarchus und Herodot, das die Linien H und K deutlich enger als im Sonnenspektrum wiedergab. Das Ausmessen der Bilder zeigt zwei Lumineszenzbanden, eine violette mit einem Maximum bei 3900 Å und eine zweite blaue mit einem Maximum bei 4300 Å. Nach Kosyrew zeigt sich die Lumineszenz des Kraters Aristarchus nach dem Vollmond um vieles deutlicher. Am 4. Oktober 1955 beobachtete Kosyrew bei diesem Krater eine etwa 4mal größere Lumineszenz als gewöhnlich. Kosyrew schreibt das der Erhöhung der Sonnenstrahlung zu und errechnet auf Grund dieser Beobachtung, daß im Korpuskularstrom, der in dieser Zeit den Mond erreichte, etwa 1000 Teilchen (Protonen) auf einen Kubikzentimeter kamen. In letzter Zeit widmete J. Dubois (1958) dem Krater Aristarchus besondere Aufmerksamkeit. Er legte in überraschender Übereinstimmung mit den Ergebnissen Kosyrews die Lage der „blauen" Banden im Spektrum dieses Kraters zwischen 4200 Å und 4400 Å mit einem Maximum bei 4350 Å fest. Das Schwanken der Lumineszenz in der Umgebung des Aristarch führt Dubois ebenso auf die Veränderungen der Intensität der Sonnenstrahlung zurück und stellt fest, daß die Veränderung bis zu 1 : 8 beträgt. Kosyrew versucht aus den Feststellungen der Lumineszenz auch einige selenologische Schlußfolgerungen zu ziehen. Die hellen Strahlen in der Umgebung des Aristarch und anderer Strahlenkrater hält er für unsichtbare Spalten in der Mondoberfläche, die nach der Herausbildung der zentralen Krater entstanden. Aus diesen Spalten stiegen Gase und Dämpfe, aus denen in der Umgebung eine helle, lumineszierende Schicht entstand.

Auf die Erde, sagt Kosyrew, fällt ununterbrochen meteoritischer Staub, dessen Körner einen Durchmesser um 2 bis 3 μ haben. An einem Tag fällt etwa 1 Tonne dieses Materials auf die Erde. Das bedeutet, daß die jährliche Menge einen Raum von etwa 10^8 cm^3 ausfüllen würde. Die Erdoberfläche mißt etwa $5 \cdot 10^{18}$ cm^2. Demnach kann in $5 \cdot 10^{10}$ Jahren aus diesem Material auf der Erdober-

fläche eine etwa 1 cm starke Schicht entstehen. Diese markante Verstaubung nicht nur der Oberfläche unseres Planeten, sondern auch des Mondes mußte also schon binnen 50 Millionen Jahren entstehen. Kosyrew schließt daraus, daß die heutigen Strahlensysteme auf dem Monde relativ sehr jung sind. Sie entstanden nämlich erst vor 50 Millionen Jahren, wofür die Tatsache zeugt, daß alle älteren Strahlensysteme auf dem Monde schon lange von meteoritischem Staub überdeckt und damit vernichtet wurden. In neuester Zeit veröffentlichte J. Dubois (1957, 1959) die Ergebnisse seiner Forschungen über insgesamt 86 Punkte der Mondoberfläche, von denen 47 eine gut sichtbare Lumineszenz aufweisen.

Unter anderem stellte J. Dubois fest, daß die Gegend zwischen dem Mare Serenitatis und dem Mare Imbrium (die Gegend des Gebirges Kaukasus) eine schwache, kaum sichtbare gelbe und violette Lumineszenz aufweist, das Zentrum des Sinus Medii eine stärkere rote und blaue Lumineszenz, das Mare Tranquillitatis eine ziemlich starke Lumineszenz, das Mare Foecunditatis eine schwächere rote und eine etwas stärkere gelbe, der Boden des Kraters Regiomontanus eine sehr starke rote Lumineszenz, eine schwächere gelbe und schwache blaue, das Mare Crisium eine sehr starke grüne Lumineszenz, eine schwächere gelbe und schwache blaue, der Westteil des Mare Frigoris eine schwache gelbe, grüne und violette Lumineszenz, das Mare Nubium eine stärkere blaue und rote Lumineszenz und eine schwache gelbe, und der mittlere und südöstliche Teil des Oceanus Procellarum weist eine stärkere rote und schwächere violette Lumineszenz auf.

Dubois führt weiter an, daß sich bei den untersuchten Stellen eine deutliche Lumineszenz auf den Kontinenten von nur 8%, bei den Meeren jedoch von 87% und im Inneren der dunklen Wallebenen sogar von 100% ergab. Offenbar hängt das damit zusammen, daß die Lumineszenz auf dem dunklen Untergrund der Meere am besten zu sehen ist. Hieraus kann man ableiten, daß die Mondlumineszenz nur deshalb deutlich beobachtet werden kann, weil die durchschnittliche Albedo der Mondoberfläche überhaupt sehr klein ist.

Wenn der Mond nur annähernd die gleiche durchschnittliche Albedo wie unsere Erde hätte, wäre die Lumineszenz auf dem Monde sehr gering, und wahrscheinlich würden wir von ihr überhaupt nichts wissen.

Kann man die Existenz der Lumineszenz des Mondes für etwas besonders Überraschendes ansehen? Dubois ist ganz und gar anderer Meinung. Da Erde und Mond einen gemeinsamen Ursprung haben, müssen sie auch ähnlich zusammengesetzt sein. Lumineszenzfähige Mineralien, die man auf der Erde findet, müssen auch auf dem Monde existieren. Auf der Erde finden wir eine große Zahl von Mineralien, die eine ziemlich große Fluoreszenzfähigkeit aufweisen; größtenteils sind das aber Mineralien, die in größerer Tiefe unter der Erdoberfläche vorkommen. Die Entwicklung des Mondes ging aber auf anderen Wegen vor sich als die der Erde, und es ist möglich, daß Gesteine, die auf der Erde verborgen sind, auf dem Mond direkt auf der Oberfläche vorkommen. Es ist nicht ausgeschlossen, daß auf der Oberfläche unseres Trabanten Gesteine existieren, die dort schon seit der Zeit lagern, als der Mond zu erkalten begann. Denn auf dem Monde gab es niemals eine mit Sedimentation, also der Entstehung von Ablagerungen verbundene Erosion wie auf der Erde.

Dubois gewann schon im Jahre 1953 eine Reihe ausgezeichneter Spektralaufnahmen des Mondes durch die großen Spektrographen der Sternwarten von Bordeaux in Frankreich, Arcetri in Italien (dem bekannten Sonnenturm) und von Utrecht in Holland. Mit Hilfe dieser Aufnahmen konnte er auf dem Monde eine größere Zahl von Lumineszenzbanden feststellen. Später versuchte er gemeinsam mit dem Mineralogen und Physiker Servigne ihre Identifikation, ihre Übereinstimmung mit den Lumineszenzbanden bekannter Mineralien. Einige der festgestellten Lumineszenzbanden auf dem Mond sind auffallend schmal, was Servigne zunächst für ein Zeichen dafür hielt, daß es auf dem Mond einige der sogenannten seltenen Erden gibt (Skandium, Yttrium, Lanthan u. a.); aber diese Stoffe geben, wie Laborversuche bewiesen, ein der Mondoberfläche ähn-

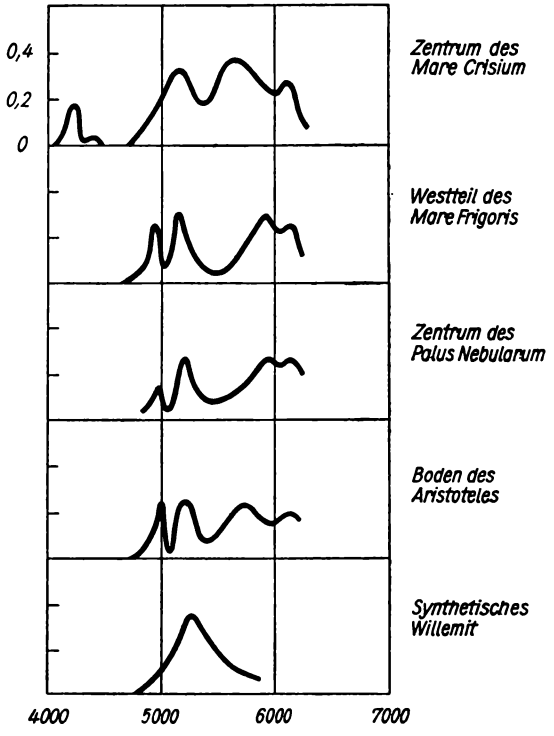
Einige lumineszenzfähige,
in größerer Menge direkt auf der Erdoberfläche vorhandene Mineralien
(Nach J. Dubois 1956)

Art des Minerals	Chemische Formel	Wichtigster Fundort	In der Emission überwiegende Wellenlänge (Å)
Anglezit	$PbSO_4$	Phoenix im Staate Arizona (USA)	4500
Autunit	$Ca(UO_2)_2(PO_4)_2$	Jachymov in Böhmen	5500
Kalkstein	$CaCO_3$	überall häufig	6000
Fluorit (Flußspat)	CaF_2	Alston und Moor in England, Ohio, Arizona, Kalifornien	5000 bis 4000
Hackmanit	kompliziertes Aluminium-Natrium-Silikat	Dungannon in England, Halbinsel Kola	5500 bis 6000
Kunzit	$Al_2O_3 \cdot nSiO_2$	Main, Portland und andere Stellen in den USA	6000
Opal	$SiO_2 \cdot nH_2O$	sehr häufig	4500
Scheelit	$CaWO_4$	sehr häufig in Europa und Amerika	4800
Willemit	Zn_2SiO_4	Franklin in New Jersey (USA)	5500

liches Spektrum nur dann, wenn wir sie sehr niedrigen Temperaturen aussetzen, die der Temperatur flüssiger Luft nahekommen. Die auf der Mondoberfläche festgestellte hohe Temperatur ist der Lumineszenz keineswegs förderlich. Sie bewirkt, daß eine Reihe von lumineszierenden Stoffen diese Fähigkeit verlieren. Servigne und Dubois zeigten später an einer Reihe von Versuchen, daß die beobachteten „Verengungen" der Lumineszenzbanden in Wirklichkeit durch eine gegenseitige Kombination von Lumineszenz- und Absorptionserscheinungen entstehen. Wenn wir den lumineszierenden Stoff mit irgendeinem anderen Stoff mischen, der nicht lumineszient und sich durch Absorptionsfähigkeit auszeichnet, so werden

die Lumineszenzbanden stark deformiert. So rufen zum Beispiel einige Silizium- und Sauerstoffverbindungen eine auffallende Verengung der Lumineszenzbanden hervor, die an die auf dem Mond beobachtete Erscheinung erinnert. Das alles macht die Lumineszenzanalyse zu einer bedeutend komplizierteren Angelegenheit, als es auf den ersten Blick schien. Dennoch zeigte sich aber, daß auf der Grundlage der Untersuchung der beobachteten Lumineszenzbanden schon jetzt bestimmte Schlußfolgerungen gezogen werden können, wie Dubois betont. So entspricht zum Beispiel das deutliche Maximum im grünen Teil des Spektrums, das im Mare Crisium,

Lumineszenzkurven des Willemit und einiger Stellen auf der Oberfläche des Mondes. Nach J. Dubois



im Westteil des Mare Frigoris und im Krater Aristoteles beobachtet wurde, sehr gut dem Lumineszenzmaximum des Willemit, eines Zinksilikates, das auf der Erde kurze, säulenartige Kristalle oder zusammenhängende, aderartige Füllungen weißer, grauer, gelber oder violetter Farben bildet, die als Zinkerz gefördert werden (festgestellt auch bei Vrančice bei Příbram). Dubois meint, daß sich Abarten des Willemits auf dem Monde finden, entweder im reinen Zustand oder wahrscheinlich zersprengt in anderen, mehr oder weniger inerten Substanzen. Das gelbe Maximum bei 5700 Å könnte man nach Dubois den verschiedensten Stoffen zuordnen, zum Beispiel Kadmium- und Berylliumsilikaten, die offenbar auf dem Monde ebenfalls anderen Mineralien beigemischt sind. Demgegenüber, so führt Dubois weiter aus, gelang es nicht, auf dem Mond seltene Erden oder Uran nachzuweisen, so daß es scheint, daß diese Stoffe auf der Mondoberfläche wohl überhaupt nicht anwesend sind.

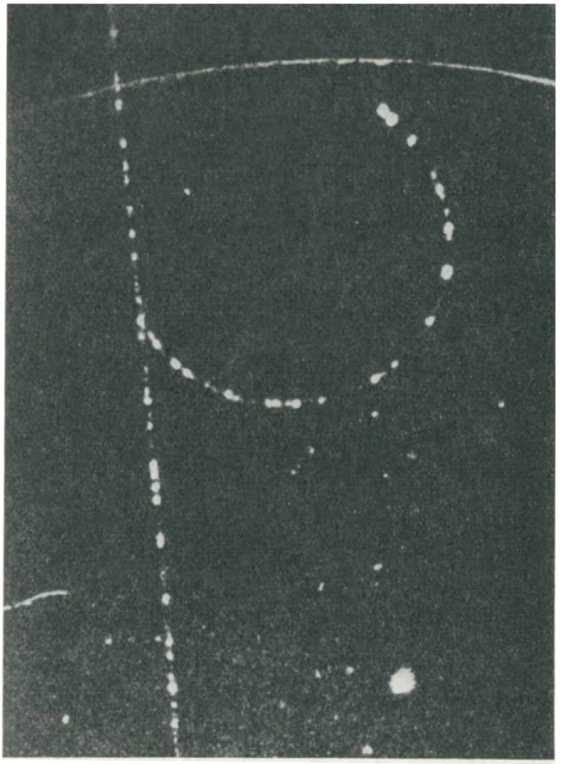
Die Wege der wissenschaftlichen Forschung sind oft bewundernswert. In diesem Falle führt uns zum Beispiel, wie wir sehen, die Entdeckung des Lichtüberschusses auf der Mondoberfläche im Halbschatten der Erde, die im Jahre 1946 gemacht wurde, innerhalb von 10 Jahren bis zu den Anfängen der Mondmineralogie.

Am Schluß seiner letzten Arbeit vom Jahre 1959 führt Dubois noch folgende interessante Ergebnisse an. Wahrscheinlich wird bei den verschiedenen Mondmeeren die Lumineszenz der Oberfläche durch verschiedene Strahlungen hervorgerufen. So scheint es sich beim Sinus Medii hauptsächlich um korpuskulare Sonnenstrahlung zu handeln. Dank dieser Eigenschaft könnte sich dieses Mondmeer zum Studium der Intensitätsänderungen dieser Strahlung eignen. Demgegenüber scheint das Mare Foecunditatis eher auf erhöhten Zustrom ultravioletter Strahlung zu reagieren. Manche Meere weisen in bestimmten Farben eine sehr schwache oder gar keine Lumineszenz auf. Es scheint, daß zu dieser Erscheinung ihre starke Färbung beiträgt. So zeigt beispielsweise das Zentrum des Mare Serenitatis keine Lumineszenz in der gelb-roten Farbe; es hat also

wahrscheinlich dieselbe Farbschattierung. Demgegenüber scheinen der Lacus Mortis und das Mare Humboldtianum gelbgrün und grünblau, die helle Gegend zwischen dem Sinus Aestuum und dem Mare Serenitatis bläulich, der Oceanus Procellarum rötlich zu sein. Es scheint, daß diese Meere in der roten Farbe eine Albedo in der Größenordnung von etwa 0,18, in der grünen von 0,02, in der blauen von 0,06 haben.

Wenn eine bestimmte Mondgegend alle beobachteten Lumineszenzbereiche aufwiese, das heißt praktisch die Fluoreszenz im gesamten sichtbaren Spektrum, würde die Gesamtlumineszenz etwa 3 bis 7% der Gesamthelligkeit des Mondgebietes betragen. Tatsächlich aber weisen die Mondmeere höchstens 3 oder 4 Lumineszenzbanden auf, so daß die Mondoberfläche nur zu etwa 50% lumineszient. Hieraus kann man die untere Grenze für die Mondlumineszenz mit 0,7 bis 1,2% des Wertes der Gesamthelligkeit des Mondes ableiten. Die Ergebnisse des Studiums der Mondlumineszenz können einerseits zur Identifizierung der Mondgesteine genutzt werden. Andererseits dienen sie zum Studium der ultravioletten Strahlung, die auf der Erde von der Atmosphäre abgehalten wird und sonst nur mit Hilfe von Raketen und künstlichen Trabanten studiert werden kann.

Im Zusammenhang mit der Frage der Mondlumineszenz muß man auch die sehr interessante Frage der Radioaktivität der Mondoberfläche erwähnen, die erst in letzter Zeit zur Diskussion kam, und zwar im Zusammenhang mit den von C. A. Bauer (1947, 1948), H. E. Huntley (1948), F. S. Singer (1951, 1957) und einigen anderen Autoren veröffentlichten Arbeiten über Meteoriten. Ihrer Meinung nach kommt es bei den Meteoriten, die der Wirkung der kosmischen Strahlung ausgesetzt sind, zu komplizierten Veränderungen, bei denen, wie Singer zeigte, auch eine bestimmte Menge des radioaktiven Isotops des Wasserstoffs, des sogenannten Tritiums (H_3), entsteht. Die Meteorite werden also durch die Bombardierung mit kosmischen Strahlen schwach radioaktiv. Ähnliches ergibt sich auch beim Mond. Die kosmischen Strahlen dringen auf der Mondober-



Aufnahme aus der Wilsonschen Nebelkammer. Ein schnelles Elektron stieß im Laufe seiner Bahn ein langsameres Sekundärelektron aus, dessen Bahn sich im Magnetfeld der Wilsonschen Kammer stark krümmte

fläche in eine Tiefe von 10 bis 20 cm ein und verursachen dort ähnliche Kernveränderungen wie bei den Meteoriten. Es fragt sich deshalb, ob die Mondoberfläche nicht so radioaktiv ist, daß eine Gefahr für die Landung des Menschen auf dem Mond besteht. Nach Singer braucht man in dieser Beziehung keine allzu großen Befürchtungen zu hegen. Der Gehalt von Tritium auf der Mondoberfläche ist zweifellos sehr klein; er kann keine schädlichen biologischen Auswirkungen haben. Auch die Energie der aus dem Tritium

freiwerdenden Elektronen ist zu klein, als daß sie größeren Schaden anrichten könnte. Singer (1957) meint, daß diese Frage von speziell eingerichteten Detektoren in Mondraketen definitiv gelöst werden könnte, die fähig wären, die kosmische Strahlung von den nuklearen Gammastrahlen zu unterscheiden, die von der Mondoberfläche abgegeben werden. Auf diesem Wege könnte man nicht nur die Radioaktivität des Mondes messen, sondern auch die wahrscheinliche Zusammensetzung der Mondkruste ableiten.

Wie mit Hilfe der außerhalb der Erdatmosphäre gewonnenen Photographien des Mondes bereits festgestellt wurde, existieren hier noch andere Gefahren. Das sind von der Mondoberfläche ausgesandte Röntgenstrahlen, die als Produkt der ununterbrochenen Bombardierung des Mondes durch schnelle Protonen der Sonne entstehen. Bisher ist die Intensität dieser Strahlung noch nicht genau bekannt und auch nicht, wie weit sie die Gesundheit der Astronauten bedrohen könnte, die auf der Mondoberfläche landen; aber es scheint, daß auch diese Gefahr nicht groß sein wird. Trotzdem ist es aber notwendig, dieser Frage in nächster Zukunft erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen. Darum wird man auch speziell ausgerüstete künstliche Satelliten starten, die die entsprechenden Röntgenogramme der Mondoberfläche aufzeichnen. Diese Aufnahmen können uns viel Interessantes auch von der atomaren Zusammensetzung der Mondoberfläche berichten, das heißt über die relative Häufigkeit der einzelnen chemischen Elemente in der Mondkruste. Sie können uns aber nichts darüber erzählen, wie die einzelnen Atome dieser Elemente auf dem Monde untereinander verbunden sind, also aus welchen Verbindungen (Mineralien) der Mond aufgebaut ist.

Vor kurzer Zeit (1957, 1958) wies J. R. Platt auf eine andere Gefahr hin, die die Mondoberfläche vielleicht in sich birgt und von der vorläufig die sich auf den Weg zum Mond vorbereitenden Astronauten noch nicht einmal etwas ahnen. Platt arbeitete schon im Jahre 1957 eine interessante Theorie über die optischen Eigenschaften des interstellaren Staubes aus, die auf den Prinzipien der

Quantenmechanik aufbaut. Platt betont, daß die Moleküle der Stoffe auf der Mondoberfläche durch den ununterbrochenen Aufprall der Teilchen meteoritischen Staubes zerschlagen (desorganisiert) werden und daß dadurch auf der Mondoberfläche molekulare Stoffe mit unausgefüllten energetischen Flächen und freien Radikalen entstehen. Eine aus diesen Stoffen zusammengesetzte Decke muß im sichtbaren Teil des Spektrums ein starkes Absinken der Helligkeit hervorrufen und eine sehr poröse Struktur aufweisen. Platt erklärt auf diese Weise einerseits die niedrige durchschnittliche Albedo des Mondes und andererseits die geringe Wärmekapazität der Mondoberfläche. Die chemische Labilität der Stoffe auf der Mondoberfläche kann nach Platt Ursache interessanter exothermischer Reaktionen mit Körpern sein, die auf die Mondoberfläche auftreffen.

Das Problem der Struktur und noch mehr der stofflichen Zusammensetzung und des physikalischen Baues der Mondoberfläche ist also immer noch nicht vollständig gelöst; ja, man kann sagen, daß sich hier gemeinsam mit den weiteren Beobachtungen des Mondes und den theoretischen Lösungen dieses Problems ein ziemlich komplizierter Komplex weiterer Fragen ergibt, die zweifellos ihre definitive Lösung erst in der anbrechenden Ära der interplanetaren Flüge finden wird.

DIE ENTSTEHUNG DER OBERFLÄCHEN-FORMATIONEN (SELENOLOGIE)

Gibt es eine Universaltheorie?

Über die Entstehung der Meere, Krater, Gebirge und Rillen auf dem Monde wurden bereits viele Meinungen geäußert. Mit keiner kann man sich aber völlig und ohne Einschränkung einverstanden erklären. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, daß die meisten dieser Autoren nicht alle bekannten Tatsachen in Betracht zogen: die astronomischen, physikalischen, geologischen usw. Oftmals wurde dieses ganze Problem zu sehr vereinfacht, indem sie alle anderen Möglichkeiten verwarfen und es nur aus einem engen Gesichtswinkel heraus beurteilten. Die Entstehung des Oberflächenreliefs des Mondes kann kaum mit einer einzigen Universaltheorie erklärt werden. Alle Versuche, die Entstehung der Oberflächenformationen des Mondes nur auf der Grundlage einer einzigen Art von Kräften, zum Beispiel von Vulkanausbrüchen oder Meteorfall, zu erklären, führten zu Mißerfolgen. Die Wirklichkeit war zweifellos bedeutend komplizierter, als wir uns vorläufig vorzustellen vermögen, und bis jetzt sind wir noch ziemlich weit davon entfernt, sie richtig rekonstruieren zu können. Von diesem Standpunkt aus muß man die gegenwärtige Zersplitterung der Meinungen beurteilen, von denen nur wenige eine ernstere Aufmerksamkeit verdienen. Aus diesem Grunde wird auch hier keine völlige und erschöpfende Übersicht über sie gegeben.

Morphogenetische Analyse der Mondoberfläche

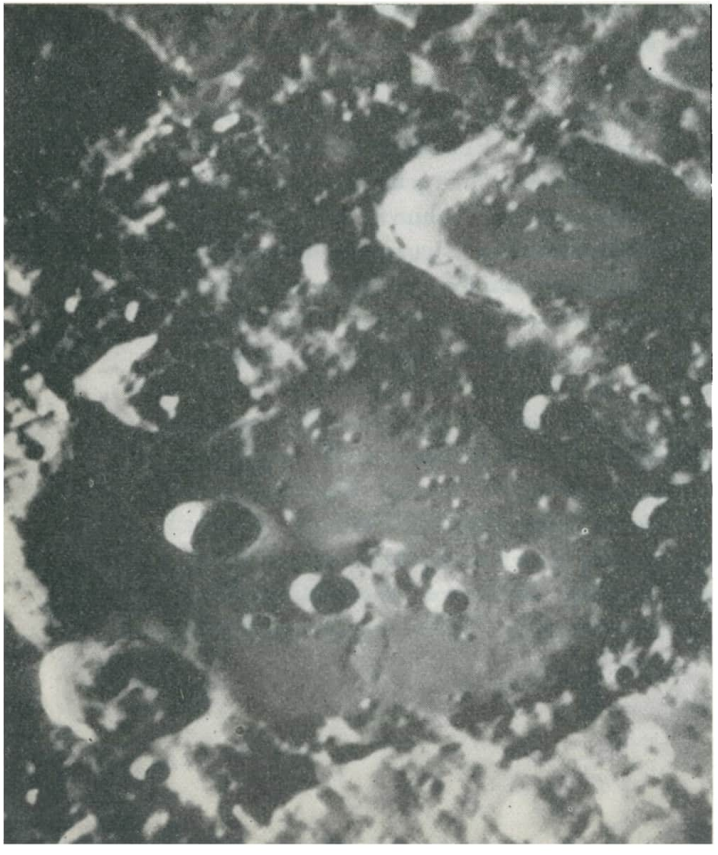
Eine unvermeidliche Bedingung für die Darstellung der Geschichte der Mondoberfläche ist die Feststellung des relativen Alters verschiedener Formationen auf der Oberfläche des Mondes. Dazu dient uns die sogenannte morphogenetische Analyse der Mondoberfläche,

die von E. Suess (1909) begründet und später besonders von F. Sacco (1907, 1909), W. Hommel (1919), in der ČSSR von O. Matoušek (1924, 1930) und in der UdSSR von A. W. Chabakow weiterentwickelt wurde.

Wenn Sie die Abbildung auf Seite 190 betrachten, auf der die nahe Umgebung der Wallebene Clavius dargestellt ist, fällt Ihnen sicher auf, daß sie nicht nur in ihrem Inneren, sondern auch auf ihrem Randwall mit einer Reihe kleinerer Krater besetzt ist: Rutherford, Clavius B, C, D, K, L, N und J. Es leuchtet ein, daß diese Krater relativ jüngere Formationen sein müssen als Clavius selbst, daß sie also nach ihm entstanden. Die Beobachtung durch ein größeres Fernrohr würde Ihnen zeigen, daß auch die Wälle dieser kleinen Krater an einigen Stellen selbst von Kratern noch kleinerer Ausmaße unterbrochen sind, die auch im Inneren dieser Krater und im Inneren der Wallebene Clavius selbst verstreut zu finden sind. Sie können auch in der weiteren Umgebung festgestellt werden, so beispielsweise zwischen den Wallebenen Clavius und Maginus, am südöstlichen Wall des Kraters Maginus K und anderswo. Diesen Beobachtungen entsprechend, kann man die genannten Formationen nach ihrem verschiedenen relativen Alter ordnen (indem man von der ältesten Formation zur jüngsten vorgeht), und zwar etwa so: Wallebenen, Krater, kleine Krater. Schon aus dieser recht flüchtigen Beobachtung ergibt sich eine wichtige „selenohistorische" Schlußfolgerung: Auf dem Monde entstanden zweifellos im Verlaufe der Zeit immer kleinere Krater. Wenn wir mit der beschriebenen Methode die Verhältnisse auch in anderen Gegenden des Mondes untersuchen, beispielsweise in der Gegend der Meere, kommen wir zu der wichtigen Feststellung, daß sich die Meere deutlich zeitlich zwischen die Wallebenen und Krater „einschieben". Zu diesem Schluß bringt uns die Beobachtung, daß viele Wallebenen am Rande der Meere entweder teilweise oder gänzlich „überflutet" sind. Sie existierten offensichtlich früher als die Meere; denn Krater beobachten wir auch auf der Oberfläche von Meeren. Auch die Ringgebirge, von denen viele von hellen Strahlen begrenzt sind,

„liegen“ entweder auf der Oberfläche von Meeren (Kopernikus, Kepler) oder auf den Trümmern älterer Wallebenen (Tycho). Daraus kann man schließen, daß auch die Ringgebirge jünger als die Wallebenen sind und sicher auch jünger als die Meere. Auch die Kratergruben, Täler und Rillen kann man als relativ sehr junge Oberflächenformationen ansehen. Viele Rillen durchziehen zum Beispiel nicht nur Meere und Wallebenen, sondern auch zahlreiche kleine Krater, so daß man sie – mit Ausnahme einiger ganz kleiner Krater – für die relativ jüngsten Formationen auf dem Mond überhaupt halten kann. Jetzt beginnt sich schon klar etwa folgende zeitliche Folge der Entstehung der verschiedenen Formationen auf dem Monde abzuzeichnen: Wallebenen, Meere, Krater und Ringgebirge, kleine Krater (Kratergruben), Rillen.

Wallebene Clavius



Auf diese Weise könnten wir unsere Schlußfolgerungen weiter präzisieren. Die Feststellung des relativen Alters verschiedener Oberflächenformationen auf dem Monde sagt uns aber nichts über ihr wirkliches, absolutes Alter. Dieses kann sehr verschieden sein. So können zum Beispiel zwischen der Entstehung der Meere und einiger Ringgebirge Millionen, aber vielleicht auch nur Hunderttausende von Jahren vergangen sein. Ebensowenig wissen wir, wieviel Zeit zum Beispiel seit der Entstehung des „letzten" Ringgebirges verflossen ist. Es können 50 Millionen Jahre sein (wie Kosyrew meint); aber es ist durchaus auch möglich, daß es 5 Millionen oder 100 Millionen Jahre waren. Hier fehlt uns vorläufig jeder zuverlässige Anhaltspunkt.

Die Blasenhypothesen von Hook, Leitich und Suess

Als älteste wissenschaftliche Hypothese über den Ursprung der Mondkrater muß man die Hookesche ansehen. R. Hook (1667) meint, daß die Krater und ebenso einige runde Meere auf dem Monde durch das Platzen riesiger Blasen in der heißen viskosen Masse der ursprünglichen Mondoberfläche entstanden. Diese Hypothese erhielt sich in vielen Varianten bis zum heutigen Tage. So formulierten zum Beispiel F. Leitich, E. Suess und A. Secchi zu Beginn dieses Jahrhunderts die sogenannte Blasenhypothese, die eigentlich nur eine ergänzte Hooksche Hypothese ist. Sie besagt, daß nach der Herausbildung einer festen Oberflächenkruste des Mondes Gase entstanden, die bei der Erkaltung des Magmas frei wurden, sich unter der Mondoberfläche häuften und mit ihrer Spannung die Oberfläche des Mondes in der Form riesiger Hohlräume oder Blasen ausbeulten. Der schwache mittlere Teil dieser Blasen (die Blasenwölbung), der nicht genügend Festigkeit besaß und schließlich platzte, stürzte in das glühend-flüssige Innere und schmolz erneut. Es blieb nur ein ringförmiger Wall, der Rest der ehemaligen Beulen. Auf ähnliche Weise erläuterte L. von Buch

auch die Entstehung einiger irdischer Vulkane. Seine Hypothese über die sogenannten Erhebungskrater besagt, daß einige Vulkane durch die Ausbeulung ursprünglicher waagerecht gelagerter Schichten der Erdoberfläche entstanden. Diese Auswölbung ist nach von Buch von Dämpfen und Gasen hervorgerufen worden, die sich dann am Gipfel der Erhebung eine kleine Krateröffnung schufen. L. von Buch meint, diese Erscheinung erstmalig bei der kesselartigen Vulkanvertiefung (Caldera) La Palma auf den Kanarischen Inseln gesehen zu haben. Spätere Forschungen der Geologen zeigten aber deutlich, daß diese Formation auf die gleiche Weise wie eine Reihe anderer Vulkanformationen entstanden war, nämlich durch einen Vulkanausbruch, der den ursprünglich aufgeschütteten Vulkankegel zerriß und vernichtete. Eine Modernisierung der Hookschen Hypothese und der Versuch, die Hypothese von Buchs auf den Mond anzuwenden, ist die sogenannte Blow-hole theory von J. E. Spurr (1944). Spurr unterscheidet auf dem Monde Circi (Wallebenen), Calderen (trichterartige Vulkankrater) und die sogenannten Blaslochkrater (blow-hole craters), die er als zahlreiche, nicht sehr große Krater mit regelmäßig kreisrundem Umriß, mit glattem Boden und niedrigem ausgeglichenem Rundwall beschreibt. Er findet sie besonders in den Meeren (Mare Imbrium) und schreibt von ihnen, daß sie bei schräger Beleuchtung besonders dadurch auffallen, daß ihr innerer Schatten die Form einer beinahe regelmäßigen Sichel aufweist. Dieser Umstand zeuge von ihrer regelmäßigen Form, die man nicht anders als durch explosive Entstehung dieser kleinen Krater erklären kann; der größte davon hat einen Durchmesser von nur 8 km. Spurr erläutert die Entstehung dieser Blaslochkrater durch eine große Anhäufung von Gas in einer bestimmten kritischen Periode der Abkühlung der Lava, die heute die Mondmeere erfüllt. Auch die „Calderen" und „Circi" entstanden nach Spurr durch Explosion von Gaslagerstätten, die unter der Mondoberfläche angehäuft waren. Dabei war die endgültige Form der Krater von dem Grad der Zähigkeit (Viskosität) der Lava abhängig. Wenn die Lava leicht flüssig war, glich sich der Krater-

boden nach seiner Entstehung aus, wie das zum Beispiel bei den Kratern Plato, Archimedes und Ptolemäus der Fall war. Wenn die Lava weniger flüssig (zäh) war, entstanden sehr tiefe Calderen mit unebenem Boden (Kopernikus, Clavius, Theophilus).
Gegen die Blasenhypothese Hooks, Leitichs und Suess' und gegen die Theorie Spurrs kann man eine Reihe von Einwänden vorbringen, deren schwerwiegendster der ist, daß die Bildung von Blasen oder Beulen mit einem Durchmesser von 100 km und mehr auf dem Mond aus mechanischen Gründen unmöglich ist. Diesem Einwand weicht die neueste Version der Spurrschen Blasenhypothese aus, die im Jahre 1959 von A. G. Gaydon und R. C. M. Leatner geäußert wurde, aber wieder mit der Anwesenheit riesiger Staubschichten auf dem Mond operiert, von denen wir bis jetzt nichts Bestimmtes wissen. Irdische Vulkane, so schloß Gaydon, stoßen bekanntlich große Mengen von Staub und Asche aus; aber die Anwesenheit der Atmosphäre verhindert auf der Erde ein freies Zurückfallen dieser Teilchen. Auf dem Monde, wo es keine Atmosphäre gibt, die Anziehungskraft klein und die Oberfläche wahrscheinlich trocken und „sandig" ist, ist die Entstehung von Kratern mit Zentralbergen oder ohne sie gut möglich, da es hier zeitweilig zum „Abblasen" von Gasen vulkanischen Ursprungs kommt, die sich unter der Oberfläche angesammelt haben.

Die Vulkanhypothese

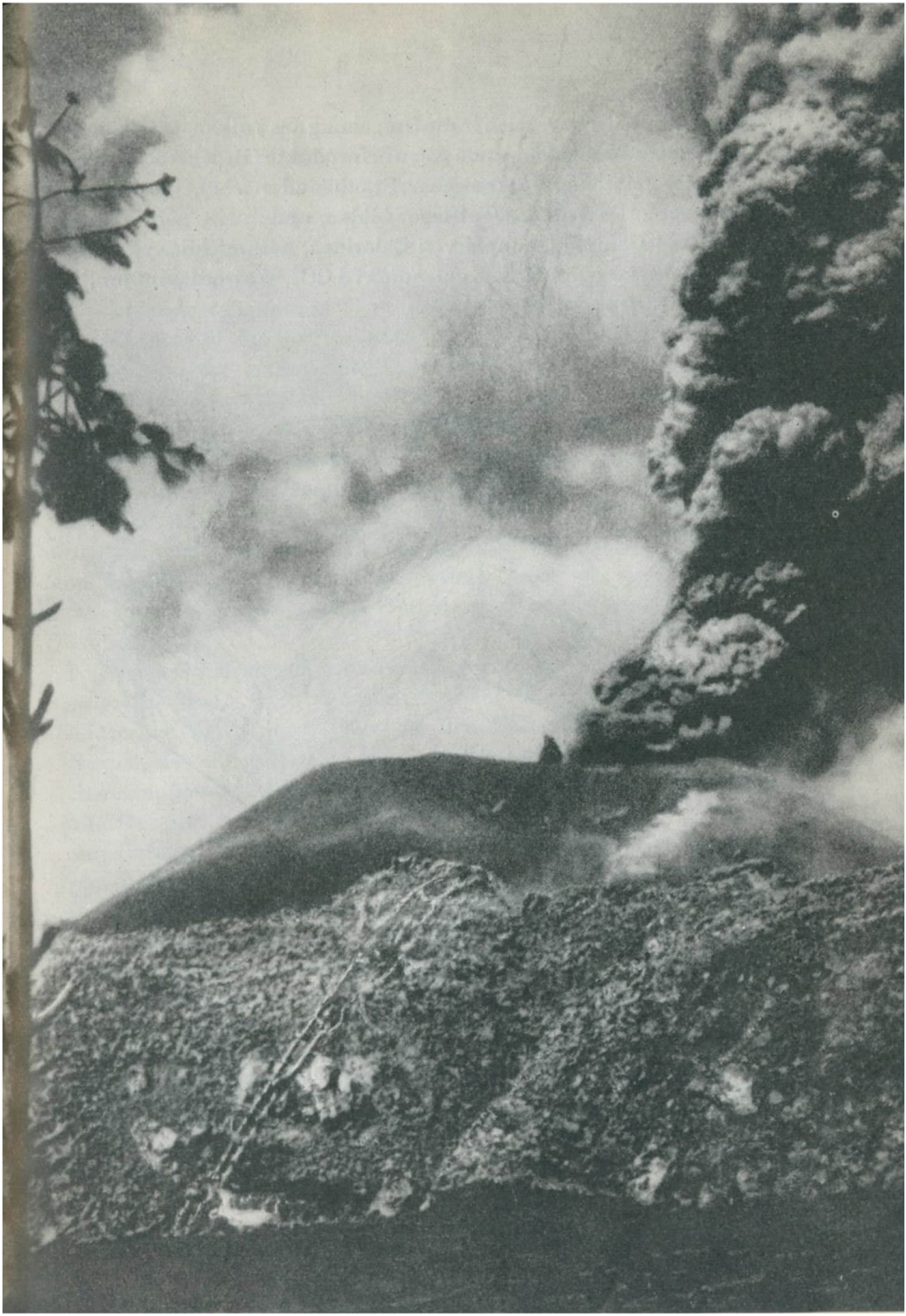
Mit der Bezeichnung vulkanische Tätigkeit (Vulkanismus) kennzeichnen wir auf der Erde alle Erscheinungen und Vorgänge, die das Austreten geschmolzener Gesteinsmassen, der sogenannten Magmatite, aus dem Erdinneren an die Oberfläche begleiten. Magmatische Erscheinungen, die in der Tiefe ohne Beziehung zur Oberfläche unseres Planeten verlaufen, nennen wir dagegen Plutonismus. Hauptbestandteile der Magmatite sind verschiedene Oxyde des Siliziums, des Aluminiums, des Eisens, Mangans, Kalziums,

Natriums und Kaliums sowie Wasser und einige Gase. Die ursprüngliche Temperatur des Magmas bewegt sich wahrscheinlich um 1000 °C. Die Entstehung der magmatischen Lager in einer Tiefe von 10 bis 20 km unter der Oberfläche unseres Planeten, die die eigentliche Quelle der vulkanischen Tätigkeit sind, schreibt man der beim Zerfall radioaktiver Elemente (Uran, Thorium, radioaktive Isotope des Kaliums K-40 u. a.) freiwerdenden Wärme zu. Das Magma kann durch die Bewegung einzelner Teile (Schollen) der Erdrinde entweder passiv nach der Erdoberfläche „hinaufgedrückt" werden, oder es kann ihm der Weg dahin durch den Druck der Gase erleichtert werden, die sich im Magma in größerem Maße zum Beispiel bei plötzlicher Verringerung des Druckes der Gesteinsschichten, bei Absinken der Temperatur und beginnender Kristallisation der Magmatite bilden können. Das Magma kann im Verlaufe seines Aufsteigens entweder zwischen anderen Gesteinen steckenbleiben oder als Lava bis an die Oberfläche gelangen. Beim Aufsteigen kühlt sich das Magma selbstverständlich ab. Infolgedessen kommt es zu seiner Differenzierung: Seine einzelnen mineralischen Bestandteile beginnen allmählich und in bestimmter Reihenfolge nacheinander zu kristallisieren. So entstehen aus ursprünglich glühenden magmatischen Schmelzmassen die sogenannten magmatischen Gesteine, Eruptivgesteine, und zwar bei Erstarrung im Inneren der Erde die sogenannten vulkanischen Tiefengesteine in Form von Stämmen, Lakkolithen, liegenden Adern und ähnlichen Formen und bei Erstarrung an der Oberfläche die sogenannten Ergußgesteine in der Form von Decken, Lagern, Lavaströmen und anderen Schichten.

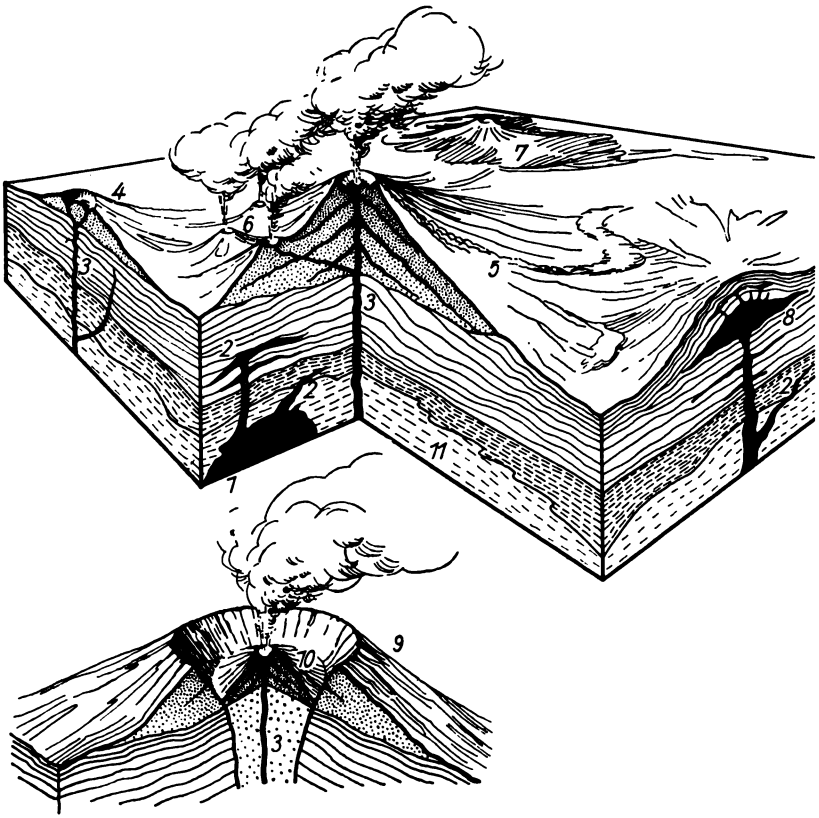
Den Vorgang, bei dem das glühende, feuerflüssige Magma bis an die Oberfläche der Erde gelangt, nennen wir einen Vulkanausbruch, eine Eruption.

Bei vulkanischen Eruptionen gelangen durch den Eruptionskanal (Schlot) glühende Stoffe dreierlei Art an die Erdoberfläche:

Vulkanausbruch bei Paricuti in Mexiko ▸



1. glühend flüssige Lava, sich in die Umgebung des Vulkans ergießend,
2. feste, unzusammenhängende Auswurfprodukte (Bruchstücke zerdrückter Gesteine, vulkanischer Staub und Asche), die in der Umgebung des Vulkans Tufflager bilden, und
3. Gase und Dämpfe (Dämpfe von Chloriden, Schwefeldioxyd SO_2, Schwefelwasserstoff H_2S, Kohlendioxyd CO_2, Wasserdampf u. a.).



Vulkanismus (Schema): 1. Magmalager (Kamin), 2. Gänge, 3. Vulkankamin, 4. Explosionskrater (Maar), 5. Stratovulkan, 6. parasitische Kegel, 7. Lavadecke mit Vulkanspitze, 8. Lakkolith, 9. Caldera, 10. neu aufgeschütteter Vulkankegel inmitten der Caldera (Doppelvulkan), 11. Eruptive Tiefengesteine (Batholith)

Die Mündung des Ausbruches hat gewöhnlich die Form einer trichterartigen Vertiefung, die wir Schlund oder auch Krater nennen. R. Kettner (1941) teilt die Vulkane nach ihrer Form und Entstehung in drei Grundtypen ein, unter denen er dann weitere Untergruppen unterscheidet:

1. *Vulkane des explosiven Typs, gebildet aus unzusammenhängenden vulkanischen Auswurfprodukten*

Maare sind die einfachsten Typen explosiver Vulkane. Sie entstehen im wesentlichen durch eine einfache Eruption infolge eines Überdruckes von Gasen im Brennloch. Damit bilden sich breite, trichterförmig verbreiterte Brennlöcher, deren Boden unter dem Niveau der Umgebung liegt. Typische Maare finden wir auf der Erde zum Beispiel auf der Insel Java und in Europa auf den sogenannten Phlegräischen Feldern bei Neapel und in Deutschland im Rheinland, wo in der Eifel ein großes, heute mit dem sogenannten Laacher See ausgefülltes Maar mit einem Durchmesser von 3,5 km liegt.

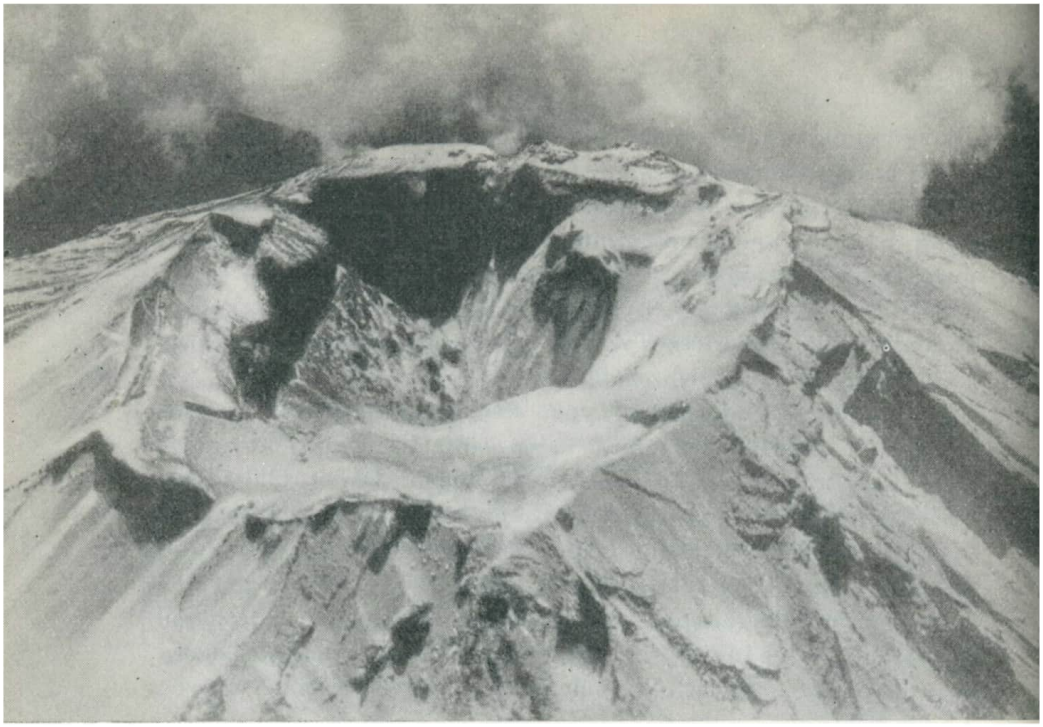
Explosionskrater, die ringsum von ringförmig aufgeschütteten Wällen umgeben sind. Ein typisches Beispiel dieser Art vulkanischer Krater ist der Monte Nuovo in den Phlegräischen Feldern bei Neapel, der einen Durchmesser von 0,8 km bis 1 km hat und von einem aufgeschütteten Wall mit einer äußeren Höhe von 120 m umgeben ist.

Aufgeschüttete Vulkankegel: Ein Beispiel ist der Vulkan Fudschisan (der früher Fudschijama genannt wurde) in Japan mit einer relativen Höhe von etwa 3000 m.

2. *Vulkane vom effusiven Typ*

Lineare Eruption oder *Tafelvulkane*: Beispiele dafür sind die bekannten Lava-Effusionen (Decken) auf der Hochebene von Dakkhin in Indien, lineare vulkanische Eruptionen auf Island und andere.

Schildförmige Vulkane auf sehr breiter Grundlage und mit mäßig geneigten Hängen: Ihr typischer Vertreter ist der Krater Kollota Dyngja auf Island mit einem Durchmesser von 500 m, einer relativen



Vulkan Fudschisan (Fudschijama) – aufgeschütteter Kraterkegel

Höhe von ebenfalls etwa 500 m und einem Neigungswinkel der äußeren Kraterwände von nur etwa 6 ° bis 8 °. Als Schildvulkane sind außerdem der Mauna Loa und der Kilauea auf den Hawaiischen Inseln bekannt.

Herausgedrückte Kuppen, die in Form von Kegeln oder Pyramiden aus zähflüssiger Lava von unten hochgedrückt werden: Ein Beispiel dafür ist die bekannte schmale Pyramidenformation in der Nähe des Vulkans Mt. Pelée auf der Insel Martinique mit einer Höhe von 375 m.

3. Gemischte Vulkane oder Stratovulkane

Zu den gemischten Vulkanen zählen über 90% der tätigen Vulkane unseres Planeten. Die Kraterhänge bestehen teilweise aus angeschüttetem Material, teilweise aus vulkanischem Ergußgestein.

Stratovulkane mit Caldera: Die Entstehung der Caldera genannten

großen kesselförmigen Vertiefungen ist nicht völlig eindeutig geklärt. Nach der einen Ansicht entstehen die Calderen durch riesige vulkanische Eruptionen, bei denen der Gipfel des ursprünglichen Vulkankegels, der von dem vorausgegangenen Ausbruch aufgehäuft worden war, gesprengt wird. An seiner Stelle entsteht eine breite, trichterförmige Vertiefung. Nach anderen Ansichten (H. Williams, 1937) entsteht die Caldera, wenn der Gipfel eines Vulkankegels in das unter dem Kegel entstandene Lavareservoir stürzt. Auf diese Weise erläuterte schon C. E. Dutton (1884) die Entstehung der Calderen einiger Vulkane auf dem Hawaiischen Archipel. Ein Beispiel für eine große Caldera ist der sogenannte Kratersee (Crater Lake) in Oregon in USA. Dieser See, der einen Durchmesser von 7,2 km bis 10,5 km und eine Wallhöhe von 2400 m besitzt, entstand aus dem ehemaligen über 4000 m hohen Vulkankegel Mt. Mazama. *Zusammengesetzte Stratovulkane* oder *Doppelvulkane* entstehen durch erneute vulkanische Tätigkeit im Inneren der Caldera. Beispiele dafür sind der jüngere Kraterkegel im Inneren des genannten Kratersees, genannt Wizard Island (Insel der Zauberer) und zwei weitere heute unter der Oberfläche des Sees begrabene Kegel. Auch der Vesuv liegt im Inneren der Caldera des ehemaligen Kegels Monte Somma.

Die *parasitischen* oder *adventiven Kegel* entstehen am Rande von Vulkanen aus den sogenannten Lava-Nebenausgängen, die gewissermaßen als Seitenäste von den zentralen Brennlöchern abzweigen. Der bekannte Vulkan Ätna auf Sizilien hat an seinen Hängen etwa 1000 solcher parasitischer Kegel.

Bei der bedeutenden Verbreitung der Vulkane auf der Erdoberfläche und ihrer großen Rolle in der Geschichte unseres Planeten ist es nicht verwunderlich, daß die Vulkanhypothese zu den ältesten Gedanken über die Entstehung der Mondkrater und der anderen Oberflächenformationen auf dem Monde gehört. Davon zeugt auch die Tatsache, daß schon die ersten Beobachter für die Bezeichnung dieser runden Oberflächenformation auf dem Mond den Ausdruck „Krater“ wählten.

Nach der klassischen Theorie von J. Nasmyth und J. Carpenter (1874) kam es in früher Vergangenheit auf dem Mond zu besonders mächtigen vulkanischen Ausbrüchen.

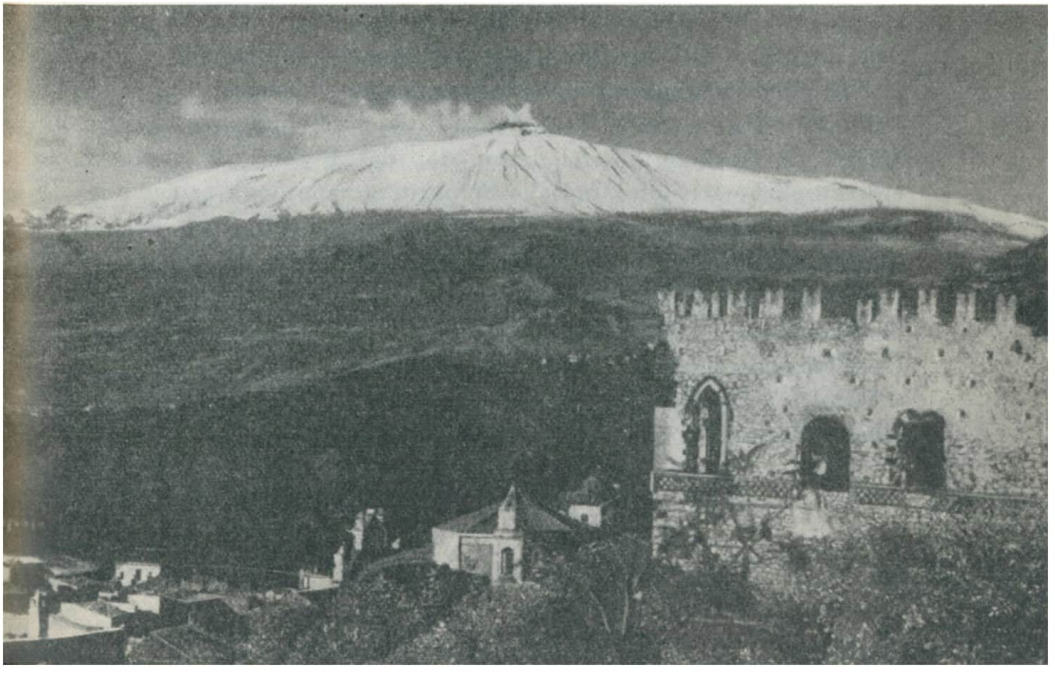
Neuere Forschungen haben aber ergeben, daß die Entstehung der Mondmeere auf der Grundlage der Vulkanhypothese ungeklärt bleibt. Es ist nicht wahrscheinlich, daß das Hauptmaterial der Meere aus Staub besteht; die Meere entstanden offenbar durch die Erstarrung glühenden Magmas. Es ist aber unwahrscheinlich, daß das vulkanische Lava war, auch wenn verschiedene moderne Autoren von den Meeren als von „ausgedehnten erstarrten Lavadecken" sprechen (R. S. Dietz, 1946). Zahlreiche in der Gegend der Meere beobachtete Erscheinungen (Adern, Rillen) zeugen davon, daß deren Oberfläche einmal sehr plastisch war und leicht verschiedenen Deformationen unterlag. So bringt zum Beispiel Dietz die Entstehung der Adern, die an der Oberfläche zahlreicher Meere zu beobachten sind, mit der Kontraktion in Verbindung, die durch die Abkühlung des Magmas hervorgerufen wurde. Später, als die Meeresoberfläche in einen viskosen oder halbzähen Zustand überging, entstanden als Folge der Magmabewegung unter der Oberfläche des Mondes die beobachteten Spalten, die Rillen. Es ist nicht ausgeschlossen, daß die Dome (Kuppen) das Ergebnis zeitweiliger Ausstöße noch nicht völlig erstarrten Magmas aus dem Inneren dieser langsam erstarrenden Lavadecken sind.

Neue Beweise für die Entstehung der Mondmeere durch Magma-Ergüsse bemüht sich auch der tschechische Geologe K. Beneš zu erbringen, der auf die besonders dunklen Flecken im Inneren der Wallebene Alphonsus (siehe Abbildung auf Seite 259) und auch an einigen anderen Stellen des Mondes aufmerksam macht. Beneš meint, daß diese Kontrastflecken auf der helleren und älteren Unterlage des Bodens des Alphonsus ähnliche Stoffe sind wie das Material des nächstgelegenen Meeres Mare Nubium. Er äußert die Ansicht, daß „der Krater Alphonsus schon lange vor der Entstehung des Mare Nubium existierte. Später aber kam es zu einer intensiven tektonischen Tätigkeit und zu Bewegungen der glühend flüssigen

Masse unter der Oberfläche der Mondkruste. Das Magma drängte sich an einigen gestörten Stellen an die Oberfläche und ergoß sich in ausgedehnten Decken in die Stellen der Mondmeere. Es nutzte auch die schwachen Stellen in den anliegenden Kontinenten; auf diese Weise gelangte es auch auf den Boden des Kraters Alphonsus. Die Böden anderer Krater wurden schließlich ganz mit Lavamaterial bedeckt. Ein solches Geschick erlitt der Krater Plato im Mare Imbrium..." (nach einer bisher unveröffentlichten Arbeit von Beneš, „Geologie Měsíce", „Geologie des Mondes").

„Insgesamt gibt es keine Gründe", schlußfolgert K. Beneš weiter, „die der Meinung entgegenstehen könnten, daß die eigentliche Grundlage der Mondmeere eine andere ist als der bekannte Charakter der Oberflächen der Kontinente auf dem Mond. Das simatische Material überdeckt nur die ältere Lithosphäre, deren allgemeiner Oberflächencharakter vor der Epoche der Entstehung der Meere kein anderer war als der, den wir heute in vielen Gegenden der Kontinente beobachten... Wir dürfen nicht der Vorstellung unterliegen, daß die Meere Ebenen im echten Sinne des Wortes sind. Ihre Lavaoberfläche ist rauh, porös, faltig und gewellt. In einigen

Der Vulkan Ätna auf Sizilien



Randgebieten ist sie schließlich ziemlich gegliedert und uneben, mit Kratern bedeckt, von Meeresgebirgen (Adern), aufragenden Eisbergen und gebirgigen Inseln unterbrochen. Diese Gebirgstrümmer sind die einzigen Zeugen der uns verborgenen darunterliegenden Lithosphäre. Sie zeigen sich auch noch dort, wo die Schollen der Unterlage nicht genügend tief absanken. Wenn wir die tektonischen Hauptlinien des Baues der Mondmeere beurteilen, gelangen wir zu der Vorstellung eines komplizierten Netzes von Schollenbewegungen nach den gesetzmäßig orientierten Bruchsystemen. Für die nicht sehr tief abgesunkenen Randschollen ist die Anwesenheit von ‚Sümpfen' (Paludes) typisch, gegebenenfalls auch von ‚Seen'; im geologischen Sinne sind das Formationen, die man am ehesten mit Grabenbrüchen oder Kesselbrüchen und Horsten vergleichen kann... Tiefer eingebrochene Schollen verraten sich durch Gruppen von gebirgigen Inseln und Eisbergen..." K. Beneš ist weiterhin von einem einheitlichen Mechanismus der Entstehung der Mondmeere überzeugt. Er schreibt darüber: „...von der Höhe der erwähnten Standpunkte aus ist es nicht leicht, die Vorstellung einiger Autoren darüber zu akzeptieren, daß die Entstehung der „Meeres"-Becken auf verschiedene Art und Weise vor sich ging. H. Quiring erläutert zum Beispiel die Entstehung des Mare Imbrium auf dem Wege exogener Dynamik. Seine Ansicht über die Absorption eines Mondmondes in der Gegend des Mare Imbrium ist sicher originell. Aber der Autor selbst enthält sich jeder Applikation dieses Vorfalles auf die Entstehung der übrigen Meere. Es ist kein Zweifel daran, daß das Regenmeer eine sehr eigentümliche selenotektonische Struktur gerade dank seiner umliegenden Horstgebirge hat. Aber darin sehen wir noch keinen Grund, daß der Mechanismus der Entstehung dieses Meeresbeckens eine Ausnahme darstellen und ein anderer sein muß, als wir ihn etwa im Falle des Mare Humorum oder Nubium vor uns haben..." (K. Beneš: Poznámky k strukturně tektonické stavbě některých měsíčních moří. Bemerkungen zur tektonischen Struktur des Baues einiger Mondmeere. Ř. H. 11, 1959, Seite 208).



Der Vesuv

Sehr interessant ist die Frage, wie die hellen Streifen und das Strahlensystem auf dem Monde entstanden sind. Nach Ansicht von J. Nasmyth und J. Carpenter (1874) entstanden die Strahlensysteme durch das Zerspringen der Mondoberfläche. Dieses wurde einerseits durch vulkanische Eruptionen und andererseits durch die Spannung bewirkt, die dem Erstarren der geschmolzenen vulkanischen Masse vorausging. So stieg dann durch die entstandenen Spalten frische Lava empor, die schnell erstarrte und in diesen Spalten eine Art vulkanisches Glas schuf, das das Sonnenlicht stark reflektierte. Nasmyth und Carpenter versuchten ihre Behauptung mit einem Experiment zu belegen. Sie nahmen eine mit Wasser gefüllte gläserne Kugel und tauchten sie in ein warmes Bad. Das eingeschlossene Wasser dehnte sich durch die Wärme mehr aus

als die gläserne Hülle und sprengte die Kugel an den Stellen des geringsten Widerstandes. Damit entstanden an ihrer Oberfläche ähnliche „Strahlensysteme" wie auf dem Monde.
Eine ähnliche Theorie über die Entstehung der Strahlensysteme vertrat auch W. H. Pickering. An Stelle glasartiger Lava in diesen Spalten nahm er die Entstehung heller poröser vulkanischer Lava an, des sogenannten Bimssteines. In neuerer Zeit erläuterte auch R. Schwiner (1943) die Entstehung der hellen Streifen auf dem Mond durch die Entstehung von tektonisch bedingten radialen Spalten in der Mondoberfläche. Nach seiner Meinung waren diese Spalten zusätzlich von hellen pegmatiten Magmatiten (grobkörnigem hellen Granit, bestehend aus Quarz, Orthoklas und hellem Glimmer, Muskovit) ausgefüllt. Der harte Stein dieser Spaltenfüllung konnte nach Schwiner ursprünglich wie eine Mauer emporragen (etwa ähnlich wie die bekannte Teufelsmauer bei Český Dub, einer durch Denudation herauspräparierten Basaltader mit einer Länge von mehreren Kilometern), wurde mit der Zeit aber zerstört. Das Gestein vermochte den monatlichen Temperaturschwankungen an der Mondoberfläche, die eine Amplitude von 200 ° bis 300 ° aufweisen, nicht standzuhalten. Auch in den Wüsten der Erde, wo die Temperatur bedeutend niedriger ist als auf dem Mond, kann man beobachten, daß die Steine durch plötzliche Erwärmung platzen. Abgesplitterte kristalline Gesteinsstücke springen dabei weg. So ähnlich entstanden zu beiden Seiten der Mauer Schuttkegel. Als die Erosion fortschritt, verwandelten sich die ursprünglichen Wände schließlich in sehr flache Kämme, die aus Schotter und Sand bestanden. Schwiner hat aber nicht berücksichtigt, daß die Stärke der ursprünglichen Wände sehr groß gewesen sein muß, wenn zum Beispiel einige helle Streifen des Kraters Tycho eine Breite von mehreren Dutzend Kilometern erreichen. Auch D. Alter (1955) meint, daß die Strahlen im wesentlichen von Spalten gebildet werden. Diese Spalten sind zu eng, als daß man sie direkt wahrnehmen könnte. Die „sichtbaren" Strahlen sind entweder Staub, der aus kleinen Kristallen verschiedener Mineralien gebildet wird, die aus

Gasen stammen, die diesen Spalten entströmen; oder es sind Gesteine, deren Färbung bei der Berührung mit diesen Gasen auf bedeutende Weise verändert wurde. Mit dieser Ansicht stimmt sehr gut die Meinung J. A. O'Keefes (1957) überein, daß nämlich die Strahlen im wesentlichen von kleinen durchsichtigen Kristallen verschiedener Mineralien gebildet werden, die das Sonnenlicht in gleicher Weise reflektieren, wie wir das von den kleinen Reflexionsprismen (Kathophoren) auf modernen Projektionsflächen kennen.
Nach Ansicht zahlreicher anderer Autoren werden die hellen Streifen auf dem Monde von den Ablagerungen vulkanischer Asche und anderem Material gebildet, das von den ehemaligen Mondvulkanen ausgeworfen wurde. Nach W. H. Pickering zeigt der vulkanische Staub, der den Boden bedeckt und so eine feine poröse Oberfläche bildet, ähnliche optische Besonderheiten wie die hellen Streifen. Pickering meint, daß der die Erde bedeckende vulkanische Staub – wie er selbst in Arequipa im südamerikanischen Staate Peru beobachten konnte – sehr gut zu sehen ist, wenn die Sonne hinter dem Rücken des Beobachters steht, aber verschwindet, wenn der Beobachter die Sonne vor sich hat. Diese Eigenschaft zeigt jede rauhe (poröse) Oberfläche. So vermerkt zum Beispiel A. W. Chabakow (1949), daß ihn die hellen Streifen auf dem Monde an verstaubte Fußwege in gepflügten Feldern erinnern. Mittags sind sie gut zu sehen, gegen Abend werden sie dunkel. Im Zusammenhang damit sind die Ergebnisse einiger Untersuchungen der Mondoberfläche interessant, die N. P. Barabaschew, A. W. Markow und einige andere sowjetische Astronomen durchgeführt haben. Schon den ersten Beobachtern des Mondes war es bekannt, daß die hellen Streifen in der Zeit um den Vollmond am deutlichsten hervortreten und daß sie in der Nähe des Mondterminators verschwinden. N. P. Barabaschew (1918, 1922, 1924) stellte schon vor Jahren fest, daß für die Veränderung der Helligkeit der hellen Streifen auf dem Mond die gleiche Regel gilt wie für die gesamte übrige Oberfläche des Mondes: Die Helligkeit der Mondgegend erreicht ihren maximalen Wert, wenn die auf den Mond fallenden Sonnenstrahlen und

die von ihm zur Erde reflektierten Strahlen die gleiche Richtung haben (in derselben Ebene liegen) – also bei Vollmond –, unabhängig davon, wie hoch über dem Horizont eines bestimmten Mondortes die Sonne gerade steht. Die Helligkeit einer Stelle der Mondoberfläche richtet sich also nur nach ihrer augenblicklichen Lage zur Sonne und zum Beobachter auf der Erde. Dieser sehr interessante Umstand kann einzig und allein aus dem porösen Zustand der Mondoberfläche erklärt werden. Der Mond verhält sich so, als wäre seine gesamte Oberfläche mit Grübchen bedeckt. Nach N. P. Barabaschew und A. W. Markow (1926) ist die Mondoberfläche einerseits mit Staub und verschieden grobem Bruchmaterial bedeckt; andererseits, besonders an den Oberflächen der Meere, ist sie von kleinen, relativ flachen Vertiefungen zerwühlt, die an der Grenze der Sichtbarkeit unserer Fernrohre liegen. Diese Ansicht wurde später bestätigt, als man im Labor untersuchte, wie das Licht von verschiedenen rauhen Stoffen reflektiert wird, und man die Ergebnisse mit der Reflexion des Sonnenlichtes der Mondoberfläche verglich. Solche Versuche führten N. P. Barabaschew und A. T. Tschekirda (1945) durch. Nach Barabaschew (1924) steigt die Helligkeit normaler Mondgegenden um etwa $1^{m}1$, die Helligkeit der hellen Streifen aber um $1^{m}5$, wenn die Sonne über dem Horizont der beleuchteten Gegend von 60 ° auf 90 ° „klettert". Hieraus kann nach Barabaschew geschlossen werden, daß die hellen Streifen noch poröser als die übrige Mondoberfläche sind. Zu einer ähnlichen Schlußfolgerung gelangte unabhängig von Barabaschew auch J. Wilkins. Dieses überraschende Ergebnis scheint anzuzeigen, daß die hellen Streifen offenbar aus ausgeworfenem Material bestehen. Wahrscheinlich sind sie durch einen vulkanischen Ausbruch aus dem Inneren des Mondkraters (Ringgebirge) herausgeschleudert worden. Sie enthalten wohl nicht nur feinen Staub (Asche), sondern auch gröberes Material (Felsbrocken).

Die Lakkolithhypothese Tomkins' und die Hypothese Moores

Eine Hypothese, die mit der vulkanischen Erklärung der Entstehung der Mondformationen zusammenhängt, äußerte im Jahre 1927 H. G. Tomkins. Er schreibt die Entstehung der Mondkrater der Wirkung der Lakkolithen zu, das heißt dem Eindringen glühend flüssigen Magmas in die Gesteinsschichten der Oberfläche.
In neuester Zeit versuchte A. P. Moore (1956) erneut die alte „Blasentheorie" über die Entstehung der Mondkrater zu „beleben" und ein wenig zu modifizieren. Er meint, daß der Druck der Gase, die dem heißen Magma entweichen, zuletzt die dünne und noch wenig erstarrte Oberflächenkruste angehoben hat und daß dadurch auf der Mondoberfläche eine Art Gewölbe entstand. Wenn in diesem Augenblick der Druck der Gase nachließ, blieb das Gewölbe erhalten. In der Mehrzahl der Fälle aber schossen die Gase schließlich durch eine verhältnismäßig enge Mündung nach außen, das Gewölbe fiel zusammen, und sein größter Teil schmolz in dem Lavasee, der sich auf dem Grunde des Gewölbes erstreckte. Moore beruft sich dabei auf die Dome (Kuppen), die seiner Meinung nach Zeugen der Entstehung der Mondkrater sind. Es ist aber kaum vorstellbar, daß sie das ursprüngliche Entwicklungsstadium der Wallebenen, Ringgebirge und anderen Krater sind. Man kann eher der Ansicht sein, daß die Dome (Kuppen) genetisch mit früheren Magma-Ergüssen zusammenhängen. Vielleicht stellen sie einen speziellen Mondtyp spitzer Vulkane oder von Buchscher Elevationskrater dar. Immerhin können die Mondkuppen auf dem Wege der Elevation bei einer sehr mächtigen Entwicklung der Gase und Dämpfe am Boden des „Lava"stromes entstanden sein, der eine bestimmte Gegend mit besonders „gaserzeugenden" Gesteinen erfaßte. Diese Hypothese scheint dadurch bestätigt zu werden, daß wir die Dome größtenteils an den Rändern der Meere finden, also an Stellen, wo die „Lavadecke" am dünnsten sein muß. Sie wird auch durch Erscheinungen unterstützt, die seinerzeit auf Island beobachtet wurden. Dort ergoß sich ein Lavastrom in ein Torflager,

so daß sich beim Aufeinandertreffen der glühenden Lava mit dem Torf eine große Menge von Gasen und Dämpfen bildete. Diese bewirkten schließlich durch ihren Druck, daß die erstarrende Lavadecke sich aufwölbte, barst und Formen bildete, die den Mondkuppen ähnlich sind.

Eine neue Hypothese über die Entstehung der Mondkuppen (Dome) äußerte im Jahre 1961 J. W. Salisbury. Hiernach stiegen zu der Zeit, als auf dem Mond die Lava der dortigen „Meere" allmählich abkühlte, aus dem Mondinneren an einigen Stellen heiße Dämpfe an die Oberfläche, die chemisch auf das in der Lava enthaltene Olivin einwirkten und es schließlich in Serpentin verwandelten. Die Umwandlung des Olivins in Serpentin ist von einer Vergrößerung des Volumens um 25 % begleitet, und Salisbury sieht in diesem Mechanismus die Ursache der Expansion und der Kuppenbildung.

Die zentralen Gipfel der Mondkrater entstanden nach Moore durch Erneuerung der vulkanischen Tätigkeit im Inneren der Lavaseen. Demnach wären nicht die eigentlichen „Krater" die wirklichen Mondvulkane, sondern ihre kleinen zentralen Gipfel. In diesem Falle müßten wir allerdings an ihren höchsten Stellen die typischen Kratervertiefungen beobachten können, den Kraterschlund. Ähnliche Vertiefungen wurden schon früher auf einigen vereinzelt stehenden Kegeln oder auf Kegeln beobachtet, die im Inneren von Kratern liegen. W. Goodacre (1931) hält diese Formen für typisch vulkanische Formationen und prägt für sie die Bezeichnung Gipfelkrater (Hill Top Craters). Deutsche Selenographen haben sie schon früher Kraterkegel genannt. Ein typischer Vertreter dieser Art von Mondkratern ist der Krater A im Inneren der Wallebene Regiomontanus. A. W. Chabakow führt an, daß es sich um einen Berggipfel mit grober Kegelform, mit einem Basisdurchmesser von etwa 8 km und einer Höhe von etwa 600 m handelt, auf dessen Gipfel ein kleiner Krater liegt. Aus der Form dieses Kraters schließt Chabakow, daß es sich um einen typischen Vulkan handelt und daß keine etwa von einem Meteoritenfall bewirkte Detonation einen so steilen und hohen Hals hätte hervorrufen können. Wenn wir be-



Regiomontanus A

denken, daß der beobachtete Krater selbst einen Durchmesser von 5 km hat, ist es einleuchtend, daß es sich hier nicht um einen „kleinen" Krater handelt, der seinen Platz auf dem Gipfel eines vulkanischen Kegels hat, wie es nach dem ersten Blick durch das Fernrohr der Fall zu sein scheint, sondern um einen Krater, der sich in seiner Form verhältnismäßig sehr wenig von dem üblichen Durchschnitt unterscheidet. R. B. Baldwin (1949) hält die auf den Gipfeln beobachteten Krater für zufällige Meteoriteneinschläge auf die Hügel und Zentralberge. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung berechnet er, daß man auf der gesamten bekannten Mondhälfte insgesamt etwa fünfzehn ähnliche Fälle erwarten kann. Im übrigen zeigen genaue Messungen, daß die Zentralberge der Mondkrater in keinem Falle steile Bergkegel sind, für die sie wegen ihrer

langen und scharfen Schatten von früheren Mondbeobachtern gehalten wurden, sondern daß sie nur sehr flache Erhebungen sind, deren Hänge zum größten Teil einen Winkel von 5 ° nicht übersteigen, so daß man sie kaum für aufgeschüttete Vulkankegel oder Stratovulkane halten kann.

Bis in die jüngere Zeit war man allgemein der Ansicht, daß die „Gipfelkrater" auf dem Mond tatsächlich sehr selten sind. Ihre Zahl schätzte man auf etwa 12 (darunter zum Beispiel die auf den Zentralbergen der Krater Bürg, Capella, Herschel befindlichen Krater), was sehr gut der Schätzung Baldwins entsprechen würde. In den Jahren 1952 und 1953 aber ergänzten H. P. Moore und H. P. Wilkins bei der Beobachtung des Mondes am Pic du Midi diese Zahl auf 52, und das schon während der Beobachtung in einigen wenigen Nächten. A. P. Moore erwähnt, daß die neuen Krater einerseits auf einigen zentralen Gipfeln entdeckt wurden – beispielsweise in den Kratern Pythagoras, Aristarch, Cepheus, Römer, Xenophanes – und andererseits auf einigen isoliert zwischen größeren Kratern liegenden Hügeln – beim Aristillus M, Agrippa M, bei einem Hügel südlich vom Krater Beer, beim Archimedes Z und an anderer Stelle. Der Durchmesser des Großteils dieser Krater liegt bei 1,5 km; sie sind also sehr klein. Das erklärt am besten, warum sie nicht schon früher entdeckt worden sind. Wenn man diese Entdeckungen, die später auch von anderen Beobachtern bestätigt wurden, fortsetzt, können sie eine neue mächtige Unterstützung der Vulkanhypothese darstellen.

Einige Autoren schließen die Möglichkeit nicht aus, daß es sich wenigstens bei einer bestimmten Anzahl der von Moore und Wilkins entdeckten Krater um sogenannte Pseudokrater handelt, um unregelmäßige Vertiefungen oder schattenwerfende Erhebungen, die bei ihren kleinen Ausmaßen leicht mit kleinen Kratern verwechselt werden können. Viele dieser angeblichen Krater liegen nämlich auf dem entsprechenden Gebirgsgipfel nicht genau zentral, wie das bei Vulkanschlünden sein müßte, sondern ihre Lage ist stark exzentrisch.

Die Gezeitenhypothese von Ebert und Pickering

Unter den älteren Hypothesen über die Entstehung der Mondkrater verdient die sogenannte Gezeitenhypothese besondere Erwähnung, die erstmalig von H. Ebert (1900) und unabhängig davon auch von W. H. Pickering geäußert wurde.

Ebert schreibt die Entstehung der Krater der Wirkung der irdischen Anziehungskraft auf den Mond zu, und zwar zu der Zeit, als der Mond noch eine relativ rasche Rotation besaß und in bedeutend geringerer Entfernung als heute um die Erde lief. Seiner Meinung nach schwoll unter dem Einfluß der irdischen Anziehungskraft im Inneren der noch nicht genügend erstarrten Mondkruste das glühend flüssige Magma an. Unter dem Einfluß dieser sich periodisch wiederholenden „Flut" durchbrach es schwächere Stellen und ergoß sich über die umliegende Oberfläche. Dabei schmolzen Teile des Oberflächengesteins an den Stellen dieser Ergüsse. Während der folgenden „Ebbe" floß das Magma durch die ausgebildete Öffnung zurück, aber nicht mehr vollständig. Teile halberstarrten Magmas blieben am Rande des Ausflusses gewissermaßen als Basis des kommenden Kraterwalles stecken. Flut und Ebbe des glühend flüssigen Magmas wiederholten sich noch vielmals, ein Teil überflutete in Zeiten erhöhten Zuflusses die entstehenden Wälle und kehrte nicht wieder zurück. So wurden die bekannten „sanften" äußeren Hänge der Mondkrater gebildet. Wenn das Magma schließlich erstarrte und seine Ergüsse schwächer wurden, bildeten die letzten, schon ziemlich schwachen Fluten einen einfachen oder mehr oder weniger gegliederten Zentralberg.

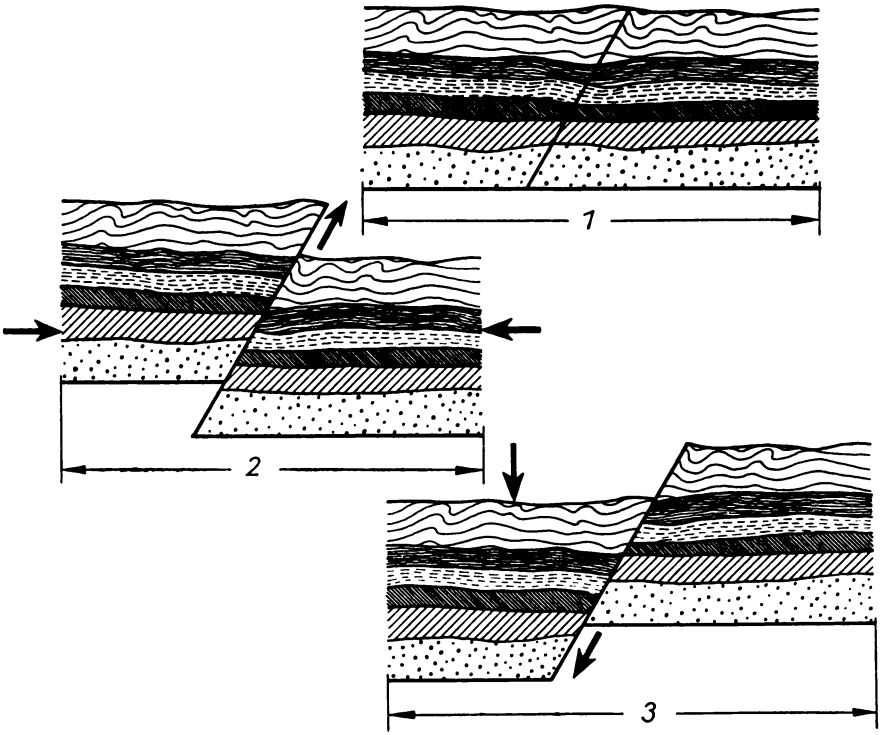
Nach Pickering wurden auf dem Mond zunächst große Krater (Wallebenen) in der beschriebenen Weise gebildet, und später, als die Mondkruste stärker und die Verbindung mit dem heißen Inneren immer schwieriger wurde, zeigten sich an der Mondoberfläche immer kleinere Krater, von denen viele auch im Inneren größerer, schon früher ausgebildeter Krater entstanden. Als sich auf dem Mond die Kruste immer stärker abkühlte und erstarrte, platzte

seine Oberfläche, und aus seinem Inneren ergossen sich glühende Lavamassen auf die Mondoberfläche. So entstanden nach Pickering die heutigen Meere. Die Gezeitenhypothese wurde auch von anderen Autoren vertreten, so zum Beispiel von W. Hommel (1919). In neuester Zeit verteidigte sie N. Boneff (1956). Er behauptet, daß die Krater auf dem Monde vor langer Zeit durch die Wirkung der Erdanziehung auf das glühend flüssige Innere des Mondes entstanden. Die Gezeitenkräfte „saugten" die glühende Masse aus dem Mondinneren. Auf der Mondoberfläche erstarrte sie, nachdem sie ihre Wärme in den interplanetaren Raum ausgestrahlt hatte, und bildete typische runde Formationen: Meere und Krater.
Gegen die Gezeitenhypothese von Ebert-Pickering kann man aber eine Reihe ernsterer Einwände vortragen. So müßten zum Beispiel die Gezeiten, die von der Erde in der glühend flüssigen Schicht unter der Mondoberfläche hervorgerufen wurden, in der Nähe der Pole am niedrigsten und in Äquatornähe am höchsten gewesen sein. Die Größe der Mondkrater müßte demnach von ihrer selenographischen Breite abhängig sein. Die größten Krater müßten wir also in der Nähe des Mondäquators finden, und von dort müßte sich ihre Größe auf die beiden Pole zu allmählich verringern. Auf dem Monde ist aber nichts Derartiges zu beobachten.

Die tektonische Hypothese

Die Tektonik ist ein besonderes Fach der Geologie. Sie beschäftigt sich mit dem Bau und der Bewegung der Erdkruste. Auf die Erdkruste wirken im Laufe der Zeit Tangentialkräfte, die sich als seitlicher Druck äußern, und Radialkräfte, senkrecht wirkende Kräfte. Beide rufen in der Erdkruste verschiedene tektonische Störungen oder Dislokationen (Verlagerungen) hervor. Die Auswirkung dieser Störungen ist davon abhängig, um welche Kraft und um welches Gestein es sich handelt. Tangentiale Kräfte beispielsweise sind durch die Entstehung einer Spannung in der Erdkruste bei ver-

schiedenen Prozessen bedingt, die das Emporsteigen von glühend flüssigem Magma zur Erdoberfläche begleiten. So kann es zum Beispiel bei ihrer Wirksamkeit auf waagerecht liegende Ablagerungsschichten entweder zu Deformationen kommen, die nicht von einer Unterbrechung des Zusammenhanges begleitet sind (Faltung), oder es entsteht hier eine Unterbrechung, ein Bruch, an dessen Bruchfläche (Verwerfungsfläche) es zu einer Verschiebung kommt, wobei eine Scholle gehoben und der vom gesamten Gestein vorher



Von Brüchen begleitete tektonische Störungen. Bei der Verschiebung (2) entsteht eine Hebung der linken Scholle und eine Verkleinerung des Raumes (gegenüber 1). Bei der Senkung (3) kommt es zu einem Absinken der linken Scholle und einer Vergrößerung des Raumes (gegenüber 1)

eingenommene Raum vermindert wird. Wenn auf die Erdkruste Radialkräfte wirken, können wiederum zwei Fälle eintreten. Es kommt entweder zu einer Störung ohne Bruch, es entsteht in den Schichten der liegenden Gesteine eine Biegung oder Flexur, oder es entsteht ein Bruch, der vom Absinken einer Scholle begleitet ist und eine Vergrößerung des von dem Gestein eingenommenen Raumes hervorruft. Verschiebungen und Senkungen haben in tektonisch gestörten Gegenden gewöhnlich einen parallelen Verlauf; das heißt, sie bilden ganze Bruchsysteme, wodurch die Ganzheit der Schichten in eine Reihe von Schollen oder Scheiben zerrissen wird, die verschieden gehoben und gesenkt werden. Damit entstehen häufig recht komplizierte tektonische Formationen, Stufenbrüche, Einbrüche, Horste.

Es ist nicht daran zu zweifeln, daß es in früherer Zeit auch auf dem Monde zu tektonischen Störungen kam. Die Tektonik des

Gefaltete Gesteine



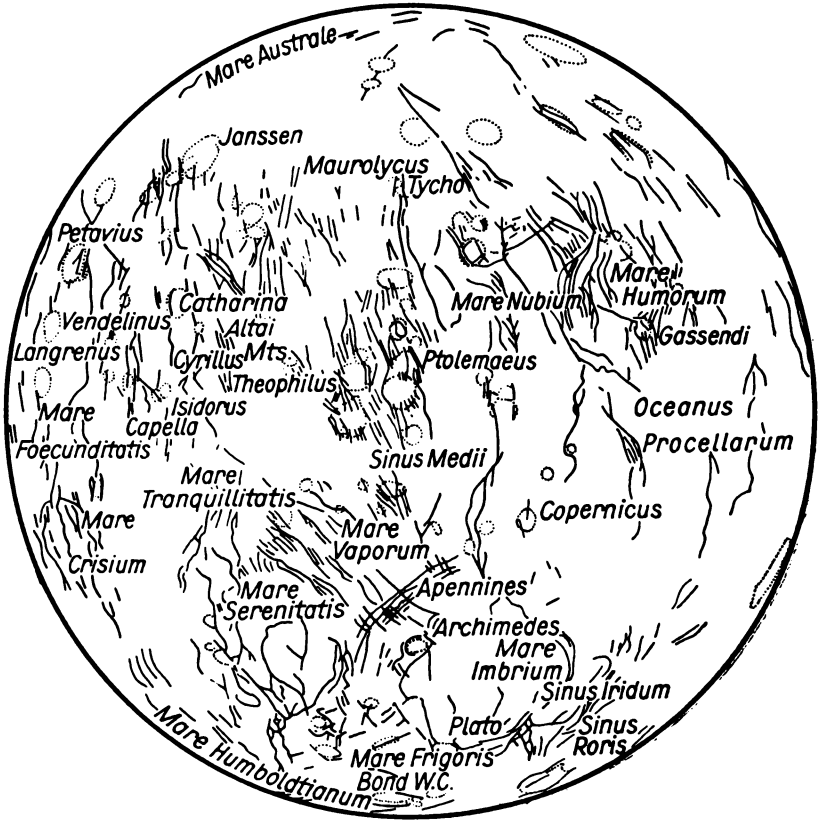
Mondes (Selenotektonik) muß sich aber von der Geotektonik in vieler Hinsicht unterscheiden. Auf dem Mond existieren keine schichtweise abgelagerten Sedimentgesteine, so daß es zum Beispiel nicht zu Faltungen, Biegungen usw. kommen konnte. Dafür konnten Brüche entstehen, die von Hebungen und Senkungen begleitet waren. Da die tektonischen Störungen auf der Erde in vielen Fällen auch von der Entstehung vulkanischer Tätigkeit begleitet sind, kann man auch auf dem Monde eine Abhängigkeit der vulkanischen Erscheinungen von Bruchsystemen, den tektonischen Linien, erwarten.

Nach Ansicht vieler Forscher, die die tektonische Hypothese vertreten, entstanden durch die ehemalige tektonische Tätigkeit auf dem Monde nicht nur Rillen, Täler, Ringgebirge in einigen Meeren, sondern auch viele Krater. Für diese Hypothese zeugt hauptsächlich die ungleichmäßige Form zahlreicher großer Krater (Wallebenen), die von anderen Hypothesen ungenügend erklärt werden können, und weiter der Umstand, daß diese Formationen, wie wir bereits erwähnten, an der Mondoberfläche sehr häufig zu regelmäßigen Reihen oder engen Gruppen geordnet sind. Diese Erscheinungen kann man bei so großen Formationen schwerlich als lineare vulkanische Eruptionen erklären; man kann sie aber als Folgen von Einbrüchen ansehen, als Folge des Absinkens von Teilen der Mondoberfläche entlang der tektonisch bedingten Bruchlinien. Nach dieser Hypothese wären also viele Mondkrater und ebenso zahlreiche Mondmeere in Wirklichkeit keine echten Krater, sondern durchgebrochene Krater. Es wurde zwar eingewandt, daß die irdischen Durchbrüche insgesamt eine andere Form haben und daß wir keinerlei „Durchbruchskrater" an der Oberfläche unseres Planeten finden; aber das kann auch daher rühren, daß ähnliche Kraterdurchbrüche aus früheren Zeiten auf der Erde durch die intensive Verwitterung schon lange vernichtet wurden. In diesem Zusammenhang ist es sehr interessant, daß die Entstehung runder, überfluteter kraterähnlicher Einbrüche schon mehrfach im Zusammenhang mit Erdbeben beobachtet wurde. So wurde zum Beispiel

bei dem Erdbeben am 12. Juni 1897 in Rowmari in Assam in Indien im Sand die Entstehung kraterförmiger, von konzentrischen Rissen umgebene Einbrüche festgestellt, die auffallend an das bekannte System der konzentrischen Spalten in der Umgebung des Mare Humorum erinnern.

Trotz einiger bis jetzt zweifelhafter Fragen scheint diese tektonische Hypothese sehr fruchtbar, was aus einer Reihe von Arbeiten hervorgeht, die in Frankreich, Deutschland, Italien, in der ČSSR und in der UdSSR veröffentlicht wurden.

Bruchsystem auf dem Monde nach A. W. Chabakow



So studierten zum Beispiel G. Delmotte (1923), seine Mitarbeiter und Nachfolger Lamèch, Piérot, Darney (1938, 1940) sehr eingehend die Anordnung der verschiedenen Oberflächenformationen (Rillen, vereinzelter Berggipfel, Krater, Kratergruben u. a.) auf dem Monde. Sie erforschten ihre Beziehung zu einem bestimmten – „les aires elliptiques" genannten – tektonischen System und kamen zu der Schlußfolgerung, daß auf dem Mond eine ehemals recht breite tektonische Tätigkeit bis heute sichtbar ist.

Auch nach O. Matoušek (1924, 1930) kann man den Großteil der markanten Formationen auf dem Monde tektonischen Prozessen beziehungsweise der mit ihnen verbundenen vulkanischen Tätigkeit zuschreiben.

A. W. Chabakow (1949) unterscheidet auf dem Monde ein kompliziertes System von Brüchen (разлопы) und daran entlang sich bildende Einbrüche. Seine tektonische Mondkarte zeigt, daß der Großteil der Oberflächenformationen des Mondes (Meere, Rillen, Wallebenen) offenbar Beziehung zu der Gesamttektonik des Mondes hat. Chabakow unterscheidet auf dem Monde im wesentlichen zwei Hauptarten von Brüchen, und zwar offene Brüche (открытые разлопы), zu denen er Täler, Rillen, Einbrüche in Kraterwälle und Gebirge sowie Spalten zählt, und zusammengedrückte oder geschlossene Brüche (сжатые разлопы), die man nur nach den dabei entstandenen Dislokationen (Hebungen, Senkungen) unterscheiden kann. Chabakow stellt fest, daß die Brüche auf dem Mond in drei Grundrichtungen verlaufen: von Nordwesten nach Südosten, von Nordosten nach Südwesten und von Norden nach Süden.

Die wechselnde Verkleinerung und Vergrößerung des Mondvolumens, die Pulsationen, erläutert Chabakow als Folge der Wirkung innerer Mondkräfte. Er führt an, daß sie, absolut genommen, keineswegs groß sein muß. Zum Beispiel kann man die Entstehung der Meere und ihrer Randgebirge seiner Meinung nach aus einer Verringerung des Monddurchmessers um etwa 150 bis 200 m erklären.

Chabakow unterteilt die bisherige Entwicklung der Mondoberfläche in 5 Epochen, die er folgendermaßen charakterisiert:

1. Die ältesten Täler entstanden nach dem Erkalten der Mondkruste, die noch keine Ringgebirge aufwies. Aus dieser Zeit sind Gegenden des Typs vom südwestlichen Hang der Apenninen erhalten: die voraltaische Periode.
2. In dieser Periode bildeten sich die ältesten Meere, die später außer den Resten des ursprünglichen Meeres südwestlich vom Altaigebirge unter den neu entstandenen Kratern verschwanden: die altaiische Periode.
3. In diesem Abschnitt bildete sich ein ganzes Feld von Kratern vom Typ der Wallebene Ptolemäus und der Wallebenen in der Umgebung der Mondpole. Einige große Krater aus dieser Periode wurden von der Lava jüngerer Meere überflutet: die ptolemäische Periode (auch mittlere oder vormaritime Periode genannt).
4. In diesem Abschnitt entstand der heutige Meeresgürtel und der Oceanus Procellarum: die jüngere Mareperiode oder Ozeanperiode.
5. In dieser Periode entstanden die jungen Krater vom Typ des Ringgebirges Kopernikus mit dem Strahlensystem unter dem Einfluß einer neuen Ausdehnung der Mondkruste. Eine Begleiterscheinung war die Ausbildung neuer Spalten und eine erneute Verstärkung der vulkanischen Tätigkeit: die kopernikanische Periode.
6. Der gegenwärtige Abschnitt gehört an das Ende der kopernikanischen Periode, in die Zeit der zeitweiligen Stabilisation der Mondkruste: die Periode der Ruhe.

Ähnlichen Pulsationen, wie sie Chabakow beim Mond annimmt, ist nach der Ansicht einiger Geologen offenbar auch unsere Erde unterworfen.

Die Hypothese von der Pulsation erklärt einige Widersprüche zwischen älteren Verteidigern der tektonischen Hypothese. So erläuterte Ruud schon zu Beginn dieses Jahrhunderts die Entstehung von Kratern an der Mondoberfläche durch „Kontraktion der Mondkruste", während der französische Physiker Fillias die Ansicht vertrat, daß die Krater keineswegs durch Kontraktion der

Kruste entstanden sind, sondern umgekehrt durch Expansion, durch Ausdehnung des Mondinneren. Der ungarische Forscher P. Hédervári (1959) erklärt die Entstehung von Kratern und anderen Oberflächenformationen auf dem Monde durch die fortschreitende Expansion des Mondes (Wachsen des Monddurchmessers) um etwa 5,5 mm im Jahr. Hédervári geht von der Hypothese des ungarischen Geophysikers L. Egyed aus, wonach eine ähnliche Expansion auch bei unserer Erde und den anderen unserer Erde ähnlichen Planeten vor sich geht. Egyed meint, ähnlich wie W. H. Ramsey, daß sich der Kern unseres Planeten auf Grund des sehr hohen Druckes in der metallischen Phase befindet (nach K. E. Bullen beträgt der Druck im Kern unserer Erde $3{,}64 \cdot 10^{12}$ dyn/cm^2). Wenn der Druck in einem bestimmten Teil der Erde unter $137 \cdot 10^{10}$ dyn/cm^2 sinkt, geht diese Masse aus ihrer metallischen Phase in den normalen Zustand über und nimmt gleichzeitig damit an Volumen zu. In diesem Prozeß sieht Egyed die Ursache für die ununterbrochen fortschreitende Expansion der Erde, die mit einer Geschwindigkeit von jährlich etwa 0,5 cm verläuft. Nach Hédervári ist der Druck im Inneren des Mondes gegenwärtig $4{,}72 \cdot 10^{10}$ dyn/cm^2, also etwa der gleiche wie auf der Erde in einer Tiefe von 100 bis 200 km. Der Mond kann deshalb gegenwärtig keinen metallischen Kern besitzen. Etwa vor 4 Milliarden Jahren aber hatte der Mond einen Halbmesser von 1505 km und einen metallischen Kern mit einem Halbmesser von 691 km. Das Volumen des Mondes beginnt aber schnell zu wachsen. Schon etwa 14 Millionen Jahre nach seiner Entstehung hatte der Erdtrabant nach den Berechnungen Hédervári̇s einen Halbmesser von 1582 km, und der Halbmesser seines Metallkerns verringerte sich auf 582 km. Etwa vor 3 Milliarden und 959 Millionen Jahren endete die Expansion des Mondes; denn zu dieser Zeit sank der Druck im Mondinneren unter den genannten kritischen Wert von $137 \cdot 10^{10}$ dyn/cm^2, und der Halbmesser seines Metallkerns sank unter Null.

Die Meteoritenhypothese

Nach einer bereits im Jahre 1873 von R. Proctor geäußerten Hypothese entstanden die Mondkrater und ebenso auch einige Meere auf dem Monde durch den Einfall riesiger Meteorite auf die Mondoberfläche zu einer Zeit, als seine Oberflächenkruste offensichtlich noch nicht ganz erstarrt war. Als erste entstanden auf diese Weise wohl die großen Wallebenen und Meere, deren Böden bei der Verletzung der dünnen Mondkruste von Lava überflutet wurden. Viel später, als die Mondkruste ständig stärker wurde, wurden die gebildeten „Krater" immer kleiner. Ihre Entstehung war schon nicht mehr von Lava-Ergüssen begleitet. Proctor und nach ihm auch die übrigen älteren Verteidiger der Meteoriten- oder Aufsturzhypothese stellten sich aber die Entstehung der Krater durch Meteoriteneinfall noch sehr einfach vor. Sie dachten nämlich, daß die Mondkrater durch den bloßen Aufprall und das Eindringen von Meteoriten in die Mondoberfläche entstanden sind, wobei der Meteorit, noch bevor er selbst eindrang, den Boden, auf den er stürzte, irgendwie „auseinanderdrängte", wodurch sich eine trichterförmige Öffnung bildete, die von einem niedrigen Ringwall aus herausgedrücktem und herausgeworfenem Material gesäumt wurde. Das bewiesen auch die Versuche, bei denen zum Beispiel schwere Körper in breiartige Masse (Mörtel) geworfen wurden. Dabei entstanden Miniaturmondkrater, die von Wällen gesäumt waren; in einigen Fällen waren diese Krater in der Mitte sogar mit einem deutlichen „Zentralberg" versehen.

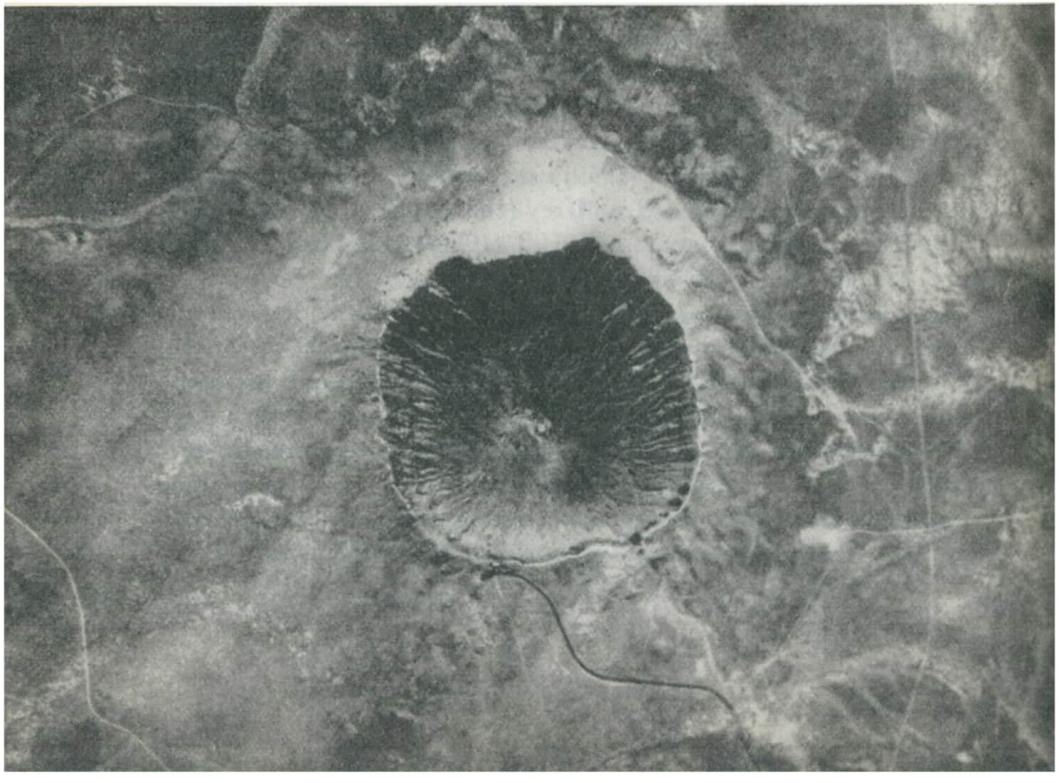
Gegen diese Hypothese können wir aber berechtigte Einwände erheben. Es ist kaum vorstellbar, daß auf dem Mond Meteorite mit einem Durchmesser von mehreren hundert Kilometern aufprallten; denn nur damit könnte man die Entstehung einiger Wallebenen erklären. Außerdem wären die auf diese Art und Weise entstandenen Krater nur im Falle eines senkrechten Meteoriteneinfalles auf die Mondoberfläche kreisrund, während in allen anderen Fällen Krater mit einer länglichen Ellipsenform entstehen würden.

Der Meteoritenhypothese wurde weiter entgegengehalten, daß Meteorite, die die Ursache der Entstehung von Mondkratern sind, auch auf unsere Erde aufprallen und hier ähnliche Krater bilden müßten. Zu dieser Zeit waren aber solche Krater auf der Erde nicht bekannt. Darum hatte die Meteoritenhypothese von Anfang an nur sehr wenige Verteidiger. Diese Situation änderte sich aber plötzlich, als einige Forscher gegen Ende des vergangenen Jahrhunderts zu einer völlig neuen Auffassung dieser Hypothese kamen und behaupteten, daß die Krater auf dem Mond nicht durch einfachen Aufsturz und durch Eindringen von Meteoriten in die Mondoberfläche gebildet wurden, sondern durch einen Ausbruch (Explosion), der diesen Aufsturz begleitete, und als auch auf der Erde Krater meteoritischen Ursprungs gefunden wurden. Heute ist die Meteoritenhypothese eine der am besten ausgearbeiteten selenologischen Hypothesen überhaupt. Der Forscher, der sich mit der Erforschung der Entstehung der Krater und anderer Oberflächenformationen des Mondes beschäftigt, muß ihr zwangsläufig die entsprechende Aufmerksamkeit widmen. Es trifft aber nicht zu, wenn M. Hoyaux (1950) schreibt, daß 75% aller Selenologen, die sich in den letzten Jahren den Fragen der Entstehung und Entwicklung der Oberflächenformationen auf dem Mond widmeten, heute die Meteoritenhypothese vertreten. Endgültige Beweise für die Meteoritenhypothese stellte R. B. Baldwin (1949) zusammen, und in neuester Zeit wurden sie besonders von H. C. Urey (1952, 1956, 1957), G. Fielder (1955), J. J. Gilvarry und J. E. Hill (1956), G. P. Kuiper (1954) und D. Alter (1957) ergänzt.

Wir erwähnten bereits, daß als wichtigster Einwand gegen die Meteoritenhypothese die Überlegung galt, daß ein durch Meteoritenaufschlag gebildeter Krater nur bei vertikalem Aufprall kreisrund sein könnte. Nach neuen Forschungsergebnissen entstehen aber Meteoritenkrater keineswegs nur durch bloßen Aufsturz, sondern durch die Explosion, die eine Folge der plötzlichen Umwandlung der hohen kinetischen Energie (Bewegungsenergie) des Meteoriten in Wärmeenergie bei seinem Zusammentreffen mit der festen Ober-

fläche ist. Eine solche Explosion kann immerhin einen kreisförmigen Krater bilden, auch wenn der Auftreffwinkel außerordentlich klein ist. V. Vand (1945) schreibt darüber: „Stellen wir uns vor, was geschieht, wenn ein schneller Meteorit die Mondoberfläche erreicht. Unglücklicherweise oder besser glücklicherweise haben wir auf der Erde keine großen Erfahrungen über die Wirkung der enormen kosmischen Geschwindigkeiten beim Zusammenprall von Körpern, und das verdanken wir der Schutzwirkung unserer Atmosphäre. Dabei werden Kräfte wirksam, denen gegenüber die normale Kohäsionskraft der Masse völlig bedeutungslos ist. Man kann daher den aufprallenden Körper ebenso wie die Mondoberfläche für eine freie Anhäufung von Atomen halten. Ihre gegenseitige kinetische Energie wird vernichtet und erscheint im Kollisionspunkt als Erhitzung des Gefüges auf hohe Temperaturen. Wir können sie nach der bekannten Formel für die kinetische Energie aus der Gleichung

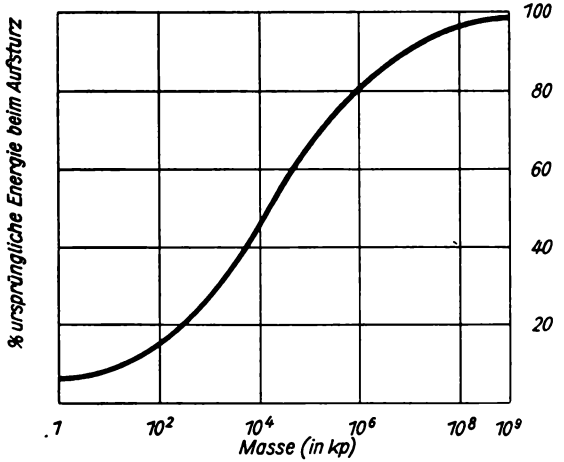
Luftaufnahme des Meteoritenkraters in Arizona



$T = 40\,\mu v^2$ berechnen, wobei μ das mittlere Atomgewicht der zusammenprallenden Stoffe, v die Relativgeschwindigkeit der Atome, gemessen in km/s, und T die absolute Temperatur bedeuten. Wir stellten bereits fest, daß die Geschwindigkeit des Zusammenpralls gewöhnlich 30 km/s beträgt, was bei einem Atomgewicht von beispielsweise 30 eine Temperatur in der Größenordnung von 1 000 000 Grad Celsius ergibt. Im Kollisionspunkt bildet sich ein außerordentlich heißes und komprimiertes Gas, das sich rasch ausdehnt und mit seiner Explosionsfähigkeit weitaus alles übertrifft, was der Mensch für Kriegszwecke erfand. Bei der Explosion einer von Menschenhand geschaffenen Bombe beträgt die Gastemperatur gewöhnlich einige Tausend Grad, was tausendmal weniger ist als der Mittelwert beim Aufsturz von Meteoriten. Bei der Explosion muß ein riesiger Krater entstehen, dessen Größe den ursprünglichen Körper um ein Vielfaches übertrifft, und dieser Krater muß Kreisform haben, unabhängig von Form und Einfallswinkel des aufprallenden Körpers."

Zu ähnlichen Schlußfolgerungen kamen auch K. P. Stanjukowitsch und W. W. Fedynski (1947), die sehr detailliert die Vorgänge studierten, die einen Aufprall großer Meteoriten auf die Erdoberfläche begleiteten. Ein „gewöhnlicher" Meteorit mit einem Gewicht von einigen Dutzend oder Hundert Kilogramm gräbt sich beim Aufsturz in die feste Oberfläche ein, ohne zu explodieren, weil seine Geschwindigkeit in der Erdatmosphäre stark gebremst wurde. Die Energie eines Meteoriten wird durch die Summe seiner Masse und das Quadrat der Geschwindigkeit bestimmt, mit der er sich bewegt. Die Beobachtungen zeigen, daß gewöhnliche Meteore in die Erdatmosphäre mit einer Geschwindigkeit von 8 bis 72 km/s eintauchen. Mit einer ähnlichen Geschwindigkeit dringen auch Meteorite in die Erdatmosphäre ein, aber ein etwa 40 kp schwerer Meteorit verliert auf seinem Weg durch die irdische Lufthülle mehr als 85% seiner ursprünglichen Geschwindigkeit, und wenn er bis zur Erdoberfläche vordringt, verliert er schließlich bis zu 98% seiner Energie. Demgegenüber „durchschlagen" Meteorite mit einem Gewicht von etwa 50000 Tonnen die Erdatmosphäre bedeutend

leichter. Sie verlieren auf ihrem Wege durch die Atmosphäre unseres Planeten nur etwa 10% ihrer Energie. Große Meteorite können deshalb auf die Erdoberfläche mit einer Geschwindigkeit von 16 bis 30 km/s aufprallen. Berechnungen zeigen, daß ein sich mit 30 km/s Geschwindigkeit bewegender Meteorit etwa die gleiche Energie mit sich trägt wie eine 65fache Gewichtsmenge von Nitroglyzerin. Diese riesige Energie verwandelt sich im Augenblick des Aufprallens des Meteoriten auf die feste Oberfläche unseres Planeten plötzlich in Wärmeenergie, und der Druck der Gase, die ebenfalls durch die beinahe augenblickliche Verdampfung des Meteoriten und seiner nächsten Umgebung entstehen, führt zu einer riesigen Explosion, die an der Aufsturzstelle einen Krater ausbildet und eine große Menge von Gesteinsmaterial in Form von Staub und größeren Bruchstücken in die Umgebung schleudert. Auf dem Mond muß die Wirkung des Aufschlags großer Meteorite viel größer sein. Dors gibt es einerseits keine Atmosphäre, die die Geschwindigkeit det Meteoriten bremsen könnte; andererseits ist die Anziehungskraft auf der Mondoberfläche sehr klein. Stanjukowitsch und Fedynski



Relativer Geschwindigkeitsverlust des Meteoriten als Funktion seiner Masse

kamen zu dem Schluß, daß ein entsprechend schneller Meteorit auf der Mondoberfläche einen Krater hervorrufen kann, dessen Ausmaße die ursprünglichen Abmessungen des Meteoriten bis zu tausendmal übertreffen.

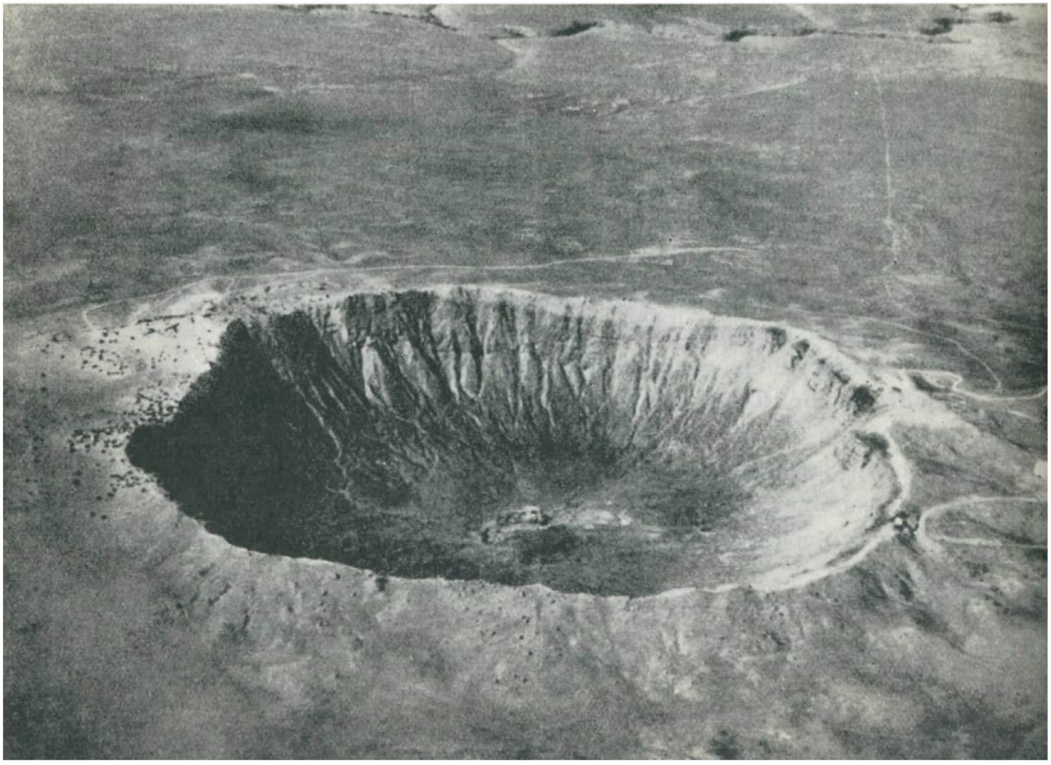
J. J. Gilvarry und J. E. Hill (1956) benutzten die bekannte Tatsache, daß die maximale Geschwindigkeit eines Meteoriten vor dem Aufprall gleich der Summe der heliozentrischen parabolischen Grenzgeschwindigkeit – die der Entfernung der Erde und des Mondes von der Sonne entspricht, also 42,2 km/s – und der Umlaufgeschwindigkeit des Erde-Mond-Systems ist, nämlich 29,7 km/s. Sie kann also annähernd 72 km/s erreichen. Bei dieser Aufsturzgeschwindigkeit kann man sowohl den Meteoriten als auch die feste Oberfläche der Erde (des Mondes) nach Gilvarry und Hill als „flüssig" auffassen, wie das auch die Versuche von J. M. Walsh und R. M. Christian (1954) mit der Wirkung von „Stoßwellen" in Metallen beweisen. Die maximal möglichen Drücke bei einem solchen Stoß sind größer als zweihundert Megabar (200 Millionen Bar), was annähernd dem bei der Explosion einer Atombombe entstehenden Druck entspricht. Die dabei entwickelte Temperatur übersteigt 100000 °C.

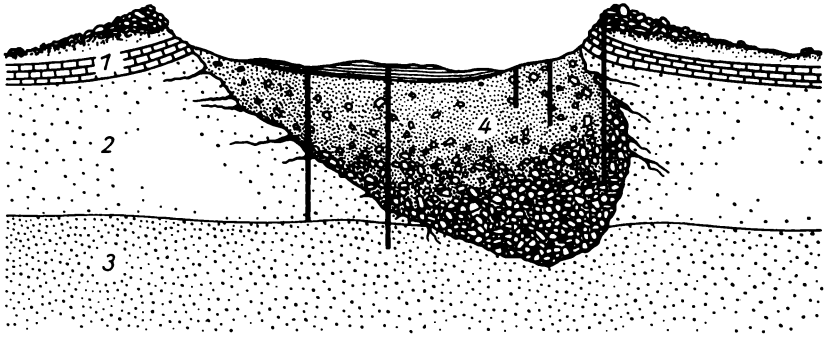
Nach J. Hopmann (1952) hat auch ein ganz kleiner Meteorit mit einem Gewicht von 100 Gramm, der sich mit einer Geschwindigkeit von 50 km/s bewegt, die gleiche kinetische Energie wie ein Geschoß mit einem Gewicht von einer Tonne und einer Geschwindigkeit von 500 m/s (schwerstes Geschoß der Marineartillerie bei einer Schußweite von 20 km), so daß der Meteorit nach dem Auftreffen auf die Mondoberfläche mit dieser unverringerten Geschwindigkeit eine ziemlich große zerstörende Wirkung hervorrufen kann. Nach Hopmann haben auch ganz kleine Meteoreinschläge „die oberste Schicht (bis zu 10 und 20 cm) so zertrümmert, daß die Körner im Durchschnitt 0,3 mm groß sind. Die eigentliche Haut des Mondes ist also ein Sandmeer, was sich aus dem thermischen Verhalten des Mondes bei einer Finsternis ergibt".

Von immer noch anhaltenden Meteoritenfällen auf dem Mond und

von ihren Explosionswirkungen zeugen auch einige Beobachtungen. So beobachtete zum Beispiel F. H. Thornton (1947) in der Nacht des 19. Oktober 1945 in der Nähe des westlichen Innenrandes am Walle des Kraters Plato einen hellen, orangegelben Blitz, den er dem Aufsturz eines Meteoriten auf die harte, felsige Mondoberfläche zuschrieb. Thornton verbindet diesen von ihm beobachteten „Meteorfall" mit dem Meteorstrom der Orioniden, der sich gerade um den 19. Oktober zeigte. Am 26. August 1955 beobachtete K. E. McCorkle (bei 200facher Vergrößerung) ein ähnliches Aufblitzen in der Gegend der Mondkarpaten, und zwar auf dem unbeleuchteten Teil der Scheibe. Die Helligkeit schätzt er auf 2^m und die Dauer auf 35 Sekunden. Ein weiteres Aufblitzen (flare), diesmal im Taurusgebirge, verzeichnete (bei 20facher Vergrößerung) am 8. September 1955 W. C. Lambert sowie am 26. November 1956 Curtis nordwestlich von der Wallebene Fra Mauro (jenseits der Terminatorlinie). Daß es sich offenbar um ganz reale Angaben handelt,

Der Meteoritenkrater in Arizona. Schräge Luftaufnahme





Querschnitt durch einen Meteoritenkrater: 1. Kalkstein, 2. weißer Sandstein, 3. roter Sandstein, 4. zertrümmerte Gesteine (die schwarzen Stellen kennzeichnen das häufigste Vorkommen von meteoritischem Staub und meteoritischen Bruchstücken). Die senkrechten Linien stellen die Richtung der Versuchsbohrungen (Sonden) dar

zeigt L. H. Stuart, dem es schon am 15. November 1953 um 2 Uhr Weltzeit gelang, ein solches Aufblitzen über dem unbeleuchteten Sinus Medii sogar zu photographieren.

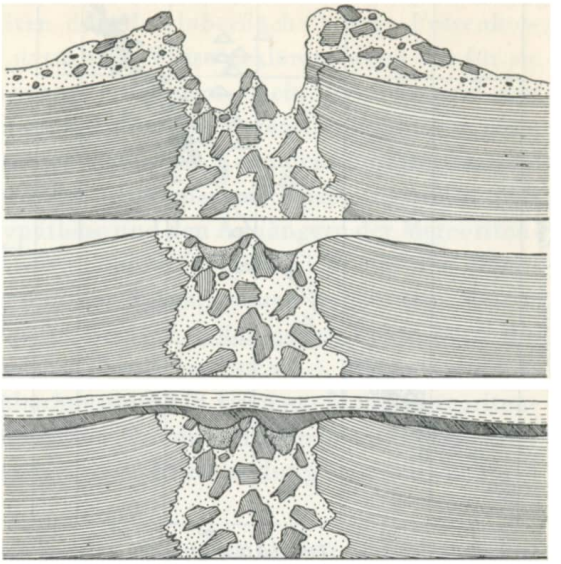
In neuester Zeit beschäftigte sich erneut E. J. Öpik (1958) mit der Entstehung von Meteoritenkratern und mit den Wirkungen des Aufschlags großer Körper (Meteoriten, Planetoiden, Kometenkernen) auf die Oberfläche der Erde und anderer Planeten (und auch des Mondes). „Wir sind jetzt der Übereinstimmung wenigstens in der Größenordnung sicher", schreibt Öpik, „daß nämlich der Krater Baringer, der bekannte Arizonakrater in den USA, von einem Meteoriten gebildet wurde, der sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 km/s bewegte und eine Masse von 2000000 Tonnen aufwies, was einer Eisenkugel mit einem Durchmesser von etwa 79 m entspricht. Der größte Teil des Meteoriten ist verdampft. Das aufgefundene Material bildet den unerheblichen Rest. Ein Teil ging als feiner Staub in die Atmosphäre über und wurde von den Luftströmungen über die ganze Erde verteilt."

Jahr für Jahr sind immer weitere Meteoritenkrater aufgefunden

worden. Darunter wurden in letzter Zeit auch einige sogenannte fossile Meteoritenkrater entdeckt, die sich aus früheren geologischen Zeiten erhalten haben und deren Entdeckung vom Standpunkt der Meteoritenhypothese besonders deshalb interessant und wichtig ist, weil sie sehr häufig den Einwand gegen diese Hypothese beseitigen, der sich auf die Disproportion zwischen der Zahl der Meteoritenkrater auf der Erde und auf dem Monde bezieht.

Die Existenz zahlreicher rezenter und fossiler Meteoritenkrater auf der Erde läßt nicht den geringsten Zweifel daran, daß der Aufsturz eines großen Meteoriten tatsächlich sehr große Aufsturzkrater formen kann. Damit ist aber noch nicht gesagt, daß die Krater auf dem Monde meteoritischen Ursprungs sein müssen. Viele Forscher versuchten deshalb im Laufe der Zeit, bestimmte Übereinstimmungen zwischen den Mondkratern und den meteoritischen Kratern auf der Erde zu finden. Es sei festgestellt, daß die Mondkrater, wie schon J. H. Schröter (1806) und H. Ebert (1900) und in neuester Zeit einige weitere Autoren zeigten, tatsächlich eine Reihe interessanter Übereinstimmungen nicht nur mit Meteoritenkratern aufweisen, sondern überhaupt mit allen durch Ausbruch (Explosion) entstandenen Kratern. So zeigte z. B. auch H. Ebert, daß das Verhältnis zwischen der Tiefe und dem Durchmesser der Mondkrater um so größer ist, je kleiner der zugehörige Krater ist. Wichtig ist besonders der Umstand, daß sich dieses Verhältnis von Fall zu Fall nicht bedeutend ändert, also bei Kratern gleicher Durchmesser immer dasselbe ist. Das beweist ihre gemeinsame Entstehung. Bei Kratern von mehr als 120 km Größe beträgt dieses Verhältnis nach Ebert 1 : 40, bei Kratern mit einer Größe von weniger als 28 km 1 : 10. Diese sogenannte Ebertsche Regel, deren Richtigkeit in neuerer Zeit mehrfach bewiesen wurde, gilt nicht nur für Mondkrater, sondern auch für Meteoritenkrater und künstlich geschaffene Explosionskrater; sie gilt nicht für Krater vulkanischen Ursprungs.

In neuerer Zeit wies R. B. Baldwin (1949) auf der Grundlage eingehenden Studiums der zahlenmäßigen Beziehungen zwischen den

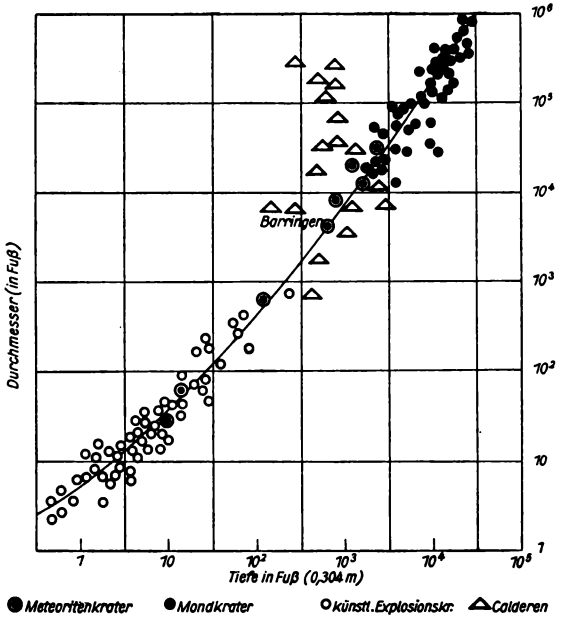


Flynn Creek Disturbance. Querschnitt durch den fossilen Meteoritenkrater in der Nähe von Gaineborough in Tennessee (USA). Oben sein Aussehen kurz nach seiner Entstehung. Auf dem mittleren Bild ist zu sehen, wie sich sein Aussehen im Verlaufe der Zeit veränderte. Die untere Darstellung zeigt sein heutiges Aussehen. Nach R. B. Baldwin

Durchmessern und den Tiefen bei irdischen Explosionskratern, irdischen Meteoritenkratern und Mondkratern darauf hin, daß zwischen diesen Formationen tatsächlich eine nahe Verwandtschaft besteht, die man kaum als zufällig ansehen kann. Die Baldwinsche Kurve ist heute eines der Argumente für die Meteoritenhypothese, das man nicht so leicht beiseite schieben kann.

Die Einwände gegen die Meteoritenhypothese faßte kürzlich W. G. Fessenkow (1958) zu folgenden Hauptpunkten zusammen:

1. die Existenz der Dome (Kuppen) an der Mondoberfläche,
2. die Existenz von Kratern des Typs Wargentin, die sich durch große Ausmaße auszeichnen und deren Inneres völlig mit Masse



Die Baldwinsche Kurve, die das Verhältnis zwischen Tiefe und Durchmesser bei künstlichen Explosionskratern, Meteoritenkratern und Mondkratern angibt

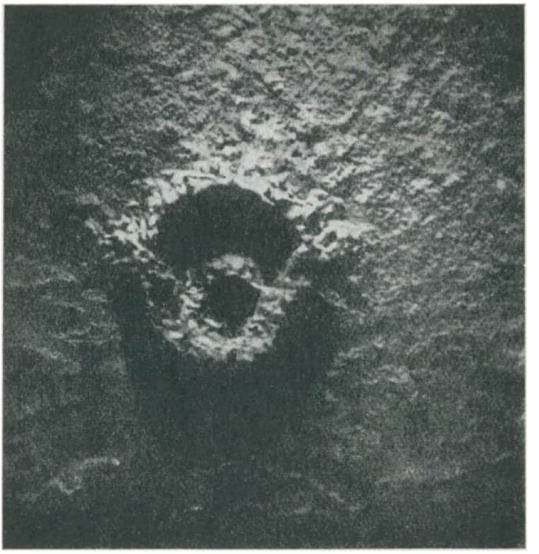
ausgefüllt ist, so daß diese Formationen mehr an runde Tafelberge erinnern als an Krater,

3. die polygonale Form der Mondkrater, augenscheinlich besonders in der Nähe des nördlichen Poles,
4. die ungleichmäßige Verteilung der kleinen Krater, die sich größtenteils um die Kämme der Ringgebirge gruppieren,
5. die Existenz zahlreicher Reihen kleiner Krater,
6. die Tendenz großer Krater, zu zweit oder in Reihen zu dritt und mehr hintereinander aufzutreten,
7. die allgemeine Beziehung zwischen Kraterstruktur, tektonischen Erscheinungen der Umgebung, der Richtung der Rillen usw.,
8. die Existenz der hellen Säume um die kleinen, einzeln gelegenen Krater und besonders um die, die sich zu Rillen gesellen,

9. die Anwesenheit von Kratern auf den Gipfeln der Zentralberge.

„Alle diese Besonderheiten der Mondoberfläche", sagt Fessenkow hierzu, „kann man auf natürliche Weise erklären, wenn wir für sie einen tektonischen Ursprung annehmen. Kein Geologe und nur sehr wenige Astronomen akzeptieren die Meteoritenhypothese ohne Ausnahme." Das stimmt zwar, aber der Kern des heutigen Streites zwischen den Anhängern der vulkanischen beziehungsweise vulkanisch-tektonischen Hypothese und den Anhängern der Meteoritenhypothese beruht auf etwas anderem; es geht nicht um den Nachweis, daß auf dem Monde in der Vergangenheit neben dem Meteoritenfall auch andere Kräfte wirkten – das geben heute auch die Vertreter der meteoritischen Theorie selbst zu –, sondern darum, genau abzugrenzen, ob überhaupt und in welchem Maße Meteoritenaufschläge das heutige Relief der Mondoberfläche beeinflußten. Hier ist natürlich jedwede „endgültige" Entscheidung sehr schwer.

Krater, entstanden durch einen in Mörtel geworfenen Stein. Nach H. Bürgel

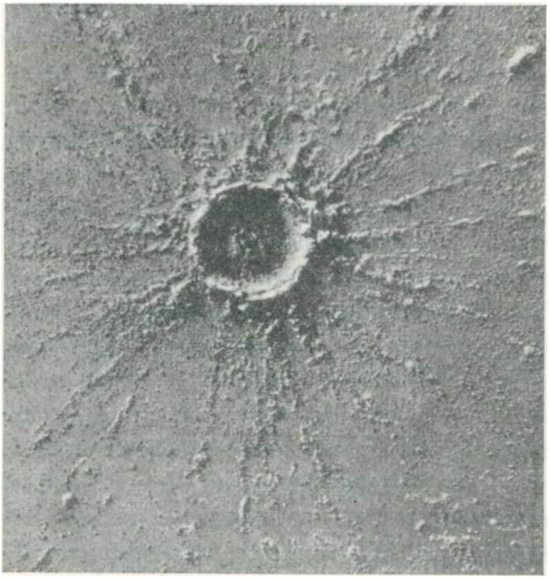


Als zehnten Punkt kann man den von Fessenkow angeführten Einwänden gegen die Meteoritenhypothese noch den von Z. Kopal vorgetragenen Einwand hinzufügen. Die jüngsten Forschungen von W. G. van Dorn zeigten, daß zur Entstehung eines Kraters mit dem Durchmesser von 30 km eine Energie von 10^{26} erg, wie sie R. B. Baldwin anführt, keineswegs ausreichen würde. Notwendig wäre eine Energie, die 100fach größer wäre, nämlich 10^{28} erg. Damit auf dem Monde Meteoritenkrater von der Größe des Kraters Clavius entstehen können, wäre dazu eine Energie notwendig, wie sie mit dem Einfall kleiner Planetoiden von der Größe des Eros, Hermes oder Adonis verbunden ist, deren Ausmaße auf 10 km und deren Massen auf 10^{13} Tonnen geschätzt werden. Das plötzliche Freiwerden so riesiger Energien müßte nicht nur die völlige Vernichtung der Aufprallstelle zur Folge haben, wie die Vertreter der Meteoritentheorie meinen, sondern seine Folgen müßten auf dem ganzen Monde in verschiedenen Abstufungen bemerkbar sein. Jeder Aufprall eines Körpers auf den Mond, der die Entstehung eines Mondkraters hervorruft, müßte gleichzeitig auf der Mondoberfläche ein „Erdbeben" auslösen, das durch ein sehr oberflächennahes Hypozentrum (Brennpunkt, Ausgangspunkt von seismischen oder Erdbebenwellen) charakterisiert wäre. Seine Auswirkungen würden mit Hilfe der seismischen Wellen über die ganze Mondoberfläche getragen, wo sie sich am gegenüberliegenden Punkt von allen Seiten wieder treffen und offensichtlich in bedeutendem Maße auch dort Zerstörungen auslösen müßten. Um die Wichtigkeit dieser Mondbeben wirklich voll zu erkennen, brauchen wir nur zu überlegen, daß die vernichtendsten Stöße, die unser Planet jemals erlitt, eine Energie von 10^{26} bis 10^{27} erg besagten, also 10mal weniger, als die Energie der hypothetischen Mondstöße betragen müßte, die die Entstehung eines Kraters mit 100 bis 120 km Durchmesser hervorrufen können. Wenn wir bedenken, daß es auf der sichtbaren Halbkugel des Mondes einige Dutzend derartiger Krater gibt und mehrere Hunderttausend Krater vertreten sind, deren Durchmesser einen Kilometer überschreitet, so können wir uns, wie Kopal sagt,

nicht genügend darüber wundern, daß so mancher ältere Berg oder Wall auf dem Mond diese Menge vernichtender Bebenstöße überlebte, die von dem Aufprall eines aus dem Raume kommenden Körpers hervorgerufen wurden. Solange die seismischen Einflüsse von Meteoritenaufschlägen auf dem Mond nicht genügend berücksichtigt werden, so schließt Kopal, können wir bei weitem nicht sicher sein, daß die Meteoriteneinfälle den einzigen oder auch den hauptsächlichen Weg zur Entzifferung der auf dem Gesicht des Mondes sichtbaren rätselhaften Hieroglyphen darstellen.

Wahrscheinlich muß man die Zeit abwarten, bis uns speziell zu diesem Zweck eingerichtete „Mondsonden" diese Frage zu lösen helfen. Am besten wird es sein, wenn wir hier gleich nach der Fessenkowschen Aufzählung die Punkte anführen, die schon vor Jahren R. S. Dietz (1946) für die Meteoritenhypothese zusammenstellte.

Experimentell erzeugter „Strahlenkrater". Nach P. F. Sabanějew



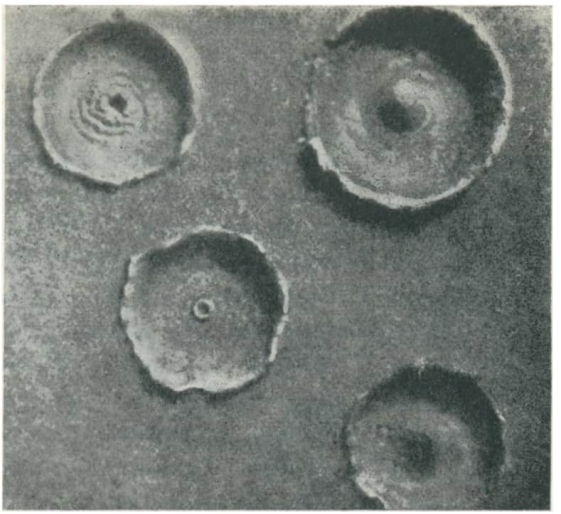
Hiernach unterscheiden sich die Mondkrater von den Calderen durch folgende hervorstechende Eigenschaften:

1. Die Böden der Mondkrater liegen allgemein unter dem Niveau der Umgebung.
2. Das Gesamtvolumen des in die Wälle verlegten Materials scheint gleich dem Volumen der Kratervertiefung (Schrötersche Regel) zu sein.
3. Auf dem Monde ist kein Krater bekannt, aus dem sich jemals Lava ergossen hätte.
4. Auf dem Monde finden wir keine Krater auf den Gipfeln von Bergen oder auf anderen physiographischen Erhebungen (dieser Punkt scheint aber durch die bereits erwähnte Entdeckung von Moore und Wilkins widerlegt; siehe Seite 210).
5. Mondkrater haben immer ganz regelmäßig entwickelte Wälle.
6. Für Krater eines bestimmten Typus gelten mehr oder weniger konstante Verhältnisse zwischen der Tiefe und der Breite (Baldwinsche Kurve).
7. Die Wälle von Mondkratern sind selten unterbrochen.
8. Ihr Aussehen beweist, daß sie plötzlich und in ihrer endgültigen Form entstanden sind.

Die Meteoritenhypothese hat auch ihre reiche „Experimentalgeschichte" (siehe Abbildung auf Seite 231ff). Alle Versuche, die in den letzten Jahren gemacht wurden, beweisen im wesentlichen, was schon Baldwin über die Mondkrater gesagt hat, nämlich, daß die Mondkrater eine auffallende Ähnlichkeit mit allen im Ergebnis von Explosionen entstandenen Kratern besitzen.

Für die Entstehung der Mondkrater, besonders der Ringgebirge, durch Explosion zeugen nach der Meteoritenhypothese auch die hellen Streifen und Strahlen, die nach dieser Hypothese Gesteinsschotter sein sollen, der bei der Explosion in die Umgebung des Kraters hinausgeschleudert wurde.

In letzter Zeit widmete sich H. C. Urey (1952, 1956) erneut dem Studium der Strahlen. Er meint, daß die Strahlen des Tycho, Kopernikus, Kepler und anderer ähnlicher Krater Staub seien, der



Krater, auf einer Stahlplatte durch Geschosse hervorgerufen, die in der Mitte eine kleine Höhlung hatten

bei der Eruption, die den Einfall eines riesigen Meteoriten begleitete, in die Umgebung geschleudert wurde.

Die Anhänger der Meteoritenhypothese schrieben von Anfang an dem Einfall großer Meteoriten auf die Mondoberfläche auch die Entstehung der bekannten runden Mondmeere zu, die nach ihrer Ansicht nur Sonderfälle riesiger Aufsturzkrater sind.

Abschließend erwägt Urey noch die Möglichkeit einer zeitlichen Datierung der Entstehung der Meere und Krater auf dem Monde und auch die Möglichkeit, die Meteoritenhypothese mit den gegenwärtigen kosmogonischen Vorstellungen in Übereinstimmung zu bringen.

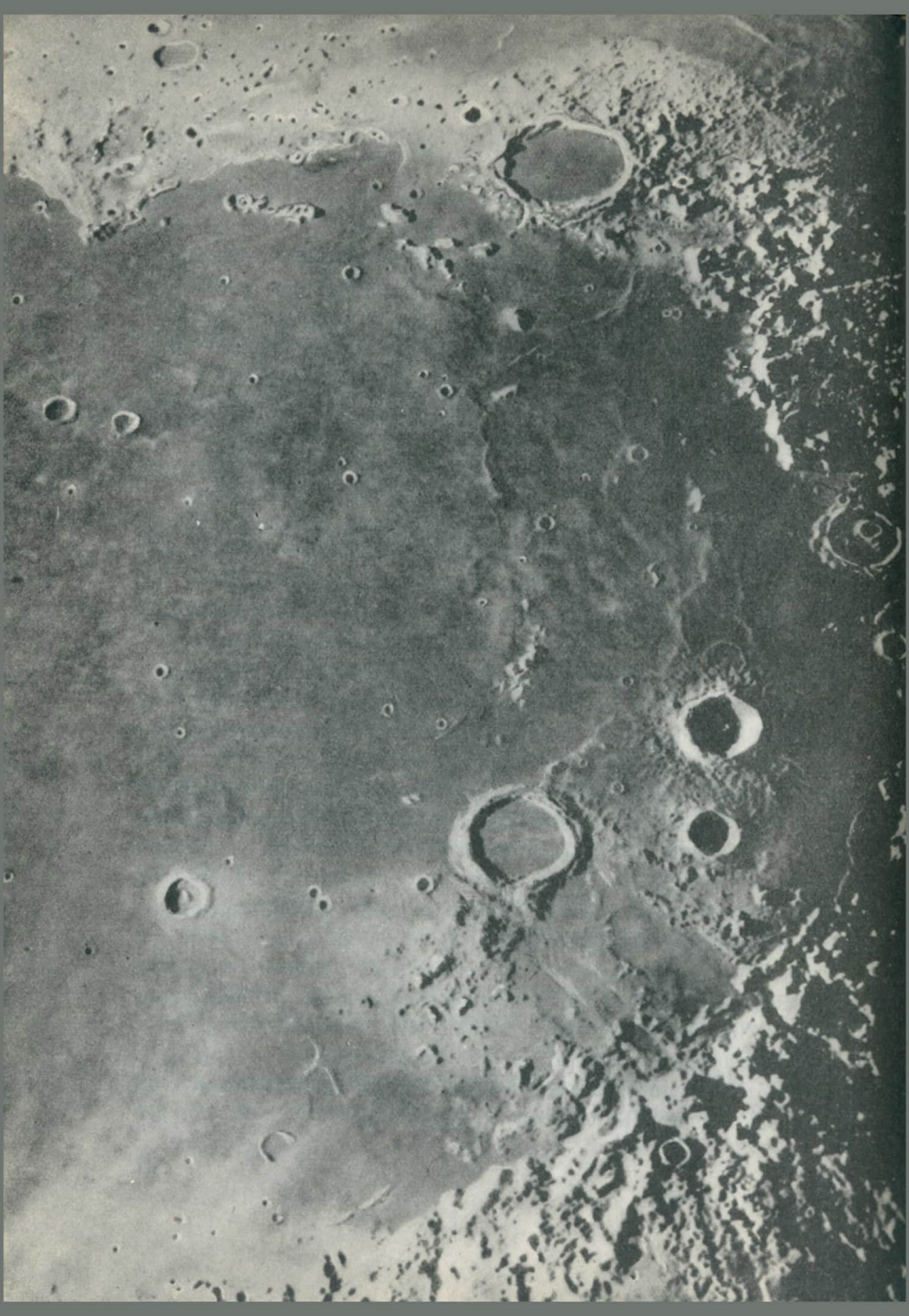
Aus den verschiedensten Überlegungen ergibt sich, daß sich der größte Teil der Oberflächenformationen auf dem Monde offenbar sehr rasch herausbildete. Die Strahlenkrater vom Typus der Krater Tycho und zahlreiche kleine Krater könnten das Ergebnis von Meteoritenaufstürzen schon in geologischer Zeit sein. Die Meere

und viele andere Krater wurden im Verlaufe von etwa einer Million Jahren oder in noch kürzerer Zeit gebildet. Zwei Auslegungen sind möglich. Entweder wurden diese Bombardements von einem Schwarm kosmischer Körper verursacht, der das Sonnensystem kreuzte und wieder verschwand, oder sie waren ein Bestandteil des abschließenden Stadiums der Bildung von Erde und Mond. Wir neigen eher zu dieser zweiten Möglichkeit, meint Urey.
In letzter Zeit (1962) erbrachte G. Fielder neue Belege gegen die Hypothese, daß das Regenmeer (Mare Imbrium) auf dem Mond durch den Aufsturz eines riesigen Meteoriten entstand. Fielder stellte fest, daß zahlreiche Krater im Gebiet des Mare Vaporum und in der Umgebung des Kraters Hipparchus so deformiert sind, als hätte auf sie vom Mare Imbrium her ein bestimmter Druck gewirkt. Hierbei wurden die älteren Krater stärker deformiert als die jüngeren. Daraus geht hervor, daß das Mare Imbrium selbst nicht im Ergebnis eines plötzlichen katastrophalen Ereignisses entstand, sondern durch einen langwierigen (wahrscheinlich tektonischen) Prozeß.

Die Kompromißidee Quirings

Nach einer Hypothese des deutschen Geologen H. Quiring (1946) wirken bei der Entstehung der Mondkrater sowohl Meteoritenfall als auch vulkanische Kräfte zusammen. Seiner Ansicht nach „umgab sich der kleinere und schneller abkühlende Mond rascher mit einer festen Kruste als die Erde. Daß er nicht völlig erstarrte, sondern noch lange danach von einer (nicht sehr) starken Kruste umgeben war, zeigen die ältesten Ringkrater, die Wallebenen. Die ersten Meteorite durchschlugen noch eine Kruste von nur geringer Mächtigkeit. Das durch den Aufprall freigewordene Magma ergoß sich nun ins Innere des Meteoritenkraters und schmolz dann (teilweise) wie ein wirklicher vulkanischer Lavasee den durch den Aufprall entstandenen Ringwall. In vielen Kratern trat die Lava

mehrmals aus und hinterließ an der Innenseite des Walles Reste älterer Spiegel oder Terrassen. Die Wallebenen sind also weitgehend meteoritische Krater, die sich nachträglich mit vulkanischer Lava füllten." Quiring verneint die Existenz von vulkanischen Kratern irdischer Form und Anordnung auf dem Mond überhaupt, da sie dort schon wegen der anders gearteten tektonischen Bedingungen fehlen müssen. Nur einzelne Krater könnten vulkanisch sein, zum Beispiel Hesiodus und Birt. Viele Mondmeere, zum Beispiel das Mare Imbrium, verdanken offenbar ihre Entstehung, wie die Umrisse zeigen, ebenfalls dem Aufsturz riesiger Meteorite. Die Ringgebirge (Quiring nennt sie „Lochkrater") sind jünger als die Meere und Wallebenen, und ihre Lage an der Mondoberfläche ist ganz unregelmäßig. Allein diese Tatsache spricht entschieden gegen ihren vulkanischen Ursprung. In vielen dieser Krater scheint es überhaupt zu keinem solchen Lavadurchbruch gekommen zu sein wie in den älteren Kratern. Nach Quiring ist dies ein Beweis für das Fortschreiten der Verfestigung der Mondkruste. Für besonders interessant muß man folgenden Gedanken Quirings halten:
Ähnlich wie auf der Erde sind vulkanische Prozesse an Bruchlinien gebunden, das heißt an Orte geringsten Widerstandes in der Erdkruste (Schwächezonen). Auch auf dem Monde konnte im Ergebnis starker Aufschläge beim Meteoritenfall die Kruste bersten, so daß sich der bis dorthin auf das flüssige Magma unter der Oberfläche wirkende Druck verringerte. Dadurch wurden notwendigerweise Gase frei, und Magma trat an die Oberfläche aus; es entstand eine vulkanische Tätigkeit.
Die hellen Strahlen und Streifen auf dem Mond hält Quiring für „Bimssteinstaub", der bei der Entstehung der Ringgebirge in die Umgebung geschleudert wurde. Auch in der Umgebung einiger irdischer meteoritischer Krater finden wir glasartige Stoffe, so zum Beispiel in der Umgebung der arabischen meteoritischen Krater häufig das besondere „natürliche Glas", das sogenannte Lechatelierit, das durch Schmelzen und erneutes schnelles Erstarren von Silikatgesteinen gebildet wurde, welche bei der Explosion des



Meteoriten von der Glut erfaßt wurden. Quiring meint, daß die auf der Erde gefundenen Tektite oder meteoritischen Gläser (Moldawite, Billitonite, Australite u. a.), welche für eine bestimmte Art von Meteoriten gehalten werden, die zu Beginn des Quartärs auf die Erde stürzten, Verwandte der Lechatelieriten sind und durch Umschmelzen von Mondgesteinen bei meteoritischen Aufstürzen entstanden. Quiring äußert geradezu die Meinung, daß die Tektite aus jungen Strahlenkratern herausgeschleudert wurden, vielleicht aus den Kratern Tycho oder Furnerius. Diesen übrigens recht alten Gedanken verteidigt in neuerer Zeit H. H. Nininger (1943). Eine gewisse Unterstützung erhielt diese Ansicht dadurch, daß in einigen irdischen Tektiten kleine Spuren von Eisen und Nickel gefunden wurden. Einige Meteoritenforscher, in der ČSSR zum Beispiel R. Šimon, verneinen aber diesen Gedanken und weisen darauf hin, daß die irdischen Lechatelieriten in ihrer Zusammensetzung den Tektiten überhaupt nicht entsprechen. Z. Kopal äußerte kürzlich die Ansicht, daß die Tektite irdischen Ursprungs sind und aus dem Aufstürzen großer Meteorite (Kometenkerne) stammen. Demnach müßte man in der Nähe heutiger Fundorte von Tektiten fossile meteoritische Krater finden.

Die irdische Herkunft der Tektite ist jedoch nach W. D. Ehmann (1957) vor allem mit ihrer chemischen Zusammensetzung nicht vereinbar. Ehmann stellte zum Beispiel in den Tektiten die Anwesenheit der radioaktiven Isotope Al-26 und Be-10 fest, die durch die Einwirkung der kosmischen Strahlen im außerirdischen Raum entstehen. Auch N. I. Friedmann (1958) kommt auf der Grundlage der Messung des Wassergehaltes der Tektite zu dem Schluß, daß auf der Erde ein Prozeß, der zur Entstehung von so vielem wasserfreien Glas führen könnte, wie es die Tektite darstellen, völlig undenkbar ist. Auch der konstante Gehalt von Kalium und Rubidium, die von W. H. Pinson, F. L. Herzog, H. W. Fairbairn und R. F. Cormier (1958) in Tektiten nachgewiesen wurden, ist mit der These von

◀ Der westliche Teil des Mare Imbrium

der irdischen Entstehung dieser Mineralien nicht vereinbar. Für die außerirdische Herkunft der Tektite zeugt schließlich auch ihr physisches Aussehen, das erkennen läßt, daß die Tektite bei ihrem Flug durch die irdische Atmosphäre offenbar einen Zustand sekundären Schmelzens durchliefen. Nach F. L. Whipple und J. S. Rinehart entstanden die Tektite auf ähnliche Weise wie die irdischen meteoritischen Gläser. Bei der Explosion, die den Aufprall eines großen Meteoriten auf die Mondoberfläche begleitete, entstand ein Krater; gleichzeitig wurde eine große Menge umgeformten Gesteinsmaterials ausgestoßen, das die Gestalt eines großen umgekehrten Kegels hatte, der mit seiner Spitze im Zentrum der Explosion ruhte. Sein Zentrum enthielt hauptsächlich Gase und nach der Außenseite fortschreitend größere Teilchen (Partikeln) der Gesteine, die durch die hohe Temperatur in Tröpfchen verwandelt wurden. Der Strom dieser Teilchen befand sich innerhalb eines konischen Kegelmantels von verhältnismäßig kleinem Öffnungswinkel, verwandelte sich beim Eindringen in den umliegenden kosmischen Raum in einen Schwarm von Tektiten und konnte bei geeigneter Geschwindigkeit und Richtung teilweise auch unseren Planeten erreichen. Mathematisch unterstützte diese Theorie C. M. Warsawsky (1958), der mit Hilfe moderner Rechenmaschinen verschiedene Varianten der Bahnen der von der Mondoberfläche ausgestoßenen Massen berechnete und zu dem Ergebnis kam, daß der beschriebene Prozeß möglich ist. Die Teilchen, die die Sphäre der Mondanziehung (Entfernung etwa 66000 km von der Mondmitte) mit der sehr kleinen Geschwindigkeit von $< 0{,}2$ km/s verlassen, erreichen die Erde nicht; aber schon bei einer geringen Vergrößerung ihrer Geschwindigkeit steigt die Wahrscheinlichkeit zur Erreichung der Erde schnell. Wenn jedoch ihre Geschwindigkeit 0,7 km/s übersteigt (was einer Ausstoßgeschwindigkeit von 3 km/s entspricht), beginnt die Zahl derer, die die Erde erreichen, wieder rasch zu sinken. Warsawsky nahm als Ausgangspunkt (Ort der Explosion) eine Stelle an, die in der Nähe des südlichen und südwestlichen Mondrandes liegt, als Ausgangsgeschwindigkeit 2,5 km/s

und erhielt für die Erde ein Einfallsfeld der Bruchstücke, das mit seiner Form stark an die Lage der Fundstellen der Tektite in Australien erinnert. Die Hypothese von der lunaren Herkunft der Tektite äußerte als erster H. H. Nininger (1943, 1947).

Von einem möglichen Zusammenhang früherer Meteoritenaufstürze und der Entstehung vulkanischer Tätigkeit auf dem Monde ist auch D. Alter (1957) überzeugt. Auf der Grundlage einer eingehenden Analyse der Oberflächenformationen des Mondes kommt er zu folgenden Schlüssen:

1. Beinahe alle kleinen Krater (Gruben) in der Nähe großer Explosivkrater sind vulkanischen Ursprungs.
2. Ihre Entstehung scheint das Ergebnis dieser Explosionen zu sein. Die Explosionen, die zur Bildung großer Krater führten, wurden wahrscheinlich durch Aufstürze hervorgerufen.
3. Kratergruben bildeten sich in vielen Fällen entlang von Störungslinien (faults) in der Mondkruste.
4. Kratergruben, die sich an Rändern von Kratern und Wallebenen befinden, sind vulkanischen Ursprungs, und ihre Anwesenheit zeigt uns, daß an diesen Stellen des Mondes in den Oberflächengesteinen zahlreiche Störungen (Brüche) existieren.
5. Die gemischten Linien von Gruben und Domen zeugen von gemeinsamer Entstehung dieser Formationen.
6. Dome sind wahrscheinlich Blasen, die durch den inneren Druck von Gasen und Dämpfen entstanden sind.
7. Zahlreiche isolierte Krater in den Meeren sind ebenfalls vulkanischen Ursprungs.
8. Die typischen isolierten runden Krater in den Meeren entstanden durch Zerstörung (Einstürzen und Bersten) der Dome.
9. Isolierte Krater, um die sich bei Vollmond ein heller, strahlenartiger (starlike) Saum zeigt, sind wahrscheinlich meteoritischen Ursprungs.
10. Isolierte Krater, die einen weniger auffallenden hellen Saum aufweisen, wurden wahrscheinlich von Meteoriten gebildet, die sich mit geringerer Geschwindigkeit bewegten.

11. Viele Rillen oder Täler weisen kleine vulkanische Krater auf. Nach der Meinung des Autors dieses Buches könnte man auch zahlreiche Zentralberge im Inneren der Mondkrater für vulkanische Formationen halten. Der mächtige Ausbruch, der den Einfall großer Meteoriten begleitete, könnte nämlich die Struktur der oberflächlichen Mondkruste so stark stören, daß eine Verbindung der Mondoberfläche mit seinem Inneren ermöglicht wird, die zur Entstehung einer nachfolgenden vulkanischen Tätigkeit führt, die noch lange nach der Entstehung des Kraters selbst nachwirkt.

Von Bülows Hypothese

Eine ganz neue Erklärung der Oberflächenformationen auf dem Monde gab in neuerer Zeit der deutsche Geologe K. von Bülow. Er verwirft sowohl die vulkanische als auch die meteoritische Hypothese und vertritt die Ansicht, daß „die Morphologie der Mondoberfläche zum überwiegenden Teil einer Urkruste angehört und die vulkanischen Erscheinungen – im irdischen Sinne des Wortes – hier sehr selten sind". Seiner Ansicht nach unterscheidet sich der „Mondvulkanismus" von dem irdischen vor allem dadurch, daß er von der Erstarrung der Mondkruste hervorgerufen wird und sich hauptsächlich durch allmähliche Entgasung bemerkbar macht, während der irdische Vulkanismus aus einem Zusammenspiel zwischen Magma und sedimentärer Hülle resultiert. Nach von Bülow erinnert die Mondoberfläche mit ihren Formationen an die Oberfläche einer erstarrenden Schmelzmasse, auf der sich, wie schon P. Fuchs (1909) zeigte, ähnliche Formationen bilden. Der Mond bewahrte sich sein Aussehen aus der Zeit der endgültigen Erstarrung seiner Oberfläche, aus der sogenannten magmatotektonischen Phase. Die Kontinente und Meere auf dem Monde entsprechen dem irdischen Sial und Sima. Auf der Mondoberfläche kann man ebenso konzentrische kesselartige Einbrüche wie einseitig stufenförmige Einbrüche (Lange Wand) finden. Genetisch unsicher sind die oft

von Reihen von Kratern begleiteten Rillen und weiterhin die Gräben (Täler). Nach von Bülow sind diese Krater Explosionstrichter; die Rillen könnten Spuren „horizontaler Gasstöße" und die Gräben Nähte zwischen den einzelnen Bestandteilen der Mondkruste sein. Die Adern in den Meeren hält von Bülow für Lava-Ergüsse, die sich entlang von Spalten abspielten (Spaltenergüsse) und die man hinsichtlich ihrer Entstehung zum Beispiel mit der bekannten Stufe auf dem Boden des Atlantischen Ozeans vergleichen kann. Die Meere waren ursprünglich Bruchkessel, die später von dunklem Magma ausgefüllt wurden. Die das Meer durchziehenden Spalten waren nach von Bülow bis zur Endphase der Erstarrung tätig. Zum Unterschied von anderen Autoren verneint von Bülow die Ansicht, daß die tektonischen Linien auf dem Monde überwiegend die Richtungen NW, NO und S einhalten. Dieses gilt vielleicht nur für bestimmte größere Areale. Er meint, daß die Spalten (Brüche) größtenteils parallel oder konzentrisch zu nahen Meeren verlaufen. In den Kontinenten sieht von Bülow „dreieckige tektonische Einheiten, die an die dreieckige Form der südlichen Teile irdischer Kontinente erinnern". Der Mond als Ganzes, so meint von Bülow, setzt sich aus kleineren, kreisförmigen oder polygonalen Elementen zusammen, deren Größe etwa 1000 $\pm$ 50% km beträgt und die sich ohne bestimmten Plan gruppieren. Man kann sie für Stellen halten, an denen die aufsteigenden Magmaströme einst die Oberfläche des Mondes erreichten. An diesen Stellen entstanden später durch Erstarren des Magmas Festlandschollen, während sich an den Stellen der absteigenden Ströme Meere bildeten. An der Grenze der aufsteigenden und absteigenden Ströme des Magmas entstanden Bruchkessel. Die erhaltene ursprüngliche Mondkruste sieht wie ein netzartig geteilter Querschnitt durch ein System überwiegend vertikaler (aufsteigender) Konvexströme aus. Wenn wir unsere Erde ihrer sedimentären Hülle entledigen könnten, so führt von Bülow weiter aus, so fänden wir, daß ihre vorsedimentäre Kruste in ähnlicher Weise in runde oder polygonale Felder unterteilt ist. Die Zeichen der Tektonik dieser tiefen Erdkruste kann man heute im uralten kristal-

linischen Kern Afrikas, Südamerikas u. a. aufspüren. Es entsprechen ihr zum Beispiel auch die heutigen Ränder der Kontinente, die Grabenlandschaften, die Gürtel des geringsten Widerstandes usw. Die Existenz einer Tiefenströmung, besonders einer Konvexströmung unter der äußeren Erdkruste, halten die Geophysiker und Astrophysiker für sicher. Ihre Wichtigkeit nicht nur für die Urtektonik, sondern auch für die spätere Tektonik auf der Erde begründete E. Kraus (1955). Die Entstehung der Ströme im glühenden Magma unter der Oberfläche kann man auch an Modellen studieren. Kraus operiert mit einer Geschwindigkeit dieser Strömung von jährlich etwa 1 cm, aber aus Versuchen und Berechnungen H. Havemanns (1955) und von Bülows ergibt sich eine bedeutend größere Geschwindigkeit, etwa 1 m je Jahr.

Die allmähliche Entwicklung der Mondoberfläche stellt sich von Bülow etwa so vor: In der ersten Phase der Abkühlung der Oberfläche des Mondes bildeten sich an den Stellen der aufsteigenden Magmaströme die ersten kontinentalen Schollen, die sich wegen der ursprünglich breitenabhängigen Rotation[1] des Mondes allmählich auf die beiden Mondpole zu verschoben, wo sie größere Einheiten (Krustenblöcke) bildeten. Zur rascheren Formung der Krustenblöcke in den Polargegenden des Mondes, das heißt zu ihrem schnelleren Erkalten und zur Vergrößerung ihrer Mächtigkeit, trug auch der Umstand bei, daß die den Polen näher liegenden Stellen der Mondoberfläche relativ kälter als der Mondäquator sind, da sie von der Sonne weniger erwärmt werden. Während sich die Kontinentalschollen weiter konsolidierten, dauerte in ihren Grenzgebieten, wo die Kruste schwächer war, die oberflächliche magmatische Tätigkeit (Herausbildung von Kratern) an. Demgegenüber setzte sich im Gürtel der Meere zwischen den beiden polaren Kontinentaleinheiten die ruhige Entgasung fort. Bei den Kontinenten, wo nicht nur die aufsteigenden Magmaströme wirkten, sondern auch die

[1] Rotation, bei der die dem Äquator näher liegenden Stellen schneller, die vom Äquator entfernt liegenden langsamer rotieren; die breitenabhängige Rotation kann man auch heute noch zum Beispiel am Planeten Jupiter beobachten.

Spannung der sich häufenden Gase, führte diese Spannung schließlich zur Zerreißung der Kruste und zur Entstehung explosiver Gaskrater.

Die Entstehung der heutigen Mondmeere stellt sich von Bülow so vor, daß es an der Grenze zwischen den Kontinenten und dem damaligen Meeresgürtel zu umfänglichen Einbrüchen der Mondkruste und zum Erguß von Lava auf die benachbarten eingebrochenen Teile der Kontinente kam. Die ursprünglich kesselartigen Becken der Mondmeere nehmen allerdings im überwiegenden Teil der Fälle eine größere Fläche ein, als sie die heutigen Meere, das heißt die entsprechenden Lava-(Magma-)Decken darstellen. So reicht zum Beispiel der Kessel des Mare Nectaris mindestens bis zum Altaigebirge, und ebenso wurde der Kessel des Mare Humorum nur in seinem tiefsten Teil vom einfließenden Magma erfüllt; demgegenüber wurde der ursprüngliche Kessel des Mare Imbrium fast völlig von Magma bedeckt. Von Bülow hält also die Mondmeere für tektonisch bedingte Formationen, riesige Bruchkessel, deren tiefste Teile von Magma bedeckt wurden, das konzentrischen Spalten inmitten der Einbrüche entquoll. Den Verlauf dieser früheren Spalten kennzeichnen an der Oberfläche der heutigen Mondmeere die bereits erwähnten Adern oder Runzeln. Aus ihnen kann man nach von Bülow auch auf die Mächtigkeit der Magmaschichten schließen; sie ist relativ gering, wo die Runzeln markant sind, relativ groß, wo die Runzeln schwächer wurden oder ausblieben. Als die Mondkruste eine bestimmte Dicke erreichte, hörte die Ausbildung von Kratern auf. Nur hier und da entstanden vereinzelte Krater vom Typ des Kraters Kopernikus, die schon zu den Erscheinungen richtigen akkumulativen Vulkanismus gehören und durch die die letzten Reste von Gasen entwichen. Nach von Bülow unterschied sich die unter planetaren Bedingungen aus erstarrtem Magma entstandene ursprüngliche Erdkruste in ihrem Aussehen nicht sehr von der Mondoberfläche. Die heutigen Unterschiede in der Morphologie der irdischen und lunaren Oberfläche sind seiner Meinung nach sekundärer Art und entspringen vor allem den unterschiedlichen physikalischen

Bedingungen auf diesen beiden Körpern. Wenn unsere Erde keine Atmosphäre hätte, wäre sie schon lange – ähnlich wie der Mond – geologisch inaktiv geworden. Sie böte heute den Eindruck eines toten Körpers. Da dem nicht so ist, finden auf der Erde weiterhin Umformungen der Kruste statt (Orogenese, Geosynklinalen, Tiefseerinnen). Nach von Bülow kann man noch heute in der sedimentären Decke der Erde ihre frühere selenoide Urtektonik aufspüren. Und wenn der ursprünglich selenoide Charakter der Erdkruste durch die Folgen der fortschreitenden Entwicklung vernichtet wurde, blieb sein grundlegender Bauplan doch erhalten und beeinflußte oder beherrschte sogar die ganze irdische Tektonik. Von Bülow kehrt damit zu dem schon im Jahre 1909 geäußerten Gedanken des Wiener Geologen E. Suess zurück, der die Mondkrater mit den explosiven Vulkantrichtern Südafrikas (Pipes) vergleicht und schreibt: „...Bei so großer Übereinstimmung drängt sich die Frage auf, ob die irdischen Sedimente nicht irgendeinen Unterbau verhüllen, welcher nach Art der lunaren Oberfläche sich im Laufe der Zeiten gebildet und alle irdische Tektonik beeinflußt oder gar beherrscht hat..."

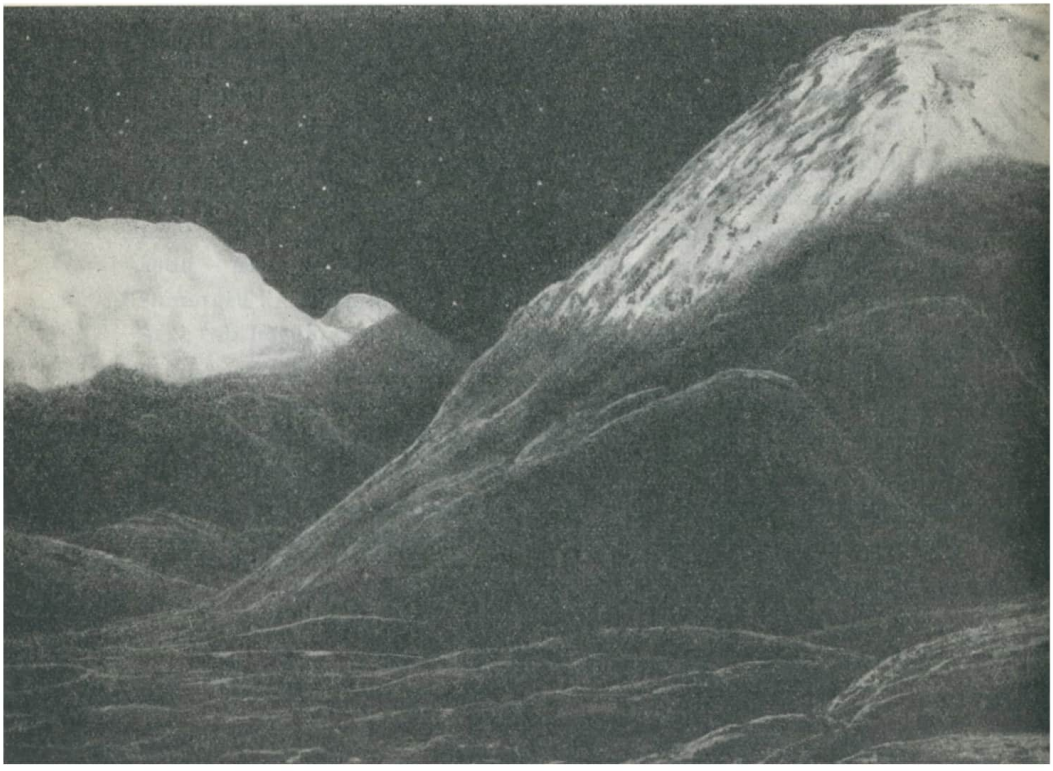
Vor der Landung auf dem Monde

Es ist erst zwei- oder zweieinhalbtausend Jahre her, seit sich der Mensch beim Anblick des geheimnisvollen Mondantlitzes vergegenwärtigte, daß er einer anderen Welt gegenübersteht. Von ihrer tatsächlichen Gestalt, Größe und Entfernung machten sich die kommenden Jahrhunderte immer genauere Vorstellungen. Beim Durchlesen der vorangegangenen Kapitel könnte es scheinen, daß wir heute in dieser Beziehung am Gipfel unseres Wissens stehen und daß wir höchstens mit mitleidigem Lächeln auf die Erwägungen eines Anaxagoras, Aristoteles, auf die ersten teleskopischen Beobachtungen Galileis, auf die erste Mondkarte Rheitas, Langrenus und Hevelius' und auf die ersten Temperaturmessungen der Mondoberfläche durch Rosse herabsehen können. Es entspricht zwar der Wahrheit, daß wir heute bedeutend weiter sind, aber die modernen wissenschaftlichen Beobachtungsmethoden, die uns Tag für Tag neue Entdeckungen bescheren, bringen uns damit auch neue Probleme. Unser Horizont weitet sich mit Hilfe moderner Fernrohre, der Photographie, der Spektralanalyse, photometrischer, polarimetrischer und kolorimetrischer Messungen ununterbrochen, aber mit der Zunahme der Erkenntnisse wird das „erforschte Terrain" immer unübersichtlicher. Wir stellen fest, daß wir eigentlich vom Mond sehr wenig wissen, auch wenn uns – absolut gesehen – über ihn zweifellos viel mehr bekannt ist als J. H. Schröter, C. Flammarion oder einigen anderen Selenographen und Selenologen des vergangenen Jahrhunderts.

Von diesem Gesichtspunkt aus muß man auch die gegenwärtigen Versuche zur Erreichung des Mondes mit Hilfe von Raketen beurteilen, von denen wir am Ende unseres Buches noch sprechen werden. Die ersten Raketenflüge zum Mond bringen uns nicht nur eine Ergänzung und Vervollständigung unserer gegenwärtigen Kenntnisse

über unseren nächsten kosmischen Nachbarn, sondern auch die grundsätzliche Klärung zahlreicher Fragen, auf die wir vorläufig nicht ganz sicher antworten können. Das ist zum Beispiel die Frage nach der Zusammensetzung der Mondoberfläche, worüber wir nur sehr wenig oder beinahe nichts wissen, die Frage, ob die Mondoberfläche mit Staub bedeckt ist, aus porösen Gesteinen besteht oder ob sie sich völlig von allen heutigen Vorstellungen unterscheidet. Auch die Entstehung der Oberflächenformationen und viele andere bis jetzt nicht völlig oder noch gar nicht geklärte Probleme werden dann gelöst werden. Wenn das erste weitreichende Raketenlabor zur Mondoberfläche gelangt und die irdischen Selenologen auf ihren Bildschirmen nach Belieben über die Oberfläche unseres natürlichen Trabanten „reisen", wird eine Reihe der bis jetzt das geheimnisvolle Gesicht des Mondes verhüllenden Schleier fallen. Dann wird dieses Buch nur ein historisches Dokument darüber sein, welche

In den Polargegenden des Mondes sind hohe Bergrücken ständiger Sonnenbestrahlung ausgesetzt. Darstellung nach L. Rudaux



Vorstellungen die Selenologen der Mitte des 20. Jahrhunderts über den damals noch unerreichten Mond hatten.
Eine Reihe von Problemen wird damit gelöst werden. Es werden sich aber neue, bis dahin ungeahnte Fragen ergeben. Mit der Erforschung des Mondes werden sich nicht mehr nur Astronomen und Astrophysiker beschäftigen; die Untersuchung der Mondoberfläche übernehmen Kosmonauten, Geodäten, Geologen, Physiker, Mineralogen und vielleicht sogar Biologen. Die Selenologen rechnen sich aber vorläufig noch zu den Astronomen, und obwohl sich vor ihnen schon eine neue Ära der Mondforschung auftut, in der die bisherigen Methoden der Erforschung dieses Körpers durch direkte Terrainerforschung ergänzt werden, können sie nicht die Hände in den Schoß legen und abwarten, bis diese Zeit herangekommen ist. Die Wissenschaft muß sich zwangsläufig ununterbrochen mit der Lösung aller Fragen beschäftigen und sie schon mit Hilfe der Mittel zu lösen versuchen, die sie gerade zur Hand hat. So schreitet die Erforschung des Mondes voran.

Veränderungen auf dem Monde

Zu den aktuellsten Problemen der gegenwärtigen Mondforschung gehört neben den Fragen nach der Zusammensetzung und Beschaffenheit der Mondoberfläche und der Entstehung der Oberflächenformationen auch die Frage, ob es auf dem Monde in der Gegenwart zu irgendwelchen Veränderungen größeren Umfanges kommt, die man mit gegenwärtigen Mitteln erkennen und verfolgen kann.
Diese Frage ist übrigens sehr alt. So erwog zum Beispiel schon W. Herschel Möglichkeiten vulkanischer Ausbrüche auf dem Monde. Aber später zeigte sich, daß auch alle Erscheinungen einer andauernden vulkanischen Tätigkeit auf dem Mond nur scheinbar waren und daß es sich nur um vermeintliche Veränderungen handelte, die durch die Libration oder die trügerischen Veränderungen

der Schatten auf dem Mond hervorgerufen wurden, die im Laufe einer Lunation und manchmal auch schon in wenigen Stunden den Anblick bestimmter Mondgegenden bis zur Unkenntlichkeit „verändern" können.

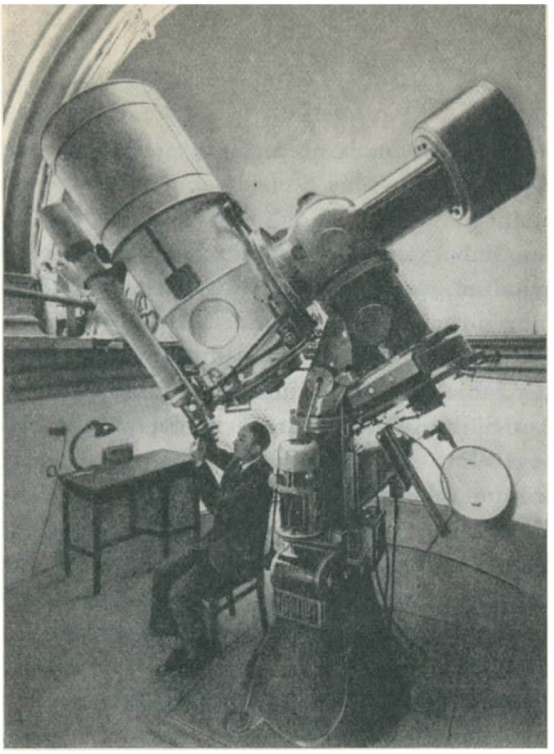
Eine der ältesten Nachrichten über Veränderungen auf dem Monde ist die Beobachtung von Kunowsky im Jahre 1825 über das Verschwinden des Kraters Alhazen, der noch nach 126 Jahren die Ursache von Streit und Meinungsverschiedenheiten war. Die kurze Geschichte dieses Falles war etwa folgende: In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts beobachtete der Selenograph J. H. Schröter aus Lilienthal sehr genau die Gegend westlich des bekannten Mare Crisium. Er entdeckte dabei einen „neuen" Krater, den er nach dem alten arabischen Gelehrten der Jahre 987 bis 1038 Abu Ali al Hasan ben al Hasein mit dem latinisierten Namen Alhazen benannte. Der Krater war nach der Beschreibung Schröters eine „runde Ebene" mit einer Breite von etwa 23 Meilen (37 km) und einem dunkelgrau gefärbten Boden. Schröter erwähnt weiterhin, daß diese Formation sehr gut sichtbar war, auch wenn sich ihr Aussehen im Laufe der Zeit etwas änderte, so daß er sie zur Bestimmung der Libration in Länge benutzte. Im Jahre 1825 gab Kunowsky bekannt, daß er den Krater an der Stelle, wo ihn Schröter einzeichnete, nicht finden konnte und daß er zweifellos verschwunden sei. Da den Krater damals auch J. H. Mädler nicht sah, der zu dieser Zeit gerade die Herausgabe seiner neuen Mondkarte vorbereitete, ergab sich eine lebhafte Diskussion. Mädler hielt sich nicht lange mit dieser Sache auf, und da er den Schröterschen Krater nicht aufzufinden vermochte, übertrug er den Namen Alhazen auf einen anderen Krater, der unter dieser Bezeichnung bis heute bekannt ist. Das aber führte zu weiteren Mißverständnissen. Denn später gaben Pastorff und K. Harding bekannt, daß sie den Schröterschen Krater erneut gesehen hatten. Sie äußerten die Vermutung, daß der Krater selbst im Laufe der Zeit bestimmten Veränderungen unterliege – wobei es noch fraglich sei, ob tatsächlichen oder nur scheinbaren – und daß er zu manchen Zeiten fast völlig unsichtbar sei. Diesen Verdacht

verstärkte bald darauf auch Köhler aus Dresden (1828), der die ganze Frage einer sehr eingehenden Analyse unterwarf und feststellte, daß der Schrötersche Krater tatsächlich mit einem auf der Beer-Mädlerschen Karte mit dem griechischen Buchstaben α bezeichneten Hügel übereinstimmt. Seine Lage betrug λ 69 °20′ und β 20 °06′. Nach Köhler handelt es sich in Wahrheit nicht um einen Krater, sondern um ein elliptisches Tal, das von einigen Hügeln umgeben und in Richtung auf das nahe Meer (Mare Crisium) an mehreren Stellen deutlich offen ist. Je nachdem, wie stark es gerade von Schatten erfüllt ist – was von der Libration des Mondes abhängt –, besitzt es entweder das Aussehen eines Ringgebirges oder verringert es seine Sichtbarkeit bis auf Null. Köhler drückt gleichzeitig damit die Überzeugung aus, daß ein gründliches und systematisches Durchforschen dieser Gegend dazu führen könnte, daß man die Sichtbarkeit dieses Kraters vorausberechnet. Beachtenswert sind auch seine folgenden Worte: „. . . bei der Benutzung stärkerer Fernrohre könnten wir in den kleinsten Einzelheiten des Mondbildes Veränderungen feststellen; aber das Erscheinen und Verschwinden ganzer Ringgebirge ist auf der Grundlage der derzeitigen Forschungen undenkbar." Etwa dreißig Jahre danach, im Jahre 1862, versuchte der englische Selenograph Birt den Schröterschen Alhazen erneut zu entdecken. Auch er fand in unmittelbarer Umgebung des Mädlerschen Gipfels α ein niedriges rundes Gebirge, das der Schröterschen Beschreibung des Alhazen entsprach. Alle diese Tatsachen konnten aber weitere Vermutungen über eine mögliche Veränderung in dieser Gegend nicht verhindern. Alle Mutmaßungen beruhten darauf, daß sich ein Beobachter irrte, indem er in einer zufälligen Gruppierung von Gebirgsformationen einen deutlichen Krater sah, und daß ein zweiter Beobachter ihn nicht finden konnte, da die Libration, also die andere Perspektive zu dieser Zeit, gerade den Anblick „veränderte". So schreibt zum Beispiel E. Neison im Jahre 1885 erneut: „Der Widerspruch zwischen der gegenwärtigen seltenen Sichtbarkeit dieses Objektes und der Beschreibung Schröters erfordert noch Erklärung, ehe man die Frage als genügend gelöst

betrachten kann." A. P. Moore und H. P. Wilkins stellten noch im Jahre 1958 bei der Beschreibung des heutigen (von Mädler so benannten) Kraters Alhazen fest: „...dieses Objekt ist nicht jenes Objekt, das Schröter Alhazen benannte. Dies scheint eine niedrig gelegene Gegend westlich des bezeichneten Gebirgsmassivs am westlichen Rande des Mare Crisium zu sein. Schröter erwähnt in seiner Beschreibung, daß es einen dunklen Boden aufweist. Es ist möglich, daß sich seine Farbe seither verändert hat."

Die Behauptung über Veränderungen des Kraters Alhazen zieht sich nicht nur durch die Fachliteratur, sondern schon seit langer Zeit auch durch zahlreiche populäre astronomische Schriften. Im Jahre 1949 fand sie sich – ohne entsprechenden Kommentar – auch in dem populären astronomischen Werk von W. G. Fessenkow „Современные представления о вселенной" (Die heutigen Vorstellungen vom Weltall).

Fessenkow erwähnt in seinem Buch, daß kürzlich das Verschwinden des Kraters Alhazen mit einem Durchmesser von 40 km im Meere der Unruhe festgestellt wurde. Das Wörtchen „kürzlich" rief viele Mißverständnisse hervor. So zum Beispiel forderte der Autor dieses Buches, der nicht sofort begriff, daß es sich um die uralte Geschichte Schröter-Kunowsky-Mädler-Köhler usw. handelte, in der damaligen Mondsektion der Tschechoslowakischen Astronomischen Gesellschaft eine neue Beobachtung und Photographie dieser Mondgegend. In dem bekannten astronomischen Observatorium in Pulkowo geriet über diese Nachricht vom Verschwinden des Alhazen wiederum A. W. Markow in Aufregung, dem es ebensowenig in den Sinn kam, daß es sich um die schon lange liquidierte Angelegenheit von Schröters Alhazen handeln könnte, denn über den Ausgang der Forschungen über diesen Fall schreibt er: „...dieser Krater liegt westlich vom Mare Crisium in der Nähe des Mondrandes und hat einen Durchmesser von 30 km. (Markow meint also tatsächlich den neuen, Mädlerschen Alhazen. Anmerkung des Autors.) Auf dem entsprechenden Blatt des Pariser Atlasses ist er deutlich als eine Ellipse mit dunklem Inneren zu sehen, aber...



Das bekannte Foto-Teleskop von Schmidt-Marksutow im Observatorium von Pulkowo in der Sowjetunion

jetzt ist er (angeblich) nicht zu sehen. Wenn der Krater tatsächlich verschwand, so wäre das die größte Veränderung auf der Mondoberfläche, die jemals festgestellt wurde... Man muß aber beachten, daß am Mondrande die Veränderungen der Libration das Bild der uns sichtbaren Oberfläche stark beeinflussen. Darum muß man jetzt verständlicherweise die Realität dieser Veränderung so lange als offenes Problem ansehen, bis eine Aufnahme der Zone des Mare Crisium bei gleicher Beleuchtung und gleicher Libration gelingt, bei der der Krater Alhazen im Jahre 1894 sehr schön photographiert wurde..."

Wir haben das in Prag schon am 10. Januar 1951 durchgeführt und erlebten die Freude, daß es uns auch gelang und das Alhazen – allerdings der Mädlersche – auf unserer Aufnahme deutlich zu

sehen ist. Damals aber ahnte noch niemand von uns, daß es sich eigentlich um das Verschwinden eines ganz „anderen" Alhazen handelt...

Ich habe mich bei diesem Vorfall deshalb ein wenig länger aufgehalten, weil ich den Leser davon überzeugen wollte, wie irreführend manchmal besonders ältere Nachrichten über Veränderungen auf dem Monde sind und wie vorsichtig man sie beurteilen muß. Ich führe hier noch einen anderen ähnlichen Fall an.

Am Südrande des Mare Frigoris, westlich vom Krater Fontenelle, liegt eine Gebirgsformation, die aus einer Reihe zerstreuter Felstrümmer besteht, offenbar den Resten einer früheren Wallebene, die in modernen Karten die Bezeichnung Bartlett trägt. Beer und Mädler und später auch Neison sahen an ihrer Stelle eine Gebirgsformation in Form eines beinahe regelmäßigen Quadrates, das den Eindruck eines künstlichen Gebildes machte und in früherer Zeit als Mädlers Square (Mädlersches Quadrat) bezeichnet würde. Im Jahre 1950 verkündete J. J. Bartlett, das Mädlersche und Neisonsche Quadrat existiere nicht mehr. In dieser Mondgegend sei es offenbar zu weitreichenden Veränderungen gekommen, die die Ursache der „Vernichtung" dieser berühmten Formation war. Bald darauf widmete sich A. P. Moore der Lösung dieses Problems. Ihm gelang der Nachweis, daß es zu keinerlei Veränderungen gekommen war, daß Mädler das künstliche Aussehen dieser Formation selbst konstruiert hatte und daß Neison das „Mädlersche Quadrat" im Jahre 1876 unkritisch in seine Karte übernahm. Das zeigte untrüglich Drapers Aufnahme des Mondes vom Jahre 1863, also 13 Jahre vor Neisons Karte. Auf ihr ist das Mädlersche Quadrat ebenfalls nicht zu sehen. Das „Rätsel" des Mädlerschen Quadrats bleibt aber trotzdem ungelöst, denn einige Forscher verweisen mit Recht darauf, daß Neison das Mädlersche Quadrat zwar irrtümlich in seine Karte übernommen habe, diese Formation sich aber tatsächlich seit der Zeit Mädlers verändert haben konnte. In dieses ganze Problem brachte ein neuer Fund plötzlich Licht. Im Nachlaß Schröters fand man eine bis dahin unbekannte Zeichnung dieser

Mondgegend, die schon im Jahre 1809 angefertigt worden war und das „Quadrat" genau in seiner heutigen Form zeigte, in Form der unbestimmten Formation Bartletts. Es ist offenbar, daß Mädler bei der Beobachtung dieser Mondgegend einer durch das Spiel von Licht und Schatten hervorgerufenen optischen Täuschung unterlag und ihr eine vermeintlich regelmäßige Form zuschrieb.

Viel Aufmerksamkeit wurde seinerzeit auch der Frage der vermeintlichen Veränderungen des Kraters Linné im Mare Serenitatis gewidmet. Riccioli beschreibt Linné als einen deutlichen kleinen Krater am Boden des Mare Serenitatis. Schröter (1788) zeichnete diese Formation mehrmals als weißen Fleck, als Hügel und dann wieder als dunkelgrauen Fleck ein. Im Jahre 1796 konnte er ihn, wie er schreibt, nicht sehen. Lohrmann beschreibt Linné als Krater mit einem Durchmesser von etwa 7 km, der bei jeder Beleuchtung sichtbar sei. Schmidt beobachtete diesen Krater mehrfach und führt an, daß er einen Durchmesser von etwa 11 km und eine Tiefe von etwa 300 m habe; aber im Jahre 1866 gab er bekannt, daß der Krater völlig verschwunden sei und keinerlei Spur zurückgelassen habe. In den folgenden Jahren 1867 und 1868 beobachtete Schmidt an seiner Stelle nur einen weißlichen Fleck und in dessen Mitte einen hellen, flachen Hügel. Knott, Buckingham und Key beobachteten aber zu gleicher Zeit wie Schmidt inmitten von Linné keineswegs helle Flecken von Hügeln, sondern eine sehr flache, runde Depression. Auch Secchi stellte an der Stelle von Linné eine leichte Depression fest, nur sichtbar, wenn Linné sich in der Nähe des Terminators befand. Von dieser Zeit an war die Meinung der Beobachter über das tatsächliche Aussehen dieses Kraters geteilt, und diese Angelegenheit wird heute noch als besonders anschaulicher Fall einer andauernden Veränderung des Aussehens eines bestimmten Kraters zitiert. Schröters Zeichnungen aber sind in diesem Falle nicht richtungweisend und können es nicht sein, denn seine Wiedergabe des Mare Serenitatis wurde zu einem ganz anderen Zweck angefertigt. Sie sollte nämlich den Verlauf der hauptsächlichen hellen Streifen in dieser Gegend des Mondes festhalten, und

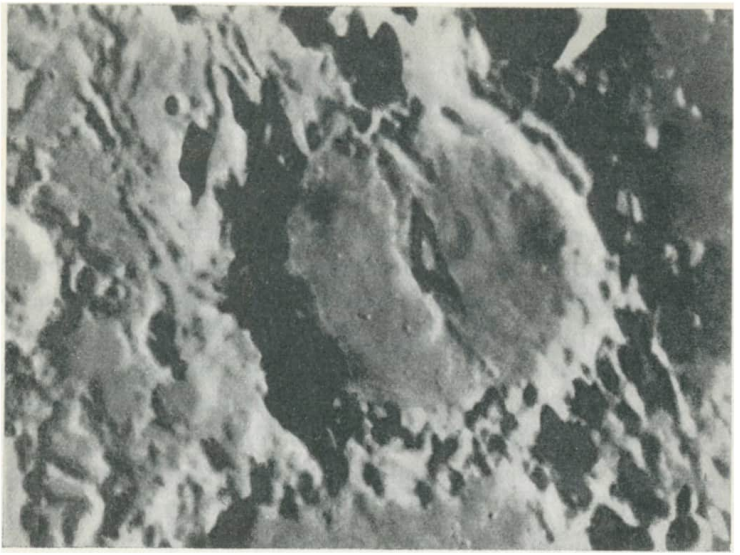
die Aufzeichnung des Kraters Linné ist auf dieser Schröterschen „Karte" ebenso wie die des benachbarten Kraters Bessel recht unvollständig. In neuester Zeit zeigten F. H. Thornton (1951) und bald darauf auch H. P. Wilkins und A. P. Moore (1958), daß Linné die Form eines niedrigen Hügels (Domes) hat, der im Inneren mit hellen Flecken besetzt ist und auf dem Gipfel einen kleinen tiefen Krater (Grube) trägt. Wilkins und Moore schreiben, daß bis zu dieser Zeit Linné eher für eine runde Depression als einen Dom gehalten wurde; aber der Autor dieses Buches konnte sich selbst mehrmals davon überzeugen, in letzter Zeit erneut am 15. April 1959 um 21.30 Uhr Weltzeit mit Hilfe des ausgezeichneten 180-mm-Zeiss-Refraktors der Volkssternwarte in Prag, daß Linné die Form eines hellen Fleckens hat, der in der Mitte eine runde Depression mit einem Durchmesser von nicht ganz 10 km aufweist. D. Alter (1958) kommt auf der Grundlage von Beobachtungen und von photographischen Aufnahmen, die in den Jahren 1957 und 1958 auf dem Mt. Wilson gewonnen worden waren, zu der Meinung, daß Linné tatsächlich eine sehr komplizierte Struktur hat und aus einem niedrigen Hügel besteht, der mit mehreren kleinen Kratern (Gruben) besetzt ist. Eine infrarote Aufnahme vom 7. Juli 1958 zeigt im Inneren von Linné deutlich eine „doppelte Kratergrube". Interessant ist, wie Alter vermerkt, daß auf der infraroten Photographie der Krater sehr gut zu sehen ist, während blaue Aufnahmen nur einen weißlichen Hügel zeigen. Im Jahre 1958 war aber der Unterschied zwischen ihnen weniger auffallend als im Jahre 1957. Auf periodische Veränderungen des Durchmessers der Linnéschen Flecken wiesen einige Beobachter schon früher hin. E. E. Barnard und nach ihm auch W. H. Pickering äußern die Meinung, daß diese Veränderungen sowohl im Verlaufe der Lunation als auch im Verlaufe von Mondfinsternissen auftreten und daß man sie für ganz real und unzweifelhaft halten müsse. Pickering glaubt auch an die Realität der von Schmidt beobachteten Veränderungen und versucht zu erhärten, daß der ursprüngliche Krater in den Jahren 1843 bis 1866 zerstört wurde, offenbar dadurch, daß er sich mit

Lava füllte und die in ihm in den Jahren 1867 bis 1868 beobachtete niedrige „Depression" im Jahre 1897 ebenfalls verschwand, so daß sich Linné in einen niedrigen Hügel verwandelte. Dieser Ansicht widersprechen allerdings die Beobachtungen in neuester Zeit. Es scheint, daß der Fall des Kraters Linné einer Reihe ähnlicher Fälle entspricht und auch hier unzureichende Beobachtungen, Kritiklosigkeit und üppige Phantasie die größte Rolle spielten. Ähnlicher Art sind auch andere Meldungen über vermeintliche Veränderungen an der Mondoberfläche. So entdeckte zum Beispiel am 19. Mai 1877 H. J. Klein in der Nähe des Kraters Hyginus – in einer „vordem vielmals detailliert studierten und gezeichneten" Gegend – einen „neuen" Krater, den er als Hyginus N bezeichnete. Auch in diesem Falle ist aber kaum nachzuweisen, daß der betreffende Krater, eher noch eine unregelmäßige Depression in diesem Terrain, nicht schon früher existierte. Man konnte ihn bloß übersehen haben. Es ist interessant, daß die Meldungen über neue größere „Veränderungen" auf dem Monde, zum Beispiel über das Verschwinden einiger kleiner Krater oder das plötzliche Auftauchen von Formationen, die zuvor nicht beobachtet worden waren, aufhörten, als seit dem Ende des vergangenen Jahrhunderts beim Studium der Mondoberfläche in immer stärkerem Maße die Photographie Verwendung fand. Das zeugt davon, daß der Großteil, wenn nicht sogar alle Veränderungen dieser Art, die von früheren Beobachtern gemeldet worden waren, auf Irrtümern oder optischen Täuschungen beruhten.

Als einzige reale Veränderung auf dem Mond kann man die zeitweise gemeldete Verschlechterung der „Sichtbarkeit" bestimmter kleiner Details an der Mondoberfläche, die beobachtete Eintrübung von Kratern und ähnliche Erscheinungen bezeichnen, die wir bereits erwähnten. Diese Erscheinungen wurden früher als zeitweiliges Ausströmen von Gasen aus den Spalten (Rillen) an der Mondoberfläche, durch vulkanische Tätigkeit usw. erklärt. In neuester Zeit wurde die Realität dieser Veränderungen unerwartet durch die überraschende Entdeckung N. A. Kosyrews bestätigt.

Die Entdeckung Kosyrews

Wie wir bereits in dem Abschnitt über die Mondatmosphäre erwähnten, stellte im Oktober 1956 D. Alter mit Hilfe einer Serie von Photographien des Kraters Alphonsus im blauen und infraroten Licht fest, daß in diesem Mondkrater sichtbare Details im blauen Licht teilweise verwischt waren. Entweder kommt es an dieser Stelle des Mondes zu zeitweiligen Gasausbrüchen, die eine gewisse vorübergehende „Atmosphäre" bilden, oder diese Erscheinung entsteht durch irgendeine besondere Struktur des Bodens dieser Wallebene, die bewirkt, daß aus dem Sonnenlicht, von dem sie beschienen wird, am stärksten gerade die blauen Strahlen zerstreut werden. Alter selbst schließt mehr auf diese zweite Möglichkeit.
Die Entdeckung Alters veranlaßte im Jahre 1958 N. A. Kosyrew, dem genannten Krater besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Deshalb begann er im Oktober und November dieses Jahres gemeinsam mit W. I. Jezerski von der Sternwarte in Charkow mit Hilfe des 50zölligen Reflektors des Observatoriums der Akademie der Wissenschaften auf der Krim seine photometrisch standardisierten Spektralaufnahmen. Kosyrew war davon überzeugt, daß die von Alter beobachtete Erscheinung eine reale Grundlage hatte und daß auch einige früher beobachtete „Trübungen" und „Vernebelungen" auf dem Monde ihren Ursprung in zeitweiliger Exhalation von Gasen hatten. Die einfache Zerstreuung des Sonnenlichtes in diesen Gasen kann aber für das genannte Verschwinden von Details nicht verantwortlich sein, denn dazu wäre an der Mondoberfläche eine Gasschicht notwendig, die etwa die gleiche Dichte hätte wie die irdische Atmosphäre, also in einer Größenordnung von 25^{25} Molekülen je Quadratzentimeter der Oberfläche. Zur Erklärung dieser beobachteten Erscheinung genügt aber die Voraussetzung, daß es in den Gasen, die aus dem Inneren des Mondes an seine Oberfläche gelangen, unter der Wirkung der ultrakurzwelligen Sonnenstrahlung zur Fluoreszenz (Lumineszenz) kommt. Kosyrew äußerte die Überzeugung, daß schon eine Gasschicht mit einer Dichte der Größen-



Der Krater Alphonsus

ordnung 10^{15} Moleküle je Quadratzentimeter, d. i. etwa 10^{-10} Atmosphären, eine so intensive Fluoreszenz aufweisen kann, daß damit die Sichtbarkeit von Oberflächendetails abgeschwächt wird. Gleichzeitig damit könnte man im Spektrum derart „vernebelter" Mondgegenden helle (Emissions-)Banden leuchtender Gase entdecken.

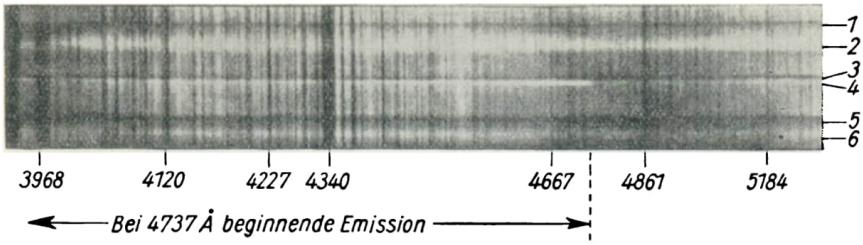
Auf den Spektrogrammen des Kraters Alphonsus, die Kosyrew und Jezerski vor dem 2. November 1958 gewannen, konnte nichts Bemerkenswertes festgestellt werden. Am 3. November um 1 Uhr Weltzeit machte Kosyrew eine neue Aufnahme. Der Schlitz des Spektrographen zog gerade über den Zentralberg des Kraters hinweg. Kosyrew, der gleichzeitig das Bild dieser Mondgegend durch ein Hilfsfernrohr beobachtete, bemerkte, daß der Zentralberg des Kraters Alphonsus sehr deutlich war. Außerdem konnte er eine außergewöhnlich rötliche Verfärbung feststellen.

Ein weiteres Spektrogramm wurde zwischen 3.00 Uhr und 3.30 Uhr

Weltzeit angefertigt. In dem Spalt des Spektrographen befand sich wieder der Zentralberg des Kraters, und Kosyrew war diesmal von dessen außergewöhnlicher Helligkeit und Weiße überrascht, die sehr stark mit seiner vorangegangenen rötlichen Verfärbung kontrastierte. Erst gegen Ende der Belichtung konstatierte Kosyrew plötzlich, daß die Helligkeit des Gipfels plötzlich abnahm und wieder ihren normalen Wert erreichte. Kosyrew selbst maß zunächst seinen visuellen Eindrücken keine besondere Bedeutung bei. Er meinte, die Veränderungen seien durch Veränderung der Qualität der Beobachtungsbedingungen hervorgerufen worden. Um so größer war seine Überraschung, als sich nach der Entwicklung des Spektrogramms zeigte, daß sich im Krater Alphonsus tatsächlich etwas Ungewöhnliches abgespielt hatte. Die erste (um 1 Uhr gewonnene) Aufnahme zeigt den Zentralberg im violetten Licht sehr matt. Es ist zu erkennen, daß es während der Belichtungszeit zu sehr starken Absorptionen im violetten Licht kam, was die Realität des von Kosyrew beobachteten rötlichen Scheins bestätigt.

Noch interessanter war die zweite Aufnahme, die deutlich das Emissionsspektrum zeigt, das sich aus einer Serie breiter Banden zusammensetzt, die über das übliche Spektrum des Zentralberges verteilt sind. Offenbar kam es während der Belichtung dieser Aufnahme in der betreffenden Mondgegend zu einem Ausstoß von Gasen, der – wie Kosyrew meint – nicht länger als 2,5 Stunden und nicht weniger als 0,5 Stunden dauerte. In der folgenden Nacht wurden zwei weitere Spektralaufnahmen dieses Kraters gemacht, aber die Bedingungen darin schienen sich bereits völlig normalisiert zu haben. Der Mond kam dann ins letzte Viertel, und dieser Abschnitt seiner Oberfläche geriet in den Schatten und entzog sich dadurch weiteren Beobachtungen.

Kosyrew erklärt die von ihm beobachtete Erscheinung so: Am 3. November 1958 morgens kam es im Krater Alphonsus zu vulkanischen Erscheinungen. Zunächst erfolgte ein Ausstoß von Staub, vulkanischer Asche, womit die beobachtete „Rötung" des Zentralberges erklärt werden kann, und gleich darauf zum Ausstoß von



Das am 3. November 1958 von N. A. Kosyrew gewonnene Spektrum des Kraters Alphonsus: 1. der außenliegende Schatten des Westwalls, 2. die beleuchtete Seite des Westwalls, 3. der Schatten des Zentralberges, 4. die beleuchtete Seite des Zentralberges (von 4737 Å nach links ist eine helle Emission zu sehen), 5. der innen liegende Schatten des Ostwalls, 6. beleuchtete äußere Seite des Ostwalls. Das ganze Spektrum muß man sich wie eine Reihe eng hintereinander aufgereihter Querschnitte vorstellen, die quer zum Krater und über den Zentralberg verlaufen

Gasen. Nachdem diese Gase der Sonnenstrahlung ausgesetzt waren, begannen sie zu leuchten, und damit entstand das beobachtete Emissionsspektrum. Kosyrew ist der Ansicht, daß diese Gase offenbar aus dem zur Mondoberfläche aufgestiegenen Magma entwichen. Es ist interessant, daß die beobachtete Emission sich nicht genau mit dem Gipfel deckte, sondern etwas abseits vom Schatten lag, also der Sonne zu. Kosyrew stellte fest, daß diese Verlagerung annähernd 0,7″ betrug (auf der Mondoberfläche 1,5 km) und erklärt sie damit, daß die kurzwellige Sonnenstrahlung nur in jene Gasschichten vordrang, die der Sonne am nächsten waren. Er meint, „daß das beobachtete Leuchten der Gase auf ähnliche Weise hervorgerufen wurde wie bei der Lumineszenz der Kometen und daß die Sonnenstrahlung die Dissoziation ursprünglich komplizierter Moleküle bewirkte, die aus Schichten unter der Oberfläche stammen. Dadurch kam es zur Entstehung optisch aktiver Radikale, die für eine Stunde das beobachtete Spektrum trübten. Diese Erscheinung kann man verständlicherweise auf der dunklen Seite des Mondes nicht beobachten.“ Dieselbe Ansicht über diese Erscheinung hatte zuvor auch schon der Autor dieses Buches geäußert (Říše hvězd, 1, 1959).

Kosyrew kommt auf der Grundlage der photometrischen Vermessung der gewonnenen Spektrogramme zu dem Schluß, daß die Ausmaße der Gasschicht nicht viel kleiner waren als die Größe des Zentralberges, dessen Höhe etwa 1,3 km beträgt. Aus der vorläufigen Analyse der Spektrallinien geht hervor, daß in den ausgestoßenen Gasen ganz bestimmte Moleküle des Kohlenstoffs C_2 anwesend waren. Aus der Anwesenheit eines Systems feiner Linien in der Gegend zwischen der Linie H δ und der Linie H des ionisierten Kalziums kann man auch auf die Anwesenheit linearer Moleküle C_3 schließen. Das erhaltene Spektrum erinnert stark an ein Kometenspektrum, bis auf die völlige Abwesenheit der ultravioletten Bande des CN-Moleküls in der Nähe von 3883 A. Die hellen Banden zwischen 4200 A und 4600 A und einige sehr feine Linien in anderen Gegenden des Spektrums konnten vorläufig nicht identifiziert werden.

Es ist möglich, so meint Kosyrew, daß „die beschriebene Beobachtung für eine bestimmte Zeit einmalig bleibt, aber die Existenz bis heute andauernder innerer Energie und die Möglichkeit orogenetischer (gebirgsbildender) Vorgänge auf dem Monde scheint bestätigt zu sein. Die Übereinstimmung zwischen der beobachteten Erscheinung und der Lage des Zentralberges kann kaum zufällig sein und zeigt an, daß das ursprüngliche Relief des Mondes eher durch innere Kräfte als durch den Einfall riesiger Meteorite bestimmt wurde. Die niedrige Wärmeleitung der oberflächlichen Schichten des Mondes ist eher durch die poröse Struktur des vulkanischen Materials als durch eine Staubschicht bedingt."

Hat Kosyrew recht? Diese Frage kann man vorläufig schwer beantworten. Vulkanische Tätigkeit auf dem Monde ist möglich, und in den vorangegangenen Abschnitten und Kapiteln haben wir Beweise dafür angeführt, daß an der Mondoberfläche auch heute noch zahlreiche Spuren früherer, recht ausgedehnter vulkanischer Tätigkeit vorhanden sind. Ein Vulkanausbruch auf dem Monde mußte notwendigerweise einen anderen Verlauf nehmen als auf der Erde. Auf dem Monde gibt es keine Atmosphäre, in der sich zum Beispiel



N. A. Kosyrew (erster von links) debattiert mit sowjetischen Astronomen über seine Entdeckung

der ausgeworfene vulkanische Staub und die vulkanische Asche über die Oberfläche in Form einer vulkanischen „Wolke" erheben könnten, wie das bei irdischen Vulkanen der Fall ist. Darum würden sie verhältnismäßig sehr rasch wieder auf die Oberfläche zurücksinken. Auch die ausgestoßenen Gase und Dämpfe müßten sich sehr bald auf die Oberfläche des Mondes verteilt haben; sie würden sich infolge der Wirkung der Sonnenstrahlen auch chemisch verändern. Ein Vulkanausbruch auf der Mondoberfläche würde zwangsläufig viel weniger auffallen als auf der Erde. Es ist möglich, daß viele vulkanische Ausbrüche auf dem Mond der Aufmerksamkeit der irdischen Beobachter entgingen oder bestenfalls als sehr unauffällige Vernebelungen oder sehr flüchtige Unklarheiten bestimmter Mondgegenden erfaßt wurden. Kosyrews Beobachtung

muß allerdings für sich allein noch nicht als Vulkanausbruch ausgelegt werden. Er spricht selbst vorsichtigerweise nicht von einer Eruption, sondern von einer vulkanischen Erscheinung. Der Begriff „vulkanische Tätigkeit" ist nämlich – wie wir schon früher gesehen haben – sehr breit, und es ist möglich, daß es sich bei der im Krater Alphonsus beobachteten Erscheinung nicht um ein besonders hervorragendes vulkanisches Ereignis handelt, sondern nur um einen plötzlichen Gasausstoß, ein „Abblasen" des Gasinhaltes irgendwelcher Hohlräume unterhalb der Oberfläche, das nicht mit Lava-Erguß oder dem Auswurf großer Mengen von vulkanischem Bruch- und Staubmaterial verbunden sein muß. Aus diesem bisher einzigen beobachteten Fall grundlegende Argumente gegen die Meteoritenhypothese zu finden, ist auch nicht sehr gut möglich; denn selbst die Vertreter dieser Meinung lassen ja auch die Möglichkeit vulkanischer Vorgänge auf dem Mond zu, unabhängig zum Beispiel von der erwähnten „Kompromiß"-Hypothese Quirings und Alters (siehe Seite 236f.). So kann ein eventueller Beweis einer umfangreicheren vulkanischen Tätigkeit auf dem Monde diese Hypothese zwar teilweise abschwächen, aber keineswegs widerlegen. Auf jeden Fall ist diese Beobachtung sehr wertvoll. Sie zeigt uns den Mond von einer etwas anderen Seite, als wir ihn bisher immer anzusehen gewohnt waren. Er ist also keineswegs ein seit langem erkalteter kosmischer Körper, dessen „Schicksal" es ist, nur noch auf sein unbekanntes Ende zu warten, sondern ein kosmischer Körper, auf dem, ebenso wie auf der Erde, „Leben" pulsiert, auf dem sich „etwas" abspielt.

Die Forscher waren bisher geteilter Meinung darüber, ob auf dem Monde in der gegenwärtigen Zeit eine ausgedehntere vulkanische Tätigkeit möglich ist und ob sie dort überhaupt jemals möglich war. Kosyrews Entdeckung wird sicherlich zahlreiche Forscher veranlassen, in dieser Hinsicht ihre Ansicht grundsätzlich zu revidieren.

So meint zum Beispiel R. S. Dietz (1946), daß „es auf dem Mond keine Spur von Batholithen, Lakkolithen und ähnlichen intrusiven magmatischen Körpern gibt. Auf dem Monde gibt es auch keine

irdischen Geosynklinalen, Geantiklinalen und Gebirgsketten, was alles dafür spricht, daß Vulkanismus irdischen Typs auf dem Mond nicht möglich ist. Obwohl die Abwesenheit einer Hydrosphäre (Wasserhülle) auf dem Mond die Möglichkeit des Vulkanismus nicht völlig ausschließt, ist das Fehlen des Wassers, das den primären Explosionsfaktor des irdischen Vulkanismus, der Entstehung vulkanischer Tätigkeit bildet, sehr ungünstig. Das Studium der Planeten des Sonnensystems weist darauf hin, daß sich die Mächtigkeit der Oberflächenkruste von Himmelskörpern offenbar umgekehrt proportional zu ihrer Masse verhält. Daraus kann man schließen, daß unser Mond im Hinblick auf seine kleine Masse und sein geringes spezifisches Gewicht eine besonders starke Kruste besitzt, die nicht so sehr wie die Erdkruste plastischen Deformationen unterliegt. Der Druck im Mondmittelpunkt ist etwa so stark wie auf der Erde in einer Tiefe von 160 km. Das ist der Entstehung vulkanischer Tätigkeit ebensosehr abträglich ...“ Einen ähnlichen Standpunkt wie Dietz vertreten G. P. Kuiper und eine Reihe anderer Astronomen und Astrophysiker; aber Kosyrew weist erneut darauf hin, daß die Bedingungen für die Entstehung vulkanischer Tätigkeit – obwohl das auf den ersten Blick sehr merkwürdig erscheint – auf dem Mond bedeutend günstiger als auf der Erde sind. Er begründet das wie folgt:

Es wird als selbstverständlich angenommen, daß ein größerer Körper bei gleichen Koeffizienten der Wärmeleitfähigkeit größere Möglichkeiten hat, seine innere Energie zu erhalten, als dies bei einem Körper geringerer Ausmaße der Fall ist. Dieser Umstand spricht scheinbar gegen die Ansicht, daß sich der Mond bis in unsere Tage die Fähigkeit zu tektonischen Vorgängen erhalten konnte. Wenn wir aber die sehr kleine Wärmeleitfähigkeit der Mondoberfläche berücksichtigen, gelangen wir zu dem Schluß, daß sich der Mond seine innere Energie besser erhalten konnte als unsere Erde und daß orogenetische Vorgänge auf dem Monde bedeutend intensiver als auf unserem Planeten ablaufen können. Wir kommen zu dem scheinbar paradoxen Schluß, daß auf dem Mond infolge der Tatsache, daß

eine Atmosphäre fehlt und somit die einzelnen Hohlräume und Poren der Oberflächengesteine nicht mit Gas gefüllt sind, das Entweichen der inneren Wärme von der Oberfläche in den Raum stark beeinträchtigt ist und die für gebirgsbildende Vorgänge notwendige innere Energie sich darum in größerem Maße ansammelt als auf unserer Erde.

Zu ähnlichen Schlußfolgerungen wie Kosyrew kommt auch J. H. Fremlin (1959). Er meint, daß die Wärmeenergie unter der Mondoberfläche schon deshalb sehr hoch sein muß, weil die Oberfläche des Mondes mit Staub bedeckt ist. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit von Staub im Vakuum ergibt sich daraus, daß sich die einzelnen Staubteilchen gegenseitig mit nur sehr kleinen Flächen berühren. Erst bei größerer Dicke des Staubes vergrößert sich infolge des Gewichtes des Oberflächenmaterials deutlich die „Berührungsfläche" (eine große Rolle spielt hier natürlich auch die Kompressibilität des entsprechenden Materials). Im Hinblick darauf, daß die Wärmeleitfähigkeit auf dem Monde auch in größerer Tiefe unter der Oberfläche sehr klein ist, viel kleiner als auf unserer Erde, muß auf dem Monde die natürliche Radioaktivität eine wichtige Rolle spielen, obwohl der Mond unter Berücksichtigung seiner geringen Größe eine viel kleinere Radioaktivität als unser Planet hat. Fremlin nimmt an, daß ein isoliertes Stück des „Mondmaterials" so radioaktiv ist, daß es seine Wärme in Millionen Jahren etwa um 8 °C erhöhen würde. Weil die Wärmeleitfähigkeit des Gesteins größer ist, hat das Mondinnere schon vor langer Zeit ein Temperaturgleichgewicht erlangt, also jenen Stand erreicht, wo – wie dies auch auf unserem Planeten der Fall ist – der Wärmestrom zur Mondoberfläche der Gesamtwärmemenge gleich sein muß, die in seinem Inneren entsteht. Dieser Strom muß nach Fremlin 260 Kalorien je cm^2 im Jahr betragen, oder $8{,}4 \cdot 10^{-4}$ cal (sec) cm^2.

Fremlin kommt dann zu Zahlenergebnissen, die offensichtlich unannehmbar hoch sind. Hiernach wäre die Temperatur in einer Tiefe von 1 m unter der Oberfläche des Mondes schon 240 °C; in einer Tiefe von 25 m wird der Schmelzpunkt von Basalt erreicht. Fremlin

schließt daraus, daß die Staubschicht dementsprechend nicht stärker als 25 m sein kann. Wenn auch diese Zahlenergebnisse der Fremlinschen Berechnungen berechtigten Unglauben hervorrufen und vom Standpunkt geophysikalischer Erwägungen zu Absurditäten führen, steht doch fest, daß die Fremlinschen Erwägungen selbst einen „gesunden" Kern haben. In bestimmter und nicht allzu großer Tiefe unter der Oberfläche des Mondes herrscht offenbar eine bedeutend größere Temperatur als auf unserer Erde in gleicher Tiefe. Fremlin meint, daß es im Inneren eines Kraters, dessen Boden mit einer entsprechend mächtigen Staubschicht bedeckt ist, nach einer gewissen Zeit zu vulkanischer Tätigkeit kommen muß, auch wenn der Krater nicht vulkanischen Ursprungs ist; denn schon bei einer Mächtigkeit der Staubschicht von wenigen Metern muß die Wärmeleitung nach den Seiten genauso bedeutend sein wie durch die Staubschicht hindurch. Nach Fremlin ist es aber wenig wahrscheinlich, daß es bei diesen Ausbrüchen zum Ausstoß großer Mengen festen und flüssigen Materials kommt. Der sehr kleine mechanische Druck des Staubes kann eher zur Entstehung häufiger kleiner örtlicher Störungen des Gleichgewichtes führen, hervorgerufen durch das Freiwerden heißer Gase. Dieses periodische Abblasen heißer Gase erinnert viel mehr als an vulkanische Tätigkeit an die langsame Befreiung von Sumpfgas (Methan), die die Ursache periodischer „Ausbrüche" von Schlamm und Gas auf dem Boden stehender Sümpfe ist. Fremlin meint, daß es zu derartigen zeitweiligen Gasausbrüchen in bestimmten Mondgegenden höchstens mehrmals in Millionen Jahren kommt, und sagt: „Die ganze Erscheinung erinnert weniger an die vulkanische Tätigkeit auf der Erde, als vielmehr an den sehr verlangsamten Vorgang, den wir beim Kochen sehr dichter Flüssigkeiten (Brei) beobachten können. Es ist wahrscheinlich, daß diese Prozesse auch für die Entstehung der Zentralberge verantwortlich sind, die wir im Inneren größerer Krater beobachten..."

Z. Kopal (1959), der eigentlich als erster die gelehrte Welt mit der Entdeckung Kosyrews bekanntmachte, erklärt die im Krater

Alphonsus beobachtete Erscheinung, wie Fremlin, mit einem plötzlichen Ausstoß von Gasen aus dem Mondinneren, wobei auch Staubteilchen von der Mondoberfläche emporgehoben wurden.
Die Entdeckung Kosyrews zeigt uns erneut, wie wenig wir bis jetzt über den Mond wissen und wieviel Unerkanntes uns vorläufig noch im Inneren des Mondes, aber auch an seiner Oberfläche verborgen ist.
Einen sehr interessanten Gedanken über das Wesen der von Kosyrew beobachteten Erscheinung äußerte in neuer Zeit M. W. Windsor. Hiernach existieren in der Mondkruste freie Radikale und aktive Moleküle, wie zum Beispiel H_2O_2, C_2H_2, C_2H_4 u. a., die sich dank der ständigen niedrigen Temperatur erhalten. Wenn auf die Mondoberfläche ein schmales Bündel Sonnenstrahlung mit ausreichender Intensität fällt, zum Beispiel ultraviolette Strahlen, Röntgenstrahlen oder kosmische Strahlen, kann es in einer bestimmten geringen Tiefe unter der Mondoberfläche zu einer heftigen exothermischen Reaktion kommen, zu einer Explosion. So bestünde also eine enge Beziehung zwischen den Explosionen auf dem Monde und der Sonnentätigkeit. Dief Explosionen müßten überall entstehen, ohne Rücksicht au Relief und Morphologie, aber nur auf der beleuchteten Mondseite. In der Äquatorzone wären sie außerdem häufiger als in den polaren Gebieten.

Ist auf dem Monde Leben möglich ?

Wenn wir bei dieser Frage an die Höhe des entwickelten Lebens denken, wie wir es von der Oberfläche unserer Erde kennen, dann müssen wir sagen, daß ein solches Leben auf dem Monde unmöglich ist. Denken wir dabei an irgendwelche sehr primitiven Organismen, zum Beispiel an einige Algen, Bakterien oder andere mikroskopisch kleine und hinsichtlich ihrer Lebensbedingungen anspruchslose Organismen, so sieht die diesbezügliche Situation auch für sie nicht



Monddiorama im Naturwissenschaftlichen Museum (Museum of Science) in Boston, geschaffen von Ch. Bonestell

viel besser aus. Dabei sind es nicht so sehr die starken Temperaturunterschiede an der Mondoberfläche, als vielmehr das völlige Fehlen von Wasser und Atmosphäre und die vernichtende Wirkung ultrakurzwelliger und anderer Strahlung, die die Existenz von organischen Substanzen auf dem Mond geradezu ausschließen. Nicht zuletzt dringt kosmische Strahlung beinahe ungehindert bis auf die eigentliche Mondoberfläche vor. Einige Forscher sind aber trotzdem der Ansicht, daß an einigen Stellen des Mondes die Bedingungen für Leben „günstiger" sind und daß eine sehr primitive und vom irdischen Leben recht verschiedene organische Welt auf dem Monde existiert. So meinte schon W. H. Pickering auf Grund der Beobachtung einiger veränderlicher dunkler Flecken in den Mondmeeren, Golfen und am Boden einiger größerer Mondkrater, daß auf dem Monde offenbar ein primitives pflanzliches Leben

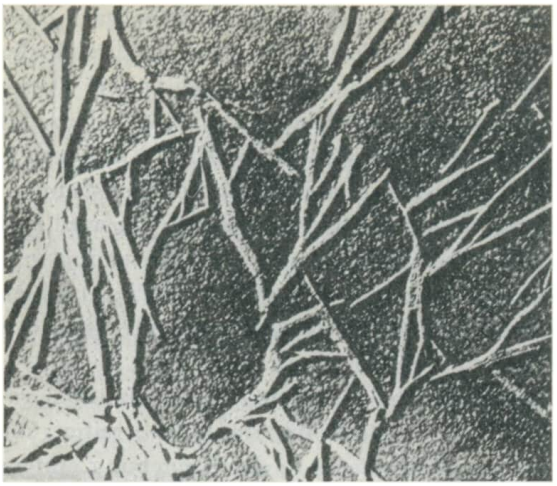
existiert, vielleicht irgendwelche, unseren Flechten ähnliche Organismen. Pickering führt als besonders charakteristischen Fall den dunklen Flecken in der Gegend des Kraters Eratosthenes an. Seiner Meinung nach bestehen diese rätselhaften Formationen aus kleinen veränderlichen Flecken, die für das Auge des Betrachters zu größeren Einheiten zusammenfließen und in vieler Beziehung an die bekannten „Marskanäle" erinnern. Einige dieser Details weisen unregelmäßige Veränderungen auf, die man seiner Meinung nach auf einfache optische Weise nicht erklären kann. In neuerer Zeit schreibt über ähnliche veränderliche Flecken an der Mondoberfläche auch A. W. Markow (1923). Er gibt ebenfalls zu, daß ihm die Gründe dieser Veränderungen unklar sind. Bei der Auslegung der beobachteten Intensitätsveränderungen der „Verfärbung" verschiedener Mondgegenden muß man aber Vorsicht walten lassen, wie am besten das klassische Beispiel der Wallebene Plato zeigt. In der älteren fach- und populärwissenschaftlichen Literatur wird angeführt, daß sich der Boden dieses Kraters um so dunkler zeigt, je stärker die Sonne darauf scheint, obwohl das gerade umgekehrt sein müßte. Diese „Tatsache" wird als deutliches Zeichen von Pflanzenwuchs auf dem Monde ausgelegt. Aber ein ganz einfacher Versuch kann uns davon überzeugen, daß das beobachtete Dunkelwerden Platos eine Täuschung ist. Bereits im Jahre 1876 wies das ein nicht näher bekannter englischer Beobachter des Mondes in einem lange vergessenen Artikel nach, der in der Zeitschrift „English Mechanic" (November 3rd, S. 191) veröffentlicht wurde. Dieser Beobachter hat, wie er schreibt, ein besonderes Filter aus dunklem Glas konstruiert, das er in das Okular des Clarkschen Refraktors mit einem Objektivdurchmesser von 23,5 cm einlegte. Mit dessen Hilfe beobachtete er dann den „Sonnenaufgang" über dem Krater Plato und seiner Umgebung. Zu Beginn, als Plato sich in der Nähe des Terminators befand und der Kraterboden nur spärlich beleuchtet war, unterschied er durch jenes dunkle Glas nur die hellen Wälle. Später aber, als die Sonne über dieser Wallebene ständig höher und höher stieg und der Boden des Kraters nach der geltenden Theorie

allmählich dunkler werden sollte, zeigte sich im Gegensatz dazu auch der Boden immer deutlicher, bis schließlich hier auch viele der gewöhnlich zu beobachtenden Einzelheiten zu sehen waren. Dieser insgesamt sehr einfache Versuch des unbekannten Liebhabers der Astronomie (bekannt ist nur sein Monogramm D. E. W.) überzeugte uns davon, daß der Boden des Plato bei zunehmendem Sonnenstand ebenso wie die übrige Mondoberfläche immer heller wird und daß ein früher „beobachtetes" Dunklerwerden eine Täuschung war, die sich aus dem Kontrast zwischen dem verhältnismäßig dunklen Inneren des Kraters und der allmählich deutlicher emporsteigenden hellen Umgebung ergab.

Pickering machte weiterhin auf die Existenz der sogenannten radialen Streifen (radial bands) aufmerksam, dunkler Streifen, die nach der Art des hellen Strahlensystems in die Umgebung einiger Mondkrater hinauslaufen. Nach Pickering sind das unsichtbare Spalten (Klüfte) in der Mondoberfläche, aus denen zeitweise Wasserdämpfe, Kohlensäure und vielleicht auch andere Gase aufsteigen, die an dieser Stelle einem sparsamen, außerordentlich widerstandsfähigen Pflanzenwuchs das Leben ermöglichen.

In neuerer Zeit erweckte A. P. Moore (1951, 1955) diesen alten Pickeringschen Gedanken zu neuem Leben. Er meint ebenfalls, daß aus zahlreichen Spalten in der näheren Umgebung der Krater Aristillus, Endymion, Eratosthenes und Aristarch und an anderen Stellen des Mondes verschiedene Gase austreten und damit an diesen Stellen einer Pflanzenwelt die Existenz ermöglichen, über deren Art man allerdings nur Vermutungen anstellen kann.

Das irdische Leben zeigt tausend Möglichkeiten, wie es sich auch sehr ungünstigen Lebensbedingungen anzupassen vermag. Aber auch dieses allerprimitivste Leben braucht zu seiner Existenz wenigstens eine ganz geringe Wassermenge und eine wenigstens einigermaßen erträgliche Temperatur, ohne die auch die allereinfachste Chemie des Lebens unmöglich ist. Existiert vielleicht ein primitives Leben am Boden der tiefen Spalten und tief unter der Oberfläche des Mondes, wo die Temperaturen erträglicher sind (mehr oder



Tabakmosaikvirus. Aufnahme durch ein Elektronenmikroskop

weniger eine konstante Temperatur um Null Grad) und wo vielleicht von Zeit zu Zeit eine minimale Menge von „Feuchtigkeit" auftritt, die aus zeitweiligen Gasemanationen stammt, die aus dem Inneren des Mondes zu seiner Oberfläche strömen? Auf diese Frage kann man vorläufig höchstens antworten, daß auch das wenig wahrscheinlich erscheint. Auch in diesem Falle kann uns erst die unmittelbare Erforschung der Mondoberfläche endgültige Gewißheit bringen. Wer weiß, welche Überraschungen sie uns beschert, und ob darunter nicht auch die Entdeckung irgendeiner bisher kaum vorstellbaren „organischen Welt" auf dem Monde ist, die vielleicht an die Welt der irdischen Viren oder Bakterien erinnert.

In diesem Zusammenhang ist es auch interessant, zu erwähnen, daß schon die sowjetische Mondrakete, die auf dem Mond auftraf, vor dem Start sorgfältig sterilisiert wurde, und zwar einerseits deshalb, damit es zu keinem eventuellen Unheil durch Einschleppen irgendwelcher besonders widerstandsfähiger Mikroben von der Erde auf den Mond käme (die später eine Gefahr für die Astronauten darstellen können) und andererseits auch deshalb, damit in der Zu-

kunft die Biologen, die unmittelbar auf dem Mond die Frage studieren werden, ob auf diesem Körper irgendein primitives Leben möglich ist, bei ihren Schlußfolgerungen nicht dadurch beeinflußt werden, daß sie in den Mondmeeren und Kratern Mikroben irdischer Herkunft finden.

Die Entstehung des Mondes

Die Wissenschaftler sind sehr kühn. Obwohl sie eine Reihe von Fragen, die direkt mit der Mondoberfläche, aber auch mit physikalischen und anderen Vorgängen zusammenhängen, noch nicht gelöst haben, klären sie schon die Frage der eigentlichen Entstehung des Mondes selbst. Sie wagen, Vorgänge zu rekonstruieren, die sich vor Millionen und Milliarden Jahren abspielten, als die Erde selbst in ihrer heutigen Gestalt noch nicht existierte und irgendein Leben auf ihr nur eine Verheißung einer sehr fernen Zukunft war.
Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, wie der Mond entstehen konnte. Entweder – wie vor allem frühere Hypothesen aussagten – entstand er einstmals durch Abtrennung von der Erde, oder er entwickelte sich ursprünglich als ein ganz oder in bestimmtem Maße selbständiger Körper in ihrer nächsten Nähe oder in größerer Entfernung von ihr und wurde erst viel später zu ihrem Trabanten.
Nach G. H. Darwin (1879) wurde der Mond zu der Zeit, als die Erde noch glühend war (zu Darwins Zeit glaubte man noch allgemein an eine Entstehung der Erde durch Abtrennung von der Sonne), durch die Wirkung der Gezeitenkräfte der Sonne von unserem Planeten abgetrennt. Daß ein solcher Vorgang möglich ist, bewies H. Jeffreys (1924). Er meint, daß die Masse, die nach Abtrennung von der Erde den Mond bildete, aus spezifisch leichteren Gürteln der Erdkruste stammte, was seiner Meinung nach die kleine Durchschnittsdichte des heutigen Mondes erkläre. Nach modernen Berechnungen konnte die Sonne auf der ursprünglichen Erde, welche aus nichtkomprimierbarer homogener Flüssigkeit

bestand, Gezeiten (Flutwellen) mit einer Höhe von 100 bis 200 km hervorrufen, die zu einer Abtrennung des Mondes von der Erde bei weitem nicht ausreichten. Auch die erwähnte Möglichkeit der Abtrennung des Mondes von der flüssigen Erde durch den Einfluß von Resonanzerscheinungen ist ausgeschlossen.

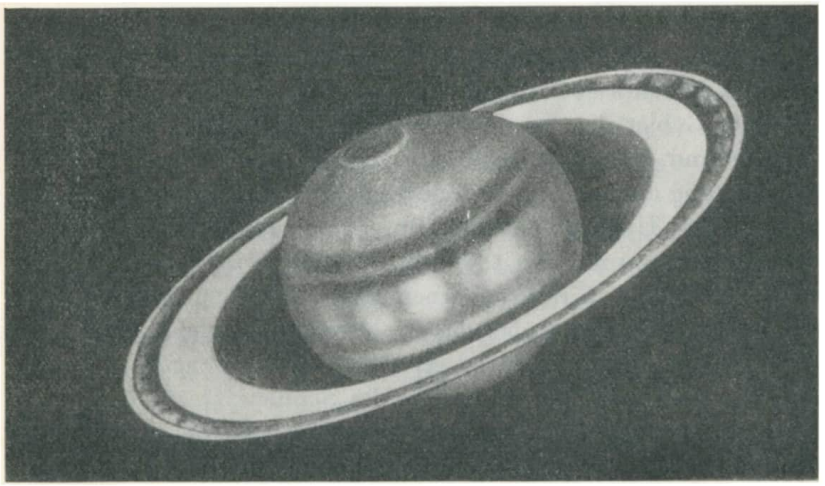
Nach W. H. Pickering (1907) kam es zur Abtrennung des Mondes von der Erde annähernd in der Gegend des heutigen Stillen Ozeans, also in jener ausgedehnten Zone der Oberfläche unseres Planeten, die fast völlig ihrer obersten und spezifisch leichtesten Hülle, des Sials, entblößt ist. Pickerings Hypothese vertraten in neuer Zeit auch R. Staub (1928), P. Gutenberg (1930) und zahlreiche andere Autoren. In moderner Zeit verteidigt sie auch H. Quiring (1946), der der Ansicht ist, daß die Abtrennung des Mondes von der Erde ein katastrophales Ereignis war, das durch einen Zusammenprall eines großen kosmischen Körpers (Kometen) mit der Erde verursacht wurde.

G. H. Darwin, der von der gegenseitigen Gravitationswirkung zwischen Erde und Mond ausgeht, skizzierte auch das künftige Schicksal dieser beiden Körper. Seiner Meinung nach verlangsamt der Mond durch seine Anziehungskraft ununterbrochen die Erdrotation und entfernt sich gleichzeitig von der Erde. Diese allmähliche Entfernung des Mondes wird sich bis zu einem Abstand von etwa 88 Erdhalbmessern fortsetzen. Zu dieser Zeit wird der Mond in genau der gleichen Zeit um die Erde laufen, in der sich die Erde um ihre Achse dreht; beide Körper werden sich also etwa so umeinander drehen, als wären sie mit einem festen Balken verbunden. Vom Monde aus wird also nur eine Hälfte unseres Planeten sichtbar sein, und auch der Mond wird nur von einer Halbkugel der Erde aus zu sehen sein. Die Tageslänge auf der Erde und auf dem Mond wird annähernd 48 heutige Erdentage betragen. Durch die Angleichung der Dauer der Erdrotation und des Mondumlaufes wird eine Phase der Entwicklung dieser Doppelplaneten abgeschlossen, und es beginnt der zweite „Akt", bei dem die Anziehungskraft der Sonne die Hauptrolle spielt. Solange der Mond mit seiner Anziehung auf der

Erde die Gezeiten des Meeres hervorruft, ist die Wirkung der Sonne nur von untergeordneter Bedeutung. Sie äußert sich hauptsächlich darin, daß sie die Gezeiten des Mondes entweder verstärkt oder abschwächt. Nach Verschwinden der Mondgezeiten wird die Wirkung der Sonnengezeiten größere Bedeutung gewinnen, allerdings unter der Voraussetzung, daß dann auf der Erde noch Wasser vorhanden ist. Die Sonnengezeiten werden dann die Erdrotation so verlangsamen, daß ein Tag einem Jahr gleichkommt. Demgegenüber werden die Mondgezeiten, deren Wirkung erneut anzusteigen beginnt, die Erdrotation wiederum etwas beschleunigen. Notwendigerweise wird sich der Mond der Erde nähern, langsam, aber ständig, bis er auf die Erde stürzt...

Wie bereits E. Roche (1850) zeigte, konnte früher der Mond, wenn er damals schon ein Mond der Erde war, dem Mittelpunkt unseres Planeten nicht näher kommen als 2,44 Erdhalbmesser, denn sonst

Das Ringsystem des Planeten Saturn entstand entweder durch Zerfall eines ehemaligen Mondes, der die Rochesche Grenze überschritt, oder aus Material aus dem Inneren der Rocheschen Grenze, das sich wegen der großen Nähe des Planeten niemals zu einem einheitlichen Körper, einem Mond, konzentrieren konnte



wäre der Mond durch die Gezeitenwirkung der Erde in Stücke gerissen worden. Er konnte der Erde allerdings nur unter der Voraussetzung so nahe kommen, daß die Massen der Erde und des Mondes völlig gleichartig sind und die gleiche durchschnittliche Dichte haben. Der Mond ist aber tatsächlich bedeutend weniger dicht als die Erde, und diese beiden Körper sind auch nach ihrem Mittelpunkt zu dichter, so daß der tatsächliche Wert dieser sogenannten Rocheschen Grenze etwa 2,87 Erdhalbmesser, also etwa 18000 km beträgt. Daraus wird klar, daß der Mond früher in keiner kleineren Entfernung als der von 18000 km um die Erde rotieren konnte. Auch die Entstehung des Mondes durch Abtrennung von der Erde oder seine Bildung in sehr großer Nähe unseres Planeten ist außerordentlich unwahrscheinlich oder einfach unmöglich (F. Nölke, 1930). Nach Hopmann (1952) kann man gewichtige Argumente für die Hypothese, daß der Mond nicht aus der Erde entstand, sondern sich zunächst unabhängig von ihr entwickelte, auch aus dem schon von F. Hayn (1923) abgeleiteten Beharrungsvermögen des Mondes herleiten und weiterhin aus der Tatsache, daß auf dem Monde auf der Grundlage selenodätischer Messungen keine größeren, der Erde zugewandten Gezeitenwellen entdeckt werden konnten. Nach F. Nölke konnten sich Erde und Mond bestenfalls gemeinsam gebildet haben, als noch die Gasmassen an dieser Stelle die Größe der heutigen Erde um ein Vielfaches übertrafen.

Auf dem Gebiet der Kosmogonie, der Wissenschaft von der Entstehung und Entwicklung kosmischer Körper, bewegen wir uns bisher häufig auf sehr unsicherem Boden. Hier alle derzeitigen kosmogonischen Hypothesen aufzuführen und ihr Für und Wider zu erwägen, würde uns zuweit führen. Um aber wenigstens die Hauptentwicklungslinie in der modernen Kosmogonie zu erklären, muß man auch einige Worte über das Problem der Entstehung des Mondes sagen. Man kann es nicht getrennt von der Frage der Entstehung der Erde und anderer Körper des Sonnensystems lösen.

Der heutige Zustand des Sonnensystems ist offensichtlich das Ergebnis eines sehr komplizierten Entwicklungsprozesses, der in seinen

verschiedenen Teilen auf verschiedene Weise verlief. Die großen Planeten entstanden wahrscheinlich auf dem Wege einer gravitationsbedingten Kondensation eines gas- und staubförmigen Mediums, des primären Sonnennebels; dieser war von Anfang an kalt und bildete erst im Verlauf der Zeit durch Kondensation in seinem Inneren einen zentralen Stern, die Sonne. Die Entstehung terrestrischer Planeten erfolgte wahrscheinlich ähnlich. Allerdings war wohl der Verlust ursprünglichen Stoffes bei ihnen wegen ihrer größeren Sonnennähe weitaus größer als bei den großen Planeten, die sich bis in die heutige Zeit großenteils ihre ursprüngliche Zusammensetzung bewahrten, die in vieler Beziehung an die stoffliche Zusammensetzung der Sonne (großer Wasserstoffgehalt) erinnert. Die chemische Zusammensetzung der Oberflächenkruste terrestrischer Planeten unterscheidet sich demnach wegen des späteren Entweichens der leichteren Elemente von ihrer ursprünglichen Zusammensetzung. Die Entstehung des Systems Erde-Mond ist zweifellos eine gewisse Variante jenes Vorganges, der zur Entstehung der Doppelsterne führte. Vorläufig kann man aber auch nicht ganz die Möglichkeit ausschließen, daß der Mond ursprünglich als ein selbständiger Körper entstand und erst später von der Erde eingefangen und zur Rotation um sie gezwungen wurde. Dieses Einfangen stellen sich die verschiedenen Autoren verschieden vor; so zieht zum Beispiel B. Thüring (1930, 1931) eine außergewöhnlich komplizierte Lösung in Erwägung. Er meint, daß der Mond als ehemaliger Planetoid (sogenannter Trojaner) sich häufiger der Venus als der Erde nähern konnte, so daß er einmal von diesem Planeten aus seiner Librationsbahn „hinausgeworfen" und dann von der Erde eingefangen wurde. Diese Hypothese könnte man nach der Meinung J. Hopmanns (1952) durch „experimentelle Berechnung" mit Hilfe einer elektronischen Rechenmaschine überprüfen. In moderner Zeit tauchte auch eine Hypothese auf, nach der die Planetoiden der Gruppe der Trojaner ehemalige Jupitermonde sind. Demnach wäre – obwohl dem Autor eine solche Hypothese geradezu absurd erscheint – unser Mond ein früherer Jupitermond.

Die Entstehung der Planetoiden und Meteorite war zweifellos bedeutend komplizierter als die der großen Planeten. Sie war das Ergebnis einer noch größeren Differenzierung im Gebiet der primären gas- und staubförmigen Nebel. Die Struktur der Eisenmeteorite zeigt uns, daß diese Massen ursprünglich für eine längere Zeit im Inneren bedeutend größerer Körper lagen. H. H. Uhlig (1954) stellte fest, daß man die sogenannten Widmannstättenschen Figuren, die sich auf den blankpolierten und dann mit verdünnter Salpetersäure geätzten Flächen von Eisenmeteoriten zeigen, im Labor durch sehr langsame Abkühlung einer künstlich bereiteten Legierung von Eisen und Nickel bei sehr hoher Temperatur und hohem Druck reproduzieren kann, aber daß die so gewonnenen Figuren um vieles kleiner als bei Meteoriten sind. Uhlig leitet davon ab, daß die Widmannstättenschen Figuren tatsächlich vor vielen Millionen Jahren unter einem Druck von Tausenden von Atmosphären entstanden sein müssen, daß also die Erstarrung der Eisen-Nickel-Legierung in den Meteoriten nur im Inneren eines genügend umfangreichen Planeten oder mehrerer Planeten vor sich ging. Eine detaillierte Erforschung der mikroskopischen Struktur der Meteorite (der sogenannten Neumannschen Linien) im Jahre 1955 zeigte weiterhin, daß sich in dem Körper oder den Körpern, in denen diese Erstarrung erfolgte, der Druck plötzlich veränderte, was nur damit zu erklären ist, daß die meteoritischen Körper sich von ihren „Mutterkörpern" bei plötzlichen katastrophalen Prozessen trennten. Die Entstehung der Meteorite hängt wohl mit der Entstehung der Planetoiden zusammen. Nach W. G. Fessenkow (1958) weist die bei vielen Planetoiden festgestellte unregelmäßige Form darauf hin, daß sie offensichtlich Bruchstücke größerer Körper sind. Die Entstehung der Meteorite erklärt sich aus Zusammenstößen mit Planetoiden. Nach Fessenkow kann man annehmen, daß die Planetoiden selbst keinesfalls, wie man früher meinte, durch den Zerfall eines einzigen Körpers entstanden, sondern mehrerer größerer Körper planetoiden Typus. Der eigentliche Entstehungsprozeß der Planetoiden bleibt aber bisher noch in vielen Punkten ungeklärt. Viel dokumenta-

risches Material für die Skizzierung der ehemaligen Geschichte des Sonnensystems beschert uns die Bestimmung des Meteoritenalters mittels der Radioaktivität, eine Methode, die erstmalig für die Bestimmung des Alters irdischer Mineralien und Gesteine ausgearbeitet und genutzt wurde. Zunächst zeigte sich, daß das Alter der Meteorite sehr uneinheitlich ist und daß einerseits Meteorite mit einem „Alter" von kaum einer Million Jahren existieren, während andererseits bis zu 7,6 Milliarden Jahre alte Meteorite gefunden werden. Eine Million Jahre sind sehr wenig und 7,6 Milliarden Jahre wohl sehr viel. Dieser scheinbare Widerspruch wurde später auf eine ganz einfache Weise erläutert. Das Alter der Meteorite wurde früher hauptsächlich aus dem Gehalt an Helium bestimmt, das bekanntlich durch den radioaktiven Zerfall des Uranisotopes U-238 entsteht. C. A. Bauer und unabhängig davon H. E. Huntley (1948) wiesen aber darauf hin, daß für das Helium in den Meteoriten nicht nur der radioaktive Zerfall, sondern teilweise auch die kosmische Strahlung verantwortlich ist, so daß das nach dem Heliumgehalt bestimmte tatsächliche Alter der meisten Meteorite nach Abzug dieses „kosmischen" Heliums bedeutend geringer sein muß. F. S. Singer (1951) leitete theoretisch ab, daß in den mit der primären kosmischen Strahlung bombardierten Eisenmeteoriten tatsächlich Helium zweierlei Art entsteht, und zwar das normale Helium-4, das auch bei radioaktivem Zerfall entsteht, und dann Helium-3, das beim radioaktiven Zerfall nicht entstehen kann. K. I. Maine (1952) stellte dann dieses Helium-3 in Eisenmeteoriten tatsächlich fest. Am meisten davon fand er gerade in jenem Meteoriten (dem Meteoriten von Mt. Ayliff), der auf der Grundlage früherer Analysen ein vermeintliches Maximalalter von 7,6 Milliarden Jahren aufwies. Es ist ersichtlich, daß uns jetzt die Singersche Entdeckung ermöglicht, auf der Grundlage des Gehaltes an Helium-3 in den Meteoriten die Zeit zu bestimmen, die der Meteorit im interplanetaren Raum kosmischer Strahlung ausgesetzt war; das ist die tatsächliche Zeit seiner Existenz als Bruchstück, während uns die Bestimmung seines „Alters", zum Beispiel nach dem Gehalt an Blei, die Zeit seiner Entstehung

selbst angibt, also den Zeitpunkt des Erkaltens der Eisen-Nickel-Legierung, aus der er sich zusammensetzt.

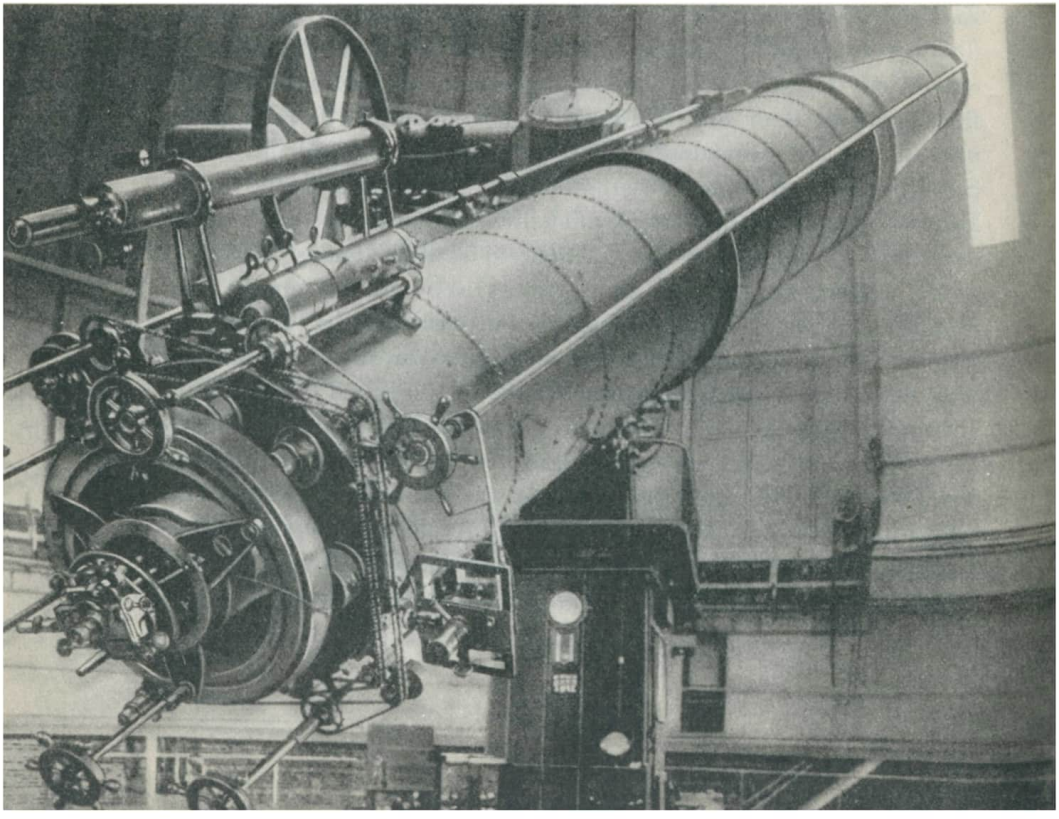
Nach H. C. Urey (1956) war die Entwicklung des Sonnensystems außerordentlich kompliziert; sie verlief etwa so: Vor ungefähr 4,5 Milliarden Jahren akkumulierten in den die heutige Sonne umgebenden primären gas- und staubförmigen Nebeln einzelne Planeten und primäre Planetoiden. In ihnen löste die angestaute Wärme radioaktiven Ursprungs innerhalb von 10 Millionen oder 100 Millionen Jahren einen Schmelzprozeß aus, der zur Entstehung von Eisen- und Silikat-Schmelzmasse führte. Diese primären Planetoiden wurden später durch Zusammenstöße zu kleinen Meteoritenkörpern in der Größenordnung von Zentimetern oder Millimetern zerschlagen. Vor etwa 4,3 Milliarden Jahren akkumulierten diese zu sogenannten sekundären Planetoiden, die dann noch mehrfach zerschlagen wurden. Schließlich führten diese Vorgänge zur Entstehung der heutigen Meteoriten. Urey greift hauptsächlich deshalb zu diesem recht komplizierten Schema, um die sehr komplizierte Struktur und die zahlreichen Besonderheiten im Bau der heutigen Meteorite erklären zu können. Kleine Bruchstücke von Meteoritenmaterial, vermischt mit Gas, spielten nach Urey und anderen heutigen Fachleuten auf dem Gebiet der Kosmogonie eine besonders bedeutende Rolle bei der allmählichen Formung des Sonnensystems. Durch ihre Akkumulation entstanden sowohl die Sonne als auch die Planeten. Große Planeten entstanden durch recht komplizierte Vorgänge aus sogenannten Protoplaneten, die zu Beginn ihrem Wesen nach nur eine große Masse von Gas und Staub waren und deren chemische Zusammensetzung im großen und ganzen der heutigen Zusammensetzung der Sonne entsprach. Erst im Verlaufe der weiteren Entwicklung entstanden aus diesen Protoplaneten durch „Dissipation von Gas und Staub“ die heutigen Planeten. Unsere Erde und die ihr ähnlichen Planeten entstanden nach Urey durch direkte Akkumulation fester kalter Teilchen, nicht aus Protoplaneten. Die heutigen kosmogonischen Auslegungen stimmen also darin überein, daß die Entstehung des Sonnensystems im wesentlichen

ein bedeutend komplizierterer Vorgang war, als einige frühere Hypothesen voraussetzten, und daß unsere Erde und offensichtlich auch der Mond ihre Existenz keineswegs als „glühende Gaskugel" begannen, wie uns noch vor kurzer Zeit die alte klassische Kosmogenie lehrte. Sie entstanden durch allmähliche Anhäufung (Akkumulation) meteoritischen Staubes und „kosmischen" Gases. Erst im Laufe der Zeit bewirkte die in ihnen aufgespeicherte radioaktive Wärme ein allmähliches Schmelzen des Materials, das mit einer Scheidung und Differenzierung der Masse verbunden war. In unserem Planeten bildete sich ein schwerer, wahrscheinlich metallischer Kern, in dem heute insgesamt etwa 8% seiner Gesamtmasse konzentriert ist. Beim Monde ist es offensichtlich niemals zu einer so vollendeten Differenzierung des Materials gekommen. Nach Urey bildeten sich die Krater auf dem Monde im Endstadium der Entstehung des Mondes als kosmischer Körper. Die Zeit der Erstarrung der Mondmeere schätzt Urey auf 10000 bis 100000 Jahre. Die kleine Zahl der Krater in den Meeren zeugt seiner Meinung nach davon, daß der Aufprall von Körpern, die die Krater bildeten, schon zu einer Zeit aufhörte, als die Mondmeere noch zum größten Teil flüssig waren. Urey hält es für sehr wahrscheinlich, daß die Meere und Krater auf dem Monde durch den Zusammenprall mit einem Schwarm von Körpern entstanden, die Trabanten des Systems Erde-Mond waren. Das beweise auch die ziemlich kurzzeitige Periode der Herausbildung des Oberflächenreliefs des Mondes. Die Tatsache, daß auf dem Monde kein symmetrisch zum Mittelpunkt der Mondscheibe führendes Rillensystem zu entdecken ist, zeigte uns, daß der Mond der Erde wohl niemals näher war, als die Verdoppelung der Rocheschen Grenze angibt.

In moderner Zeit bemüht sich K. E. Bullen (1951) um eine ganz neue Erklärung der Entstehung des Mondes. Seiner Meinung nach durchlief der Erdkern inmitten der „anwachsenden" Erde bei Überschreitung eines Druckes von 4 Millionen Atmosphären einen plötzlichen „Phasenübergang", der zu einer Explosion und zum Hinausschleudern eines Teiles der Erdmasse in den umgebenden Raum

führte. Die Gezeitenkräfte vermochten zu verhindern, daß diese Masse wieder auf unseren Planeten zurückfiel. Aus diesem Material bildete sich später durch neue Akkumulation der Mond. E. J. Öpik (1955) äußerte einen ähnlichen Gedanken, aber die Ursache der Explosion sucht er woanders. Seiner Meinung nach kam es zur Explosion und zur Ausschleuderung eines Teiles des irdischen Materials durch eine „Erleichterung" des Erdkernes, die durch den Verlust eines Teiles der Masse unseres Planeten (Entweichen von Gasen) hervorgerufen wurde. Das abgeschleuderte Material bildete um die ursprüngliche Erde eine Art Ring, aus dem später der Mond entstand. Öpik nimmt an, daß die Masse der ursprünglichen Proto-Erde vor diesem „Ereignis" etwa dem Dreifachen der heutigen Masse gleichkam.

Das große astronomische Fernrohr im Observatorium Yerkes, Williams Bay, mit einer Öffnung von 102 cm und einer Länge von 19 m



Nach Z. Kopal bezeugen die festgestellten Unregelmäßigkeiten der Form der Mondoberfläche, daß die Oberfläche des Mondes niemals von der Oberfläche einer Flüssigkeit geformt worden sein kann. Hinsichtlich des heutigen Aussehens der Mondoberfläche meint Kopal, daß es einen Blick in die Situation kurz nach der Herausbildung des Sonnensystems gewähre und daß die Mondoberfläche eine Widerspiegelung der Vorgänge im Sonnensystem zu Beginn seiner Existenz darstelle. Eine ähnliche Ansicht äußerte schon im Jahre 1953 auch der Autor des vorliegenden Buches: „...der Mond könnte das ursprüngliche Aussehen der Oberfläche eines Planeten kurz nach seiner Entstehung vorstellen.. der Oberfläche, die im Hinblick auf die kleine Masse des Mondes... und dem wahrscheinlich kleinen Gehalt an radioaktiven Atomen bisher nicht völlig zu schmelzen und sich wahrscheinlich in seinem Inneren nicht ganz zu differenzieren vermochte. Unser Planet, die Erde, hat allerdings dieses ursprüngliche Aussehen seiner Oberfläche schon lange eingebüßt..." (Měsíc, 1953, Seite 92).

H. Gerstenkorn (1955) machte in neuester Zeit ein interessantes mathematisches Experiment. Er versuchte etwas Umgekehrtes wie seinerzeit G. H. Darwin und errechnete aus der gegenwärtigen gegenseitigen Gezeitenwirkung von Erde und Mond die allmählichen Veränderungen der Elemente von Mondbahn und Erdrotation. An Stelle der „Perspektiven" der künftigen Entwicklung Erde-Mond versuchte er Schritt für Schritt mathematisch seine ehemalige Geschichte zu rekonstruieren. Obwohl Gerstenkorn zu Beginn seiner Berechnungen aus verständlichen Gründen verschiedene Vereinfachungen „zuließ" und obwohl man seine Berechnungen als ein rein mathematisches Schema ansehen muß, das niemals auszudrücken vermag, wie sich die Dinge wirklich „zutrugen", sind doch einige seiner zahlenmäßigen Ergebnisse vom kosmogonischen Standpunkt aus sehr interessant, und es scheint, daß sie in gewissem Maße viele wirkliche „Ereignisse" ergründen (siehe Tabelle auf Seite 284).

Es zeigt sich die Möglichkeit, daß der Mond vor etwa 2670 Millionen

Entwicklung des Systems Erde-Mond
Nach H. Gerstenkorn (1955)

Zurückliegende Zeit	Differenz (in Jahren)	Periode der Erdrotation (Stunden)	Neigung der Mondbahn	Entfernung des Mondes im Perigäum (Erdhalbmesser)	Exzentrizität der Mondbahn	Umlaufzeit
2670000000	$1{,}17 \cdot 10^8$	2,62	148,6	26,1	1,00	∞
2553000000	$5{,}33 \cdot 10^7$	2.76	145,7	25,6	0,66	37,2 Tage
2500320000	$3{,}1 \cdot 10^4$	3,29	132,4	17,1	0,08	4,61 Tage
2500010000	$9{,}83 \cdot 10^3$	3,69	118,7	10,0	0,02	1,86 Tage
2500000170	144	4,20	92,3	4,80	0	14,7 Tage
2500000026	26	4,55	68,1	3,34	0	8,5 Stunden
2500000000	5	4,79	45,7	2,89	0	6,86 Stunden
2499999995	8	4,86	40,4	2,92	0	6,99 Stunden
2499999987	25	4,96	33,8	3,20	0	8,00 Stunden
2499999970	162	5,12	28,8	3,90	0	10,8 Stunden
2499999800	$1{,}7 \cdot 10^3$	5,39	24,8	5,34	0	17,2 Stunden
2499998100	$2{,}71 \cdot 10^4$	5,80	21,9	7,87	0	1,2 Tage
2499971000	$3{,}91 \cdot 10^5$	6,50	20,1	12,2	0	2,46 Tage
2499580000	$3{,}88 \cdot 10^6$	7,49	19,0	18,1	0	4,47 Tage
2495700000	$3{,}07 \cdot 10^7$	8,85	18,4	25,5	0	7,45 Tage
2465000000	$1{,}85 \cdot 10^8$	11,0	18,8	34,8	0	11,9 Tage
2280000000	$6{,}9 \cdot 10^8$	14,2	19,9	44,7	0	17,3 Tage
1590000000	$1{,}59 \cdot 10^9$	18,6	21,5	53,2	0	22,7 Tage
heutiger Stand		23,9	23,8	60,3	0	27,3 Tage

Jahren als ursprünglich selbständiger Körper von der Erde „eingefangen“ wurde und daß seine ursprünglich sehr exzentrische Bahn sich in einer Zeitspanne von etwa 170 Millionen Jahren in eine beinahe kreisförmige Bahn verwandelte. Gleichzeitig damit ver-

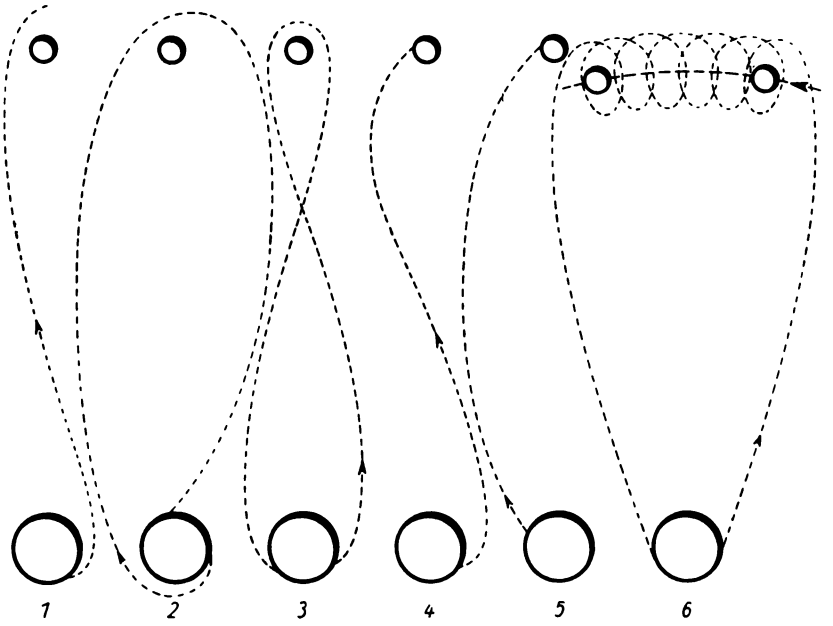
kleinerte sich ununterbrochen die ursprünglich sehr starke Neigung seiner Bahn zum Erdäquator. Etwa vor 2500 Millionen Jahren fand eine extreme Annäherung des Mondes an unseren Planeten statt, etwa bis auf 18400 km, also sehr nahe der Rocheschen Grenze, so daß es scheint, daß er nur um ein kleines der Vernichtung entging. Dann aber begann eine sehr rasche Entwicklung. Die Entfernung des Mondes begann sich schnell zu vergrößern, die Neigung seiner Bahn nahm gleichzeitig damit rasch ab und erreichte etwa vor 2496,7 Millionen Jahren ihr Minimum, nämlich 18,4 °. Von da an bis in unsere Zeit wächst die Entfernung des Mondes und ebenso die Neigung seiner Bahn zum Erdäquator allmählich wieder an.

Ziel Mond

Wir haben erwähnt, daß viele den Mond betreffenden Fragen und Probleme zweifellos nur auf direktem Wege lösbar sind, das heißt durch Landung von Raketen auf dem Mond. Dazu gehören auch außerordentlich schwerwiegende Fragen, wie zum Beispiel die nach der Struktur und Zusammensetzung der Mondoberfläche, die Frage der Entstehung der Oberflächenformationen auf dem Mond und andere mehr. Noch vor kurzer Zeit wurde ein solches „Abschieben" von Problemen auf die Raketenära zu einer bloßen Ohnmachtserklärung der zeitgenössischen Wissenschaft gestempelt und ihm keine große Bedeutung beigemessen. Heute allerdings sieht die Situation grundsätzlich anders aus. Die Wissenschaft hat schon eine Reihe den Mond betreffende Fragen gelöst, und fast mit Selbstverständlichkeit wird heute bereits erwogen, zur Lösung der übrigbleibenden Fragen in naheliegender Zeit Raketensonden zu benutzen, die zuerst den Mond aus größerer oder kleinerer Entfernung untersuchen und später sicherlich direkt auf seiner Oberfläche landen werden.

Es wäre wohl nicht sehr sinnvoll, hier die technische Seite eines Fluges nach dem Mond bis ins einzelne darzulegen, denn über

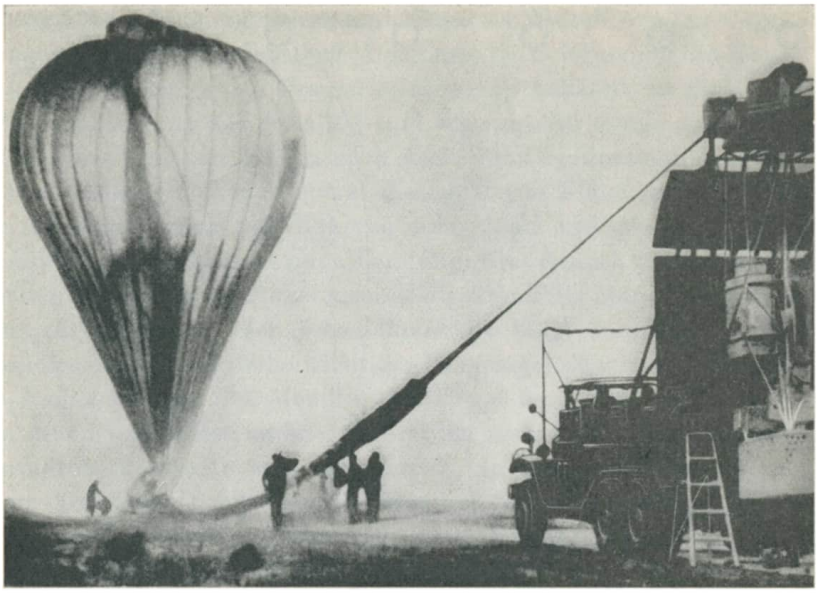
Raketen, künstliche Satelliten und Flüge ins Weltall wurden schon genügend Bücher veröffentlicht. Der Leser hatte sicherlich die Möglichkeit, sich mit diesen Fragen anderweitig bekannt zu machen. Auf der Abbildung auf Seite 287 sind schematisch einige der möglichen Varianten von Wegen nach dem Mond veranschaulicht. Es ist verständlich, daß man zuerst die leichteren Flüge zurücklegte, also die Annäherung von Raketen zum Mond und gegebenenfalls ein Umfliegen des Mondes ohne Landung. Erst danach wird es auch zu einer Landung einer Raketensonde direkt auf der Mondoberfläche kommen. Schon in dieser ersten Phase der Flüge zum Mond wird zweifellos eine ganze Reihe wichtiger Fragen gelöst werden, wie die der Radioaktivität des Mondes, die Frage des Magnetfeldes auf dem Mond und vieles andere. Es werden Aufnahmen von der abgewandten Mondseite gemacht werden. In einer weiteren Phase dieser Versuche (Umfliegen des Mondes, Schaffung eines künstlichen Mondsatelliten) können viele weitere Fragen gelöst werden; ihr wertvollstes Ergebnis werden wohl Photographien des Mondes aus größerer Nähe sein, die uns bei der Lösung der bisher sehr umstrittenen Frage der detaillierten Struktur der Mondoberfläche und der Entstehung der Oberflächenformationen behilflich sein können. Die endgültige Entscheidung aller heutigen Fragen wird uns aber unzweifelhaft erst die Landung einer Raketensonde direkt auf der Mondoberfläche bringen. Nach dem Vorschlag des sowjetischen Ingenieurs J. Chlebzewitsch könnte diese Sonde die Form eines kleinen Panzerwagens haben, der mit einer beliebigen wissenschaftlichen Ausrüstung und selbstverständlich auch einer Fernsehkamera ausgestattet ist, die Bilder von der Mondlandschaft aufnimmt und zur Erde sendet. Das Projekt Chlebzewitschs hat allerdings seine gewichtigen Unzulänglichkeiten, weshalb es vorläufig nicht realisierbar ist. Die Fernsteuerung eines kleinen Tanks ist kein Problem; aber ein wichtiges und vorläufig völlig ungelöstes Problem bleibt zum Beispiel die Frage, womit ein solches Fahrzeug geschmiert werden soll. Das bei irdischen Fahrzeugen benutzte Öl würde nämlich innerhalb des Mondvakuums augenblicklich verdampfen. Auch der



Einige Projekte des Fluges zum Mond (schematisch): 1. Die Bahn der ersten sowjetischen und amerikanischen Mondrakete, 2. und 3. Umfliegung des Mondes, 4. und 5. Landung bzw. Auftreffen einer Rakete auf dem Mond, 6. zeitweiliger künstlicher Mondtrabant. Nach W. A. Jegorow

feine Staub auf der Mondoberfläche (mit einer Korngröße von 0,001 bis 0,002 mm) würde die Bewegung des Tanks einschränken, da der Staub in alle Mechanismen eindringen und sehr bald die Fortbewegung eines solchen Fahrzeuges verhindern würde.

Chlebzewitsch steht künftigen Mondflügen des Menschen sehr skeptisch gegenüber. Er meint, daß die Erforschung des Mondes für lange Zeit nur auf diese Methode beschränkt bleiben wird. Es ist nicht ausgeschlossen, daß die Technik in der Zukunft auch das Problem der Rückkehr automatischer Sonden vom Mond zur Erde erfolgreich zu lösen lernt, so daß diese Einrichtung vollständig die Forschungsarbeit ersetzt, die auf dem Monde von Menschen durchgeführt werden könnte. Außerdem würde sie diese in vieler Beziehung durch



Projekt Stratoscope. Füllung des Polyäthylenballons Skyhook in Minnesota, der am 17. Oktober 1957 ein 12zölliges astronomisches Spiegelfernrohr in eine Höhe von 25,5 km trug, mit dessen Hilfe Sonnenphotographien von außerordentlicher Qualität gewonnen werden konnten

ihre Genauigkeit und ihre Vorteile weit übertreffen. Demgegenüber sehen andere Forscher die Möglichkeiten eines Fluges des Menschen zum Mond weitaus optimistischer an. Sie meinen, daß es schon in verhältnismäßig naher Zukunft nicht nur zur Landung der ersten Astronauten auf dem Mond kommen werde, sondern sicherlich auch zur Errichtung ständiger wissenschaftlicher Stationen auf der Mondoberfläche. Der Mensch wird auf dem Mond vorwiegend unterirdisch (oder unter„mondisch") leben und sich nur selten auf der Mondoberfläche bewegen.

Ein wichtiges und bisher nicht völlig gelöstes Problem des „Reisens auf dem Mond" ist die Methode der Orientierung auf der Mondoberfläche. Auf Seite 92 haben wir schon davon gesprochen,

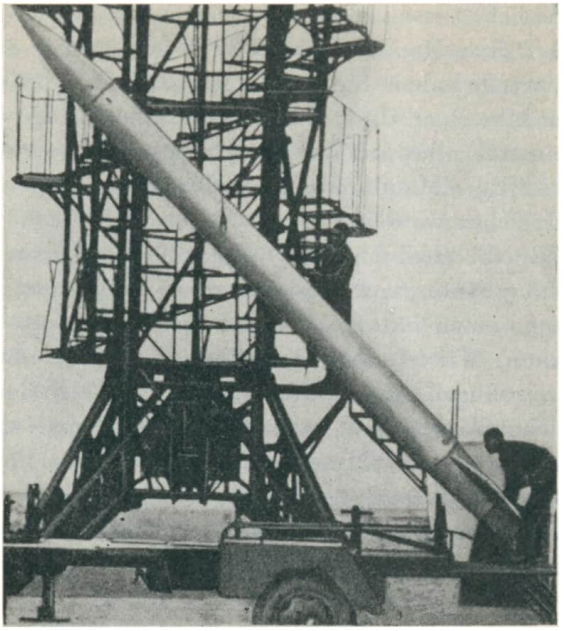
daß der Horizont dem Beobachter auf dem Mond viel näher als auf der Erde liegt, so daß die auf der Mondoberfläche gelandeten Astronauten nur in eine Entfernung von etwa 2 Kilometern sehen können. Eine Bewegung nach den derzeitigen Karten (siehe Seite 117) wäre unmöglich. Erörtern wir den Fall, daß auf der Mondoberfläche in einer Entfernung von einigen wenigen Kilometern voneinander zwei Raketen landen. Wie könnten sich ihre Besatzungen miteinander verständigen? Der optische Weg ist nach allem bisher Gesagten nicht möglich. Die Verständigung durch Funk entfällt ebenfalls, weil es auf dem Mond keine genügend „dichte" Atmosphäre gibt, die auf der Erde die Funkverbindung über weite Strecken ermöglicht. Es verbleiben nur zwei Verständigungsmöglichkeiten. Entweder man verständigt sich auf einem Umweg, das heißt mit Hilfe von Funkwellen, die entweder von der Erde oder einem künstlichen Mondtrabanten reflektiert werden, oder mit Hilfe seismischer Wellen, die in der Mondkruste durch künstliche Explosionen hervorgerufen werden. Auch der Kompaß entfällt, wenn der Mond kein magnetisches Kraftfeld mit einer Stärke von mehr als 0,1 des Magnetfeldes der Erde besitzt.

Der Mensch wird sich den Aufenthalt auf dem Mond im Laufe der Zeit in dem Tempo angenehmer machen können, das dem Tempo der Entwicklung von Wissenschaft und Technik entspricht. So gibt es zum Beispiel schon jetzt theoretisch die Möglichkeit, sich auf dem Monde direkt mit Wasser und Sauerstoff zu versorgen. Freies Wasser existiert auf der Mondoberfläche nicht; aber es gibt dort sicher viel chemisch gebundenes Wasser in Form verschiedener Hydrate. Setzen wir sie einer Temperatur von 1600 °C bis 2000 °C aus (zum Beispiel dadurch, daß wir mit Hilfe eines geeigneten parabolischen Spiegels intensive Sonnenstrahlung auf sie konzentrieren), könnten wir aus ihnen dieses Wasser verhältnismäßig leicht gewinnen. Auf eine ähnliche Art und Weise könnten wir auf der Mondoberfläche aus verschiedenen Oxyden Sauerstoff gewinnen. Heute scheint uns auch der Gedanke nicht mehr allzu phantastisch, daß die Menschheit im Verlaufe künftiger Jahrhunderte auf dem

Monde eine künstliche Hydrosphäre und Atmosphäre schaffen und damit aus dem Mond einen bewohnbaren Planeten machen könnte. Die Errichtung wissenschaftlicher Stationen auf dem Monde wird außerordentliche Bedeutung besonders für die Astronomen haben, die den Weltraum von dort aus völlig unbehindert werden beobachten können. Aufnahmen von Planeten, aber auch von entfernteren Gebieten des Weltalls, die von der Mondoberfläche aus gemacht werden, wo sich im Gegensatz zur Erde keine störenden Einflüsse einer Atmosphäre bemerkbar machen, werden bislang ungeahnte Einzelheiten ergeben und von außergewöhnlicher Qualität sein. Wie stark durch künftige Mondsternwarten unsere Kenntnisse vom Weltall vermehrt werden können, darüber geben uns schon jetzt Versuche über das Photographieren der Sonne durch astronomische Fernrohre Kenntnis, die mit Hilfe von Stratosphärenballons in große Höhen emporgetragen werden.[1]

Übrigens wird man solche Aufnahmen wohl schon früher von den künftigen künstlichen Satelliten der Erde oder Raketensonden bekommen können, die zwischen Erde und Mond kreisen und eine spezielle Ausrüstung tragen.

[1] Der störende Einfluß der Erdatmosphäre auf astronomische Beobachtungen äußert sich nicht nur in der bekannten Unruhe der Bilder, die durch die Turbulenz in den niederen atmosphärischen Schichten hervorgerufen wird, zum Beispiel bei der Beobachtung von Planeten, sondern auch in der atmosphärischen Extinktion, daß heißt darin, daß die in der Erdatmosphäre enthaltenen Gase bestimmte aus dem Weltall zu uns kommende Strahlenarten verschlucken. Das menschliche Auge nimmt aus dieser Strahlung (als sichtbares Licht) elektromagnetische Strahlen mit einer Wellenlänge von etwa 4000 Å (1 Å = 0,0000001 mm) bis 7600 Å wahr. Nach den kürzeren Wellenlängen zu haben wir die Möglichkeit, den Weltraum bis etwa 2900 Å (ultraviolette Strahlung) zu beobachten; aber weiter nicht; denn kürzere Wellen werden von den Ozonschichten in der Erdatmosphäre absorbiert. Nach der anderen Seite, in Richtung auf lange Wellenlängen, macht sich von 10000 Å, das heißt von 0,001 mm an die Absorption der Strahlung durch CO_2 und H_2O bemerkbar. Diese Absorption ist zum Beispiel in der Nähe der Wellenlänge 0,1 mm so stark, daß selbst die Strahlung der Sonne verschluckt wird. Erst von 1 cm an gibt es ein weiteres „Radiofenster", das die Radiofrequenzstrahlung durchläßt, die wir mit Hilfe von Radioteleskopen untersuchen. Dieser Bereich erstreckt sich bis zu einigen Dutzend Metern. Längere Wellenlängen werden dann von der Ionosphäre verschluckt, das heißt von den elektrisch aktiven Schichten der hohen Erdatmosphäre. Auf dem Monde, wo es keine Atmosphäre gibt, fallen diese Schwierigkeiten mit der atmosphärischen Absorption weg, und die Astronomen werden dort die Möglichkeit haben, den Weltraum in jedem beliebigen Wellenbereich zu untersuchen. Auch der dunkle Tageshimmel auf dem Monde und auch die Länge des Tages, die 27 Erdentagen entspricht, werden insbesondere dort „unbezahlbar" sein, wo lange Belichtungszeiten notwendig sind. Es ist keine übertriebene Behauptung, daß die Errichtung eines astronomischen Observatoriums auf dem Monde die astronomische Forschung so voranbringt, daß man die ganze bisherige astronomische Forschung nach wenigen Jahren als prähistorische Sternkunde wird bezeichnen können (nach Z. Kopal, Vortrag in Prag am 8. Januar 1960).



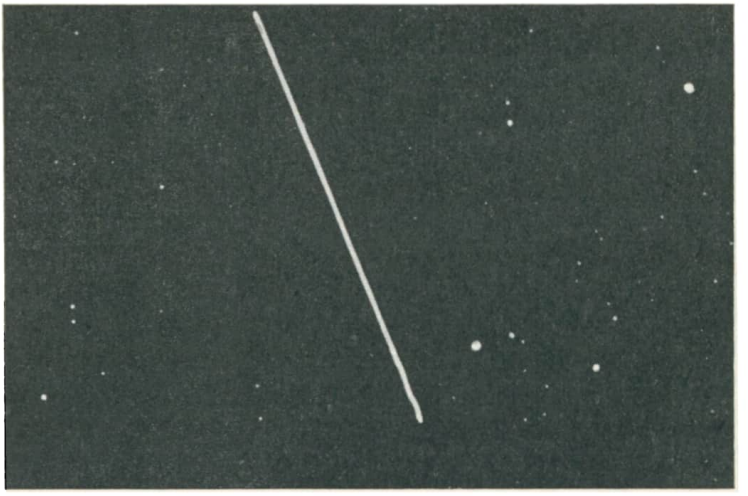
Geophysikalische Forschungsrakete der UdSSR

Ein großes Betätigungsfeld fänden auf dem Monde neben den Astronomen auch die Vertreter vieler anderer Fachwissenschaften, zum Beispiel die Physiker. Die Experimentalphysiker könnten auf dem Monde einen riesigen Teilchenbeschleuniger errichten – viel größer als auf der Erde –, mit dessen Hilfe man in der Erforschung der Materie und ihrer Zusammensetzung einen weiteren Riesenschritt vorwärts tun könnte. Denn das größte Hindernis beim Bau ähnlicher Einrichtungen auf der Erde ist die Evakuation dieser Geräte und Einrichtungen. Auf dem Monde steht ununterbrochen und „kostenlos" ein geradezu ideales Vakuum zur Verfügung. Auch wäre die Realisierung riesiger und schwerer Konstruktionen zu wissenschaftlichen Zwecken auf dem Monde wegen der dort herrschenden niedrigen Gravitation viel leichter und billiger. Nach der

Ansicht verschiedener Forscher wird eine langfristige Anwesenheit auf dem Monde für spätere Generationen auch viele biologische Vorteile haben. Sie meinen zum Beispiel, daß der dauernde Aufenthalt in einer Umgebung, in der eine geringe Gravitation herrscht, einen Einfluß auf die Langlebigkeit haben wird und daß die zukünftigen Mondbewohner vielleicht ein Alter von 200 bis 300 Jahren erreichen werden.

Wir sprechen hier von Dingen, die unseren Vorfahren noch vor Jahrzehnten viel zu phantastisch erschienen, als daß man sie ernst genommen hätte, an denen man aber heute nicht mehr zweifeln kann. Wir leben in einer Zeit, in der die erste Etappe von Weltraumflügen schon hinter uns liegt und sich das Tempo des menschlichen Vordringens in den Weltraum von Tag zu Tag steigert. Es ist noch nicht einmal ganz zwei Jahre her, als auf der internationalen Konferenz zur Vorbereitung des IGJ im Jahre 1957 zuerst das Projekt eines amerikanischen künstlichen Erdsatelliten angekündigt wurde, das man Mouse (Minimal Orbit Unmanned Satellite

Sowjetischer Sputnik, aufgenommen in der ČSSR



of Earth) und später Vanguard nannte. Gleichzeitig erfuhr man auch vom Projekt des ersten sowjetischen künstlichen Satelliten, das schon am 4. Oktober 1957 erfolgreich realisiert wurde. Obwohl in den darauf folgenden Monaten immer mehr künstliche Satelliten gestartet wurden, einerseits sowjetische und andererseits amerikanische (die sowjetischen überragten hauptsächlich durch das Gewicht und durch die Anzahl der Geräte, die sie beförderten), blieb das Projekt einer Mondrakete (Sonde) vorläufig nur auf dem Papier. Den ersten Versuch zum Start einer Mondrakete machten die Amerikaner am 17. August 1958; er verlief jedoch erfolglos. Die Rakete explodierte schon etwa 77 Sekunden nach dem Start in einer Höhe von etwa 16 km über der Erdoberfläche. Eine zweite Rakete (Pioneer I), die am 11. Oktober startete, erreichte zwar die Entfernung von 126740 km und erbrachte eine Reihe neuer Erkenntnisse über den interplanetaren Raum zwischen Erde und Mond, vermochte aber wegen einer verspäteten Zündung der dritten Stufe den Mond nicht zu erreichen und kehrte wieder zur Erde zurück. Auch der am 8. November durchgeführte dritte Versuch endete mit einem Mißgeschick. Der Grund war wieder das Versagen der Zündung der dritten Stufe. Alle diese drei Raketen hatten ursprünglich die Aufgabe, auf die Mondoberfläche zu gelangen. Die Mißerfolge nötigten die Amerikaner, sich bei künftigen Versuchen eine weitaus leichtere Aufgabe zu stellen, nämlich die, daß die letzte Raketenstufe nur in einer bestimmten Entfernung am Mond vorbeifliegt und zu einem künstlichen Sonnensatelliten wird. Diese Aufgabe sollte die am 6. Dezember gestartete vierstufige Rakete Juno II erfüllen. Diese Rakete entwickelte aber nicht die erforderliche Geschwindigkeit und fiel nach der Erreichung einer Entfernung von 107350 km von der Erde wieder auf die Erdoberfläche zurück...

Die Mißerfolge dieser ersten Versuche zur Erreichung des Mondes können uns keineswegs wundern; denn das Starten einer Rakete zum Mond ist eine weitaus schwerere und kompliziertere Aufgabe als das Auflassen eines künstlichen Erdsatelliten. Sein Gelingen

oder Mißlingen hängt von einer weitaus größeren Anzahl von Umständen ab. Es handelt sich doch hier um die Aufgabe, von der sich bewegenden Erde ein „Projektil" mit der Geschwindigkeit von mindestens 10,7 km/s nach einem ebenfalls bewegten Ziel zu schießen, dem Mond, der 384400 km entfernt ist. Das Gelingen dieses ganzen Unternehmens hängt von der Bahn ab, die die Rakete schon im Verlaufe der ersten Minuten nach dem Start einschlägt, also nach dem Erreichen einer Höhe von einigen Dutzend Kilometern; später kann man die Raketenbahn (wenigstens vorläufig) auf keine Weise mehr korrigieren, und die zulässigen Abweichungen für das Erreichen des Mondes sind sehr klein. So betragen sie für die Geschwindigkeit etwa 150 m/s, für die Richtung etwa nur den dritten Teil eines Grades. Und dabei ziehen wir gar nicht in Erwägung, daß das Mißlingen des ganzen Unternehmens auch schon von einem ganz „kleinen" technischen Fehler im eigentlichen Raketenmotor oder an anderer Stelle verschuldet werden kann. So hat zum Beispiel der sich aus etwa 100 Einzelheiten zusammensetzende Raketenmotor bei einer Zuverlässigkeit dieser Bestandteile von 95% eine Betriebssicherheit von nur 30%. Das bedeutet, daß nur 30% dieser Versuche die Chance auf gutes Gelingen haben. Wenn wir die Zuverlässigkeit der einzelnen Bestandteile auf 99,5% erhöhen, erhöht sich die Betriebssicherheit des Raketenmotors von 30% schon auf 64%. Aus diesem Beispiel ist am besten zu ersehen, wie sehr es bei den Versuchen zur Erreichung des Mondes neben der Genauigkeit des „Zielens" auf die Betriebssicherheit jedes einzelnen Bestandteiles der Rakete ankommt.

Die erste erfolgreich gestartete „Mond"-Rakete war die sowjetische kosmische Rakete vom 2. Januar 1959, deren letzte Stufe das Gebiet des Mondes erreichen sollte. Sie wog 1472 kp. Sie war mit einer Reihe von Geräten ausgerüstet, die zum Messen des Magnetfeldes des Mondes, zum Messen der Intensität der kosmischen Strahlung, zur Erforschung der Radioaktivität der Mondoberfläche, der Korpuskularstrahlung der Sonne u. a. bestimmt waren. Am 4. Januar um 3 Uhr 59 Minuten unserer Zeit näherte sich die sowjetische

Rakete der Mondoberfläche bis auf eine Entfernung von 6000 km, zog daran vorbei und entfernte sich dann immer weiter sowohl von der Erde als auch vom Mond. Am 5. Januar um 8 Uhr früh war die kosmische Rakete vom Mond schon 282000 km und von der Erde 597000 km entfernt. Gleichzeitig brach die Funkverbindung mit der Erde ab, weil die den Sender der Rakete speisende elektrische Batterie erschöpft war. Die Funkverbindung mit der Erde hatte volle 62 Stunden funktioniert. In dieser Zeit wurde eine große Zahl von Informationen über die Tätigkeit der in der Rakete installierten wissenschaftlichen Geräte gewonnen. Am 7. und 8. Januar ging die Rakete nach den Berechnungen (zu dieser Zeit war sie optisch überhaupt nicht mehr sichtbar) endgültig in eine elliptische Bahn über und wurde zu einem Satelliten der Sonne. Die sowjetische kosmische Rakete bewegt sich jetzt auf einer Bahn, deren Perihel (sonnennächster Punkt) von der Sonne 146400000 km und deren gegenüberliegender Punkt (Aphel) 197200000 km entfernt ist. Die Umlaufzeit dieses neuen „Planeten" beträgt 450 Tage und die Geschwindigkeit im Perihel 32 km/s, im Aphel 27,8 km/s.

Etwa zwei Monate später (am 3. März 1959) gelang auch den Amerikanern ein Start zum Mond, und zwar mit Hilfe einer Rakete Juno II. Im Kopf der letzten Raketenstufe war ein kleiner zylinderförmiger Satellit Pioneer IV mit einem Gewicht von 5,8 kg untergebracht, der sich 34 Stunden nach dem Start dem Mond bis auf eine Entfernung von 16000 km nähern sollte und dessen Hauptaufgabe es war, neben der Messung der Intensität der Sonnen- und kosmischen Strahlung die ersten Photographien von der Rückseite des Mondes zu liefern. Die Rakete wich aber von der errechneten Bahn um 4 Grad ab, so daß sie den Mond am 4. März um 23 Uhr 24 Minuten nicht in einer Entfernung von 16000, sondern von 59200 km passierte. Aus diesem Grunde erfüllte auch diese amerikanische Rakete ihre wissenschaftliche Aufgabe nicht hundertprozentig. Die Funkverbindung mit der Erde funktionierte bis zum 6. März 16 Uhr 24 Minuten (also volle 82 Stunden), als die Rakete von der Erde 660000 km entfernt war. Auch die amerikanische

Rakete erreichte schließlich eine Umlaufbahn um die Sonne. Die Entfernung des Perihels des amerikanischen „Planeten" beträgt 146 000 000 km, des Aphels 192 000 000 km, seine Umlaufzeit 392 Tage. Nach einer längeren, etwa 8 Monate währenden Pause wurde am 12. September 1959 in der Sowjetunion eine zweite kosmische Rakete in Richtung auf den Mond gestartet. Diese Rakete hatte diesmal die Aufgabe, sich nicht nur dem Mond zu nähern, sondern direkt ihr Ziel zu erreichen. Von der Mächtigkeit und Kraft dieser mehrstufigen sowjetischen Rakete zeugt am besten die Tatsache, daß ihre letzte Stufe (ohne Brennstoff) ein Gewicht von 1511 kp hatte und einen kugelförmigen, hermetisch abgeschlossenen Behälter (container) mit wissenschaftlichen Geräten in einem Gesamtgewicht von 390,2 kp trug. Sobald die Rakete ihre vorherbestimmte Bahn erreicht hatte, trennte sich dieser Behälter von der letzten Stufe und bewegte sich weiterhin auf einer selbständigen Bahn zum Mond. Der Versuch verlief erfolgreich. Schon am folgenden Tage, dem 13. September, um 22 Uhr 02 Minuten 24 Sekunden MEZ fiel der Behälter der zweiten kosmischen Rakete mit den wissenschaftlichen Geräten und Meßinstrumenten auf die Mondoberfläche. Das erste Mal in der Geschichte wurde ein Weltraumflug von der Erde zu einem anderen Himmelskörper verwirklicht.

Nach sowjetischen Pressemeldungen wurden zusammen mit dem Behälter der Rakete auch Wimpel mit den Staatsemblemen der Sowjetunion und der Aufschrift „Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken, September 1959" auf den Mond befördert. In dieser Nachricht wird weiter davon gesprochen, daß „entsprechende konstruktive Vorkehrungen getroffen wurden... um zu garantieren, daß die Wimpel beim Aufprall auf die Mondoberfläche nicht beschädigt werden". Diese Bemerkung ist sehr interessant, denn sie zeugt davon, daß die Sowjetunion hier offenbar erstmalig ein Hilfssystem zur Bremsung der Raketen ausprobieren wollte, ohne welches man sich in Zukunft eine „glatte" Landung weder eines automatischen Weltraumlabors noch einer Rakete mit lebender Besatzung auf dem Mond vorstellen kann.

Von der hohen Genauigkeit, mit der die sowjetischen Raketen auf ihre Bahn gebracht werden, zeugt unter anderem auch die Tatsache, daß die vorherberechnete Stelle des Aufpralls des Behälters der zweiten sowjetischen Weltraumrakete auf dem Mond sich sehr gut mit der Stelle des wirklichen Aufpralls deckte, der zusätzlich durch die Parameter der Raketenbahn festgestellt wurde. Als wahrscheinlicher Ort des Aufpralls wurde zuvor eine Gegend auf dem Mond in einer Entfernung von einem Viertel des Monddurchmessers um die Mitte der Mondscheibe, die Gegend Mare Serenitatis, Mare Tranquillitatis, Mare Vaporum umfassend, angegeben. Die Stelle des tatsächlichen Aufpralles liegt in einer Entfernung von 30 km östlich des Kraters Autolycus, im westlichen Teil des Mare Imbrium.

Nach den Nachrichten der Tagespresse wurde der Aufprall der zweiten kosmischen Rakete auf dem Mond auch visuell beobachtet, und zwar von Miklos Lovas und Doktor Julia Balász in der Sternwarte der Ungarischen Akademie der Wissenschaften zu Budapest, die am 13. September um 22 Uhr 2 Minuten zuerst einen schwarzen Punkt oder besser Ring sahen, der sich in einen grauen Fleck verwandelte. Es war dies wahrscheinlich eine durch den Aufprall der Rakete aufgewirbelte Staubwolke. Mit einem großen Teleskop konnte man noch nach einer halben Stunde an dieser Stelle einen Nebel beobachten, der seine Form veränderte (Rudé Právo vom 15. September 1959). Ähnliche Meldungen kamen auch aus England, Österreich und Schweden. K. Stanjukowitsch und O. Dlushnjewskaja (Komsomolskaja Prawda vom 22. Oktober 1959) schließen daraus, daß der Aufprall des Behälters und der letzten Stufe der zweiten sowjetischen Weltraumrakete auf dem Mond, der mit einer Geschwindigkeit von 3,3 km/s geschah, aus der Mondoberfläche eine Wolke von Gasen, Staub und kleinen Bruchstücken von Mineralien emporhob, die mit ihrer Masse die Masse des Behälters und der Raketenstufe um ein Mehrtausendfaches übertraf. Staub und Splitter wurden nach ihren Berechnungen etwa 3000 km weit geschleudert, und die maximale Höhe der Wolke betrug 500

bis 900 km. In letzter Zeit äußern verschiedene Forscher auch in der Sowjetunion hinsichtlich der Beobachtung des Auftreffens der Hülse der zweiten sowjetischen kosmischen Rakete auf dem Mond eine gewisse Skepsis. Auf dem im Dezember 1960 in Leningrad abgehaltenen Symposium über den Mond wurde vor allem darauf hingewiesen, daß die auf dem Mond aufgewirbelte Staubwolke sich bei der Beobachtung von der Erde her als heller Fleck zeigen müßte (aber nicht als dunkler Punkt oder grauer Fleck, wie ihn die ungarischen und anderen Beobachter sahen); denn eine solche Staubwolke müßte das Sonnenlicht bedeutend stärker zerstreuen als die eigentliche Mondoberfläche.

Wenn an der Stelle des Aufpralls eine genügend starke Staubschicht lag, konnte es zur Entstehung von Kratern (Gruben) mit einem Durchmesser von 90 Metern (Behälter) und 130 Metern (Raketenstufe) kommen. Bei härterer felsiger Unterlage konnten an der betreffenden Stelle der Mondoberfläche Krater mit einem Durchmesser um 10 Meter und 15 Meter entstehen.

Eines der interessantesten der inzwischen publizierten Ergebnisse des Septemberversuches ist die Feststellung, daß der Mond wohl kein so starkes Magnetfeld aufweist wie die Erde. In der kosmischen Rakete befand sich außer anderen wissenschaftlichen Geräten auch ein Magnetometer mit einer Empfindlichkeit von etwa 60 γ (Einheit der Intensität von Magnetfeldern), das kein Magnetfeld verzeichnete. Daraus kann man allerdings noch nicht schließen, daß der Mond überhaupt kein Magnetfeld besitzt, wie in einigen Nachrichten unserer Tagespresse behauptet wurde. Das in der sowjetischen Rakete beförderte Magnetometer war mit einer sogenannten elektromagnetischen Sonde versehen und auf die Registrierung der sogenannten Totalintensität des Magnetfeldes eingerichtet. Für das Aufzeichnen des Magnetfeldes auf dem Mond war unter anderem auch die Orientierung der genannten Magnetsonde zur Richtung der magnetischen Kraftlinien besonders wichtig. In bestimmten Fällen ungünstiger Orientierung der Magnetsonde konnte also leicht der Fall eintreten, daß das Gerät ein Magnetfeld nicht anzeigte,



Radioteleskop in Berlin-Adlershof

obwohl es vielleicht existiert. Das Magnetfeld der Erde fängt elektrisch geladene Teilchen (Korpuskularstrahlung) ein, die aus dem kosmischen Raum – vor allem von der Sonne – zu unserem Planeten strömen. Es zwingt sie zum Umlauf um die Erde. Dabei entstehen um unseren Planeten Ringe, die aus schnell fliegenden Materieteilchen bestehen und einen Gürtel erhöhter Strahlungsintensität bilden, wie erstmalig durch die künstlichen Satelliten festgestellt wurde. Jeder Körper, zum Beispiel auch eine Rakete, wird innerhalb dieses Gürtels von den genannten Teilchen bombardiert. Bei diesen Aufschlägen entsteht eine durchdringende ultrakurzwellige elektromagnetische Strahlung, deren Intensität, sofern die Bestrahlung längere Zeit andauert, für den Menschen tödlich ist. Es wurde festgestellt, daß der Gürtel der erhöhten Strahlung seine größte „Dichte" etwa in einer Höhe von 10000 km über der

Erde hat und daß seine äußere Grenze noch etwa fünfmal weiter entfernt liegt. Die zweite sowjetische kosmische Rakete stellte uns vor ein neues, völlig unerwartetes Problem. Die in dem Raketenbehälter befindlichen Ionenfänger verzeichneten in einer Höhe von etwa 10000 km über der Mondoberfläche plötzlich eine erhöhte Ionenkonzentration. Es ist möglich, daß sich in dieser Höhe um den Mond eine Ionosphäre ausbreitet oder ein ähnlicher Ring gefährlicher Strahlung vorhanden ist, wie er auch um unseren Planeten festgestellt wurde. Diese Feststellung würde aber dann dem widersprechen, was andererseits vom Mondmagnetismus bekannt ist, zumal es in diesem Falle notwendig wäre, daß der Mond ein genügend starkes Magnetfeld hätte, etwa wie unsere Erde. Wenn aber der Mond kein solches Feld aufweist, ist es unerklärlich, welche Kräfte die elektrisch geladenen Teilchen (Korpuskularstrahlen) auf ihrer Bahn um den Mond halten können. Auf diese Frage werden uns erst weitere Raketenversuche Auskunft geben können.

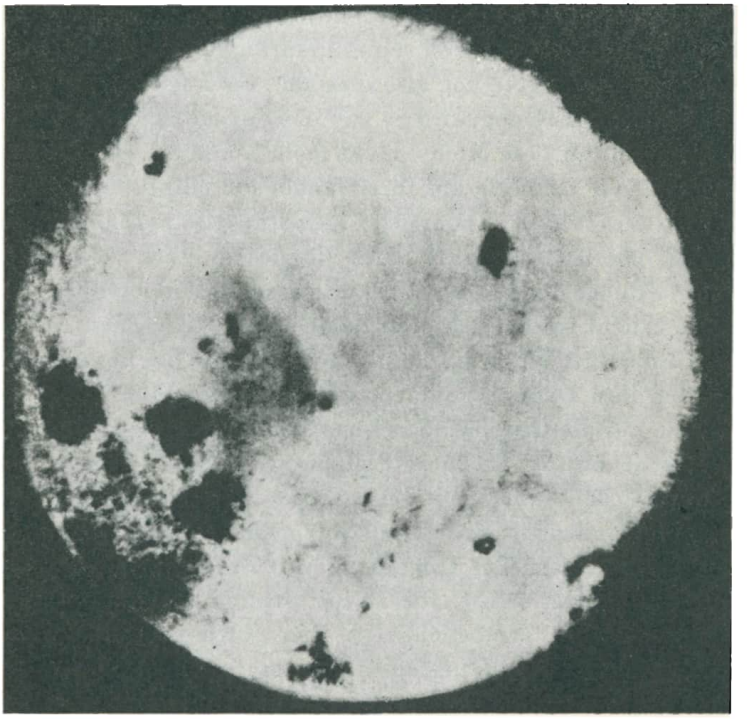
Die Überraschung über diese bedeutenden Erfolge des sowjetischen Versuches vom September hielt in der Welt noch an, als am 4. Oktober in der Sowjetunion eine dritte kosmische Rakete gestartet wurde. Ihre Endstufe wog diesmal 1553 kp (ohne Brennstoff), und die Nutzlast, das Gewicht des Behälters mit den Geräten und Meßeinrichtungen, betrug 435 kp. Es handelt sich hier nicht mehr nur um eine Hülse mit Geräten, sondern schon um eine reich ausgestattete automatische interplanetare Station. Auch die Aufgabe war diesmal bedeutend anspruchsvoller. Diesmal sollte nicht nur der Mond erreicht werden, sondern die interplanetare Station sollte ihn umfliegen und dann zur Erde zurückkehren. Auch dieser Versuch verlief erfolgreich, und das Ergebnis entsprach voll dem ursprünglichen Plan. Die Station erreichte am 6. Oktober die Entfernung des Mondes, und am gleichen Tage um 15 Uhr 16 Minuten unserer Zeit passierte sie ihn in einer Entfernung von etwa 6000 km. Dann entfernte sie sich weiter von der Erde, aber auch vom Mond; ihre Bahn begann sich gleichzeitig unter dem Einfluß der Anziehungskraft des Mondes langsam zu krümmen. Am 6. Oktober

um 20 Uhr betrug die Entfernung der Station vom Mond nach den gewonnenen telemetrischen Angaben schon 15000 km. Ihre Verbindungslinie zur Mondmitte ging auf dem Mond durch einen Punkt mit den Koordinaten $\lambda = 137\,°$, $\beta = -12\,°$; dieser Punkt liegt also schon auf der abgewandten, von der Erde aus unsichtbaren Halbkugel des Mondes. Am 7. Oktober um 18 Uhr betrug die Entfernung der Station vom Mond schon 126000 km und von der Erde 417000 km. Ihre maximale Entfernung von der Erde, nämlich 470000 km, erreichte die Station am 10. Oktober. Dann begann sie ihren Rückweg zur Erde. Am stärksten näherte sie sich ihr am 18. Oktober, wo nach A. Michailow die Entfernung der Station vom Zentrum unseres Planeten 47500 km betrug. Nachdem die Station die Erde umflogen hatte, begab sie sich erneut auf den Weg zum Mond, oder besser gesagt in die Gegend der Mondbahn, denn der Mond hatte sich inzwischen von seiner ursprünglichen Stelle schon lange entfernt. Die Rakete flog also diesmal „ins Leere". Nach den vorliegenden Berechnungen wird es zu einer neuen engeren Begegnung der Station mit dem Monde nicht mehr kommen. Die Station wird insgesamt elf Umläufe auf ihrer länglichen elliptischen Bahn um die Erde absolvieren. Dann wird sich ihre Umlaufbahn unter dem Einfluß der Anziehungskraft des Mondes so stark verändern, daß sich ihr erdnächster Punkt sehr stark unserem Planeten nähert. Die Station taucht in die dichteren Schichten der irdischen Atmosphäre ein und endet darin auf ähnliche Weise, wie die künstlichen Erdtrabanten ihre Bahn beendeten, teilweise „verglüht" sie, teilweise fällt sie auf die Oberfläche unseres Planeten zurück.

Die sowjetische automatische interplanetare Station sandte mit Hilfe automatischer Funkverbindungen eine Menge wertvoller und einzigartiger Angaben zur Erde, und zwar nicht nur über die physikalischen Eigenschaften der Umgebung von Erde und Mond, sondern auch des Mondes selbst. Das in der Station eingebaute automatische Photolabor ermöglichte es den sowjetischen Wissenschaftlern, die ersten photographischen Aufnahmen der abgewandten Mondseite zu erhalten. Diese Aufnahmen wurden am

7. Oktober gemacht, zu einer Zeit, als die Station vom Mond 60000 bis 70000 km entfernt war, was etwa den sechsten Teil der Entfernung zwischen Mond und Erde ausmacht. Die Station bewegte sich zu dieser Zeit mit einer Geschwindigkeit von etwa 700 m/s durch den Raum. Zum Aufnehmen der Bilder des Mondes auf den Film (35-Millimeter-Film) wurden zwei spezielle photographische Objektive mit einer Brennweite von 200 mm und 500 mm verwendet. Die Größe der Originalbilder war demnach etwa 11 mm und 27 mm. Die Aufnahmen mußten automatisch entwickelt, fixiert. gewässert und getrocknet werden, und das alles unter den schwierigen Bedingungen der Schwerelosigkeit. Dann

Sowjetische Aufnahme von der Rückseite des Mondes

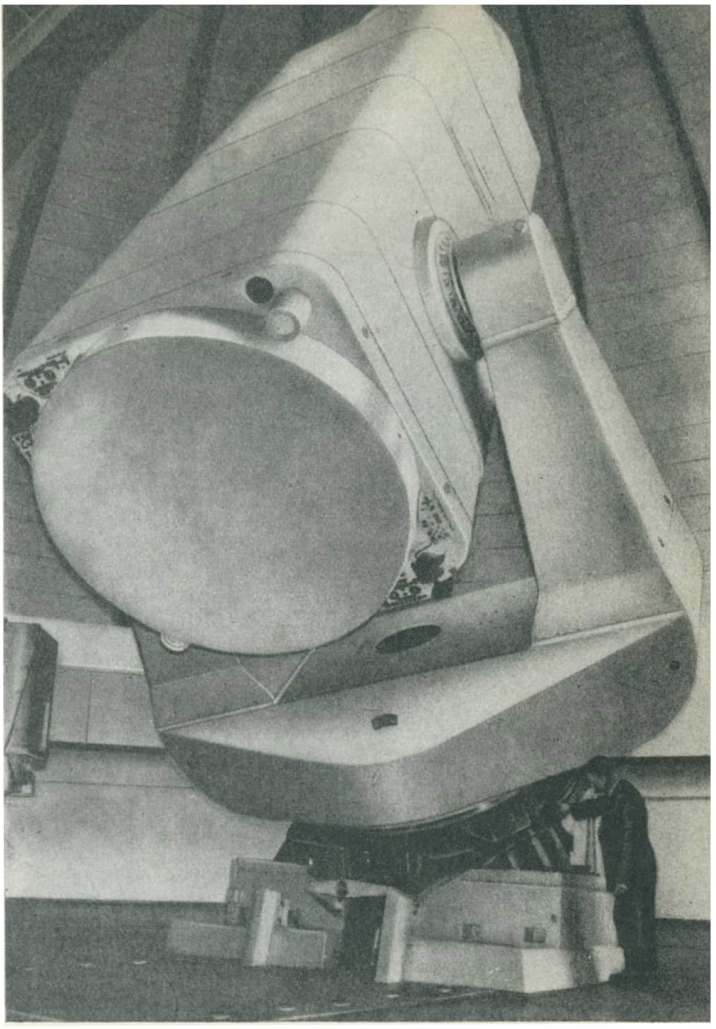




Nach der Aufnahme angefertigte Karte

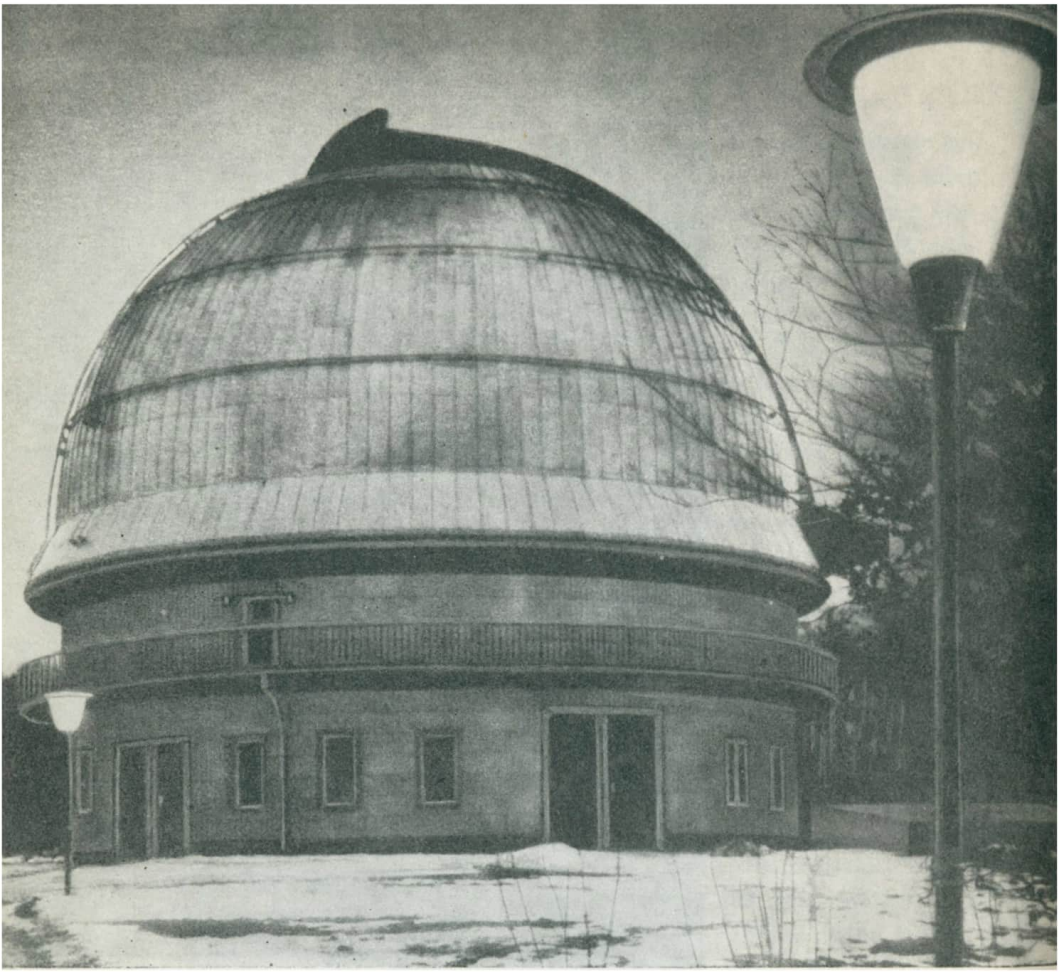
wurden sie auf kompliziertem Wege in elektromagnetische Impulse umgewandelt und auf Funkwellen über eine Entfernung von fast 500000 km zur Erde befördert, wo man sie auf einem ebenso komplizierten Wege in Photographien zurückverwandelte. Wie bekannt wurde, sind die vom Mond gewonnenen Bilder von irdischen Stationen mittels vier voneinander unabhängiger Methoden registriert worden; die Bilder wurden mit einer photometrischen Skala versehen. Wie J. Klepešta und A. Rükl (Říše hvězd, 12/1959) meinen, ermöglicht das eine zuverlässige Bestimmung der erfaßten Formationen und ein objektives Vergleichen der hellen und dunklen Flekken, das man nicht mit Hilfe von Bildern durchführen kann, die durch eine mehrfache Reproduktion verzeichnet sind. Es ist verständlich, daß die Bilder von der abgewandten Mondseite, die durch

die automatische Weltraumstation hergestellt wurden, nicht wie gewöhnliche Photographien eingeschätzt werden können, die in aller Ruhe und mit aller Bequemlichkeit irdischer astronomischer Observatorien gemacht werden, die mit aller modernen Technik ausgestattet sind, vor allem mit großen leistungsfähigen Fernrohren, die vollendet ausgewogen und mit einer Reihe von mechanischen und optischen Hilfseinrichtungen versehen sind. Von diesem Gesichtspunkt aus wird sich vielleicht kommenden Generationen zwischen diesen ersten Photographien der Mondrückseite und künftigen Bildern, die mit Hilfe einer besseren Technik gewonnen werden, ein solcher Unterschied zeigen, wie er sich uns zwischen den ersten Mondaufnahmen aus der Hälfte des vergangenen Jahrhunderts von J. W. Draper und anderen und den späteren Aufnahmen der Lick- oder Yerkes-Sternwarte darbietet. Im Hinblick auf den Entwicklungsstand der Raketen und der übrigen Technik stellen diese Photographien allerdings ein Maximum an derzeitigen Möglichkeiten dar. Man muß sich vergegenwärtigen, daß die Photographie der Mondrückseite durch die sowjetische automatische interplanetare Station überhaupt die erste Photographie eines fremden kosmischen Körpers ist, die direkt aus dem Weltraum gewonnen wurde, und daß sie schon deshalb nicht wie die üblichen astronomischen Photographien aussehen kann, die wir durch die irdische Atmosphäre hindurch aufnehmen, da diese – wie uns bekannt ist – in diesem Falle wie ein Filter ganz besonderer Eigenschaften (ultravioletter Absorption und Absorption in anderen Wellenlängen) wirkt. Wir machten mit J. Klepešta von der Sternwarte auf dem Petřín einen Versuch mit einer mehrfachen Übertragung der Photographie des Vollmondes, die von der Erde gemacht wurde, und erreichten damit ganz ähnliche Effekte wie bei den durch Fernsehen übertragenen Bildern. So erscheinen zum Beispiel die hellen Flecken der von Kratern übersäten Kontinente auf unseren Bildern wie ganz helle kontrastlose Flächen, während Meere und andere dunkle (graue) Flächen, z. B. einige Sümpfe und der Boden der großen Wallebenen, wie sehr intensive, fast schwarze Flecken aussehen.



Das neue Teleskop im Observatorium bei Jena

Es sind Meinungen aufgetaucht, daß die hellen kontrastlosen oder wenig kontrastreichen Flächen, die auf den sowjetischen Photographien von der Rückseite des Mondes festgehalten sind, als glatte, von allen Unebenheiten befreite Oberfläche anzusehen sind, also als Landschaftstyp, der auf der uns zugewandten Mondseite überhaupt nicht vorkommt. Viele Autoren versuchten gleich in den



Observatorium bei Jena

ersten Tagen nach Veröffentlichung dieser Photographien neue Hypothesen zu unterbreiten, die diese Tatsache in annehmbarer Weise erläutern könnten. Ich halte diese Ansicht für unrichtig und meine, daß Aufnahmen dieser Gegend des Mondes, die man in der Zukunft unter geeigneteren Lichtverhältnissen (im ersten oder letzten Viertel) machen wird, uns davon überzeugen werden, daß es sich um ein mit Kratern bedecktes Gebirgsterrain handelt, etwa von gleicher Art, wie wir es aus der uns zugewandten Seite des

Mondes, zum Beispiel aus der Gegend des südlichen Nordpoles, kennen. Aber auch so ist es verständlich, daß auf der abgewandten Mondseite offenbar weit weniger Meere als auf der bisher bekannten Seite des Mondes liegen und daß dort deutlich die im Umfang kleineren runden Meere vom Typ des „kraterförmigen" Moskauer Meeres überwiegen. Es ist interessant, daß dieser Umstand, den frühere Forscher nicht geahnt hatten (beginnend bei Franz, der sich irrtümlich vorstellte, daß jede Vertiefung auf der sichtbaren Seite einer gebirgigen Erhebung auf der gegenüberliegenden Mondseite entspricht), vor ganz kurzer Zeit von I. M. Lewitt vorhergesagt worden war (What is topography of Moon's other side? Missiles and Rockets 1959, 5, N^0 7, 14···25), der auf der Grundlage von Ureys Hypothese von der Entstehung der Meere durch Zusammenprall mit einem Schwarm von Planetoiden zu dem Schluß kam, daß auf der abgewandten Mondseite wahrscheinlich nur kleinere isolierte Meere vom Typ des Mare Crisium zu finden sein werden und daß der größte Teil der anderen Mondhälfte von einem von Kratern übersäten hellen Festland bedeckt sein wird. Dieser Aufsturz-Hypothese von der Entstehung der Mondmeere neigt sich jetzt auch auf der Grundlage der gewonnenen Aufnahmen von der Mondrückseite – wenigstens soweit man das nach den Meldungen der Tagespresse entnehmen kann – B. J. Lewin zu, der meint, daß die Meere auf dem Mond im Ergebnis einer riesigen Katastrophe, dem vor nicht langer Zeit erfolgten Zusammenprall des Mondes mit einem großen kosmischen Körper, entstanden seien.

Das Studium der Photographien der Mondrückseite, die wir der sowjetischen automatischen interplanetaren Station verdanken, erfordert viel Zeit – bis wir sie vollständig verstehen und bis wir endgültig die Frage beantworten können, was sie der Wissenschaft Neues brachten. Den Ereignissen vorzugreifen und schon jetzt neue Hypothesen aufzustellen, kann nur zu spekulativen Einfällen führen, wie es sie in letzter Zeit – besonders in der Tagespresse und in verschiedenen Rundfunksendungen – mehr als genug gab. So äußerte zum Beispiel in einer Rundfunkunterhaltung der Kandidat



Ort des Auftreffens von Lunik II auf dem Mond

der Pädagogischen Wissenschaft F. Sigel die Meinung, daß die Verschiedenheit des Anblickes der bekannten und der abgewandten Mondhälfte dadurch hervorgerufen wird, daß die abgewandte Mondseite keine Verfinsterung erfährt. „Wenn der Erdschatten über die Mondoberfläche läuft, sinkt die Temperatur auf seiner Oberfläche um 250 °C. Das führte und führt zu Rissen in der Mond-

oberfläche. Aus den Spalten fließt Lava, und es kommt zu einer viel intensiveren Kraterbildung auf der der Erde zugewandten Seite." Wie unsinnig diese „Hypothese" ist, erhellt schon aus den Darlegungen jenes Kapitels dieses Buches, das der Temperatur und den Temperaturveränderungen auf dem Mond gewidmet ist. Es ist doch genügend bekannt, daß die starken Temperaturunterschiede nicht nur bei Verfinsterung, sondern auch zwischen Tag und Nacht auf dem Mond lediglich die verhältnismäßig sehr dünne obere „Isolations"-Schicht berühren und daß sie mit größter Wahrscheinlichkeit nicht tiefer als wenige Millimeter unter die Mondoberfläche

Der sowjetische Professor Leonid Sedow



dringen, so daß von der Bildung von Spalten und dem damit verbundenen Lava-Austritt keine Rede sein kann.

Es kann nicht der geringste Zweifel darüber herrschen, daß es möglich sein wird, schon in nächster Zeit in dieser Richtung weiter zu kommen, und daß das Tempo der Erforschung des Mondes sich jetzt um ein Vielfaches steigert und bald zum Ziel führt. Die gegenwärtigen Bemühungen um die Benutzung künstlicher Satelliten und kosmischer Raketen zur Erforschung des Mondes sollen in den nächsten Jahren in der Verwirklichung eines sogenannten internationalen Mondlabors gipfeln, kurz LIL genannt (Lunar International Laboratory), über dessen Projektierung man auf dem XI. Kongreß der Internationalen Astronautischen Föderation im August 1958 verhandelte. Das soll eine kleine, vollendet ausgestattete und automatisch arbeitende wissenschaftliche Station sein, die mit Hilfe einer ausreichend starken kosmischen Rakete auf den Mond transportiert wird und dort die ersten direkten Untersuchungen der Mondoberfläche vornimmt. Mit Hilfe neuer sowjetischer kosmischer Raketen wird es zweifellos schon in absehbarer Zeit möglich sein, ein großes kosmisches Laboratorium auf der Mondoberfläche zu landen und später auch Menschen nach dem Mond zu fliegen. Die von unserer Erde aus gewonnenen Mondaufnahmen werden sicher schon bald durch viel vollkommenere Aufnahmen von interplanetaren Stationen oder künstlichen Mondtrabanten aus oder sogar durch Aufnahmen auf dem Mond direkt ersetzt werden.

LITERATUR

Alter, D.: Nature of the lunar rays. P. A. S. P. *67*, 237, 1955.

Alter, D.: A suspected partial obscuration of the floor of Alphonsus. P. A. S. P. *69*, 158, 1957.

Alter, D.: The nature of the domes and small craters of the Moon. P. A. S. P. *69*, 245, 1957.

Alter, D.: Peculiar features of the lunar surface. P. A. S. P. *70*, 489, 1958.

Anděl, K.: Mappa selenographica. Praha 1926.

Arthur, D. W.: A note on fixing the position of ray centres on the averted lunar hemisphere. J. B. A. A. *66*, 141, 1956.

Baldwin, R. B.: The Face of the Moon. Chicago 1949.

Barabaschew, N. P.: Исследование физических условий на луне и планетах. Charkow 1952.

Beals, C. S., Ferguson, G. M., Landau, A.: A search for analogies between lunar and terrestrial topography on photographs of the Canadian shield. J. Roy. Astr. Soc. Can. *50*, 203, 1956.

Beals, C. S.: Fossil meteorite craters. Scientific American 1,1, July 1958.

Beer, W., Mädler, J. H.: Der Mond. Berlin 1837.

Bonev, N.: Sur le contour des continents terrestres. Influence probable de la Lune. A. N. *284*, 155, 1958.

Budějický, J.: Rádiové ozvěny od Měsíce. Slaboproudý obzor *20*, 1, 1959.

von Bülow, K.: Selenotektonik und Geotektonik. Stuttgart 1956.

Chabakow, A. W.: Об основных вопросах истории развития поверхности луны. Moskau-Leningrad 1949.

Cimino, M.: Fortini, T.: Fotometria fotografica dell'eclisse totale di Luna del 29 gennaio 1953... Rend. Accad. Naz. Lincei ser. VIII., vol. XIV, 619, 1953.

Cimino, M., Fresa, A.: Fotometria fotoelettrica dell'eclisse totale di Luna del 13—14 maggio 1957. Rend. Accad. Naz. Lincei ser. VIII., vol. XXV., 1—2, 58, 1958.

Darney, M.: Les aires élliptiques ou circulaires de la Lune. L'Astronomie *44*, 456, 1930.

Darney, M.: Le système Imbrien. L'Astronomie *47*, 452, 1933.

Darney, M.: Le cirque lunaire Copernic et son systeme d'aires élliptiques. L'Astronomie *54*, 172, 1940.

Dietz, R. S.: The meteoritic impact origin of the Moon's surface features. Journal of Geol., 1946.

Dittrich, A.: Slunce, Měsíc a hvězdy. Praha 1931.

Dittrich, A.: Praehistorie našeho hvězdářství. Praha 1931.

Dittrich, A.: Zrození astronomie. Stará Ďala 1935.

Dollfus, A.: Recherches d'une atmosphère autour de la Lune. Ann. d'Astroph., *19*, 71, 1956.

Dubois, J.: Peut-on observer sur la Lune des phénomènes de luminiscence? L'Astronomie *70*, 225, 1956.
Dubois, J.: Sur l'existence de la luminiscence lunaire. Journ. de Phys. *18*, 13, 1957.
Dubois, J.: Contribution a l'étude de la luminiscence lunaire. Rozpravy ČSAV, Praha 1959.
Edwards, W. F., Borst L. B.: Possible of lunar atmosphere. Science 3294, 1958.
Ebert, H.: Über die Ringgebirge des Mondes. Leipzig 1900.
Engel, K. H.: Crystalization and the Moon's surface. Sky and Telescope, *9*, 6, 1949.
Eropkin, D. J.: Über die Extinktion des Lichtes in der Jupiteratmosphäre. Zeitschr. f. Astroph. *3*, 163, 1931.
Escher, B., Three, G.: Caldera-shaped accident: volcanic calderas meteoric scars and lunar cirques. Bull. volcanol., 1955, 16.
Fauth, Ph.: Unser Mond. Breslau 1936.
Fessenkow, W. G.: Современные представления о вселенной. Moskau-Leningrad 1949 (Tschechisch: Dnešní představy o vesmíru, Praha 1951).
Fessenkow, W. G.: Certain problems of meteoritics and astronomy. Meteoritica XVI, 1958.
Fessenkow, W. G., Oparin, A. I.: Život ve vesmíru. Praha 1958.
Fielder, G.: A study of the Valley system radial to M. Imbrium. JBAA, *66*, 26, 1955.
Fielder, G.: Some aspects of some lunar ray streams and the discrete nature of rays. JBAA, *66*, 223, 1956.
Fielder, G.: Le fond de la rainure Aridaeus. L'Astronomie, *70*, 383, 1956.
Fielder, G.: Dynamical problems connected with the formation of the lunar ridges and valleys. JBAA, *67*, 60, 1957.
Firsoff, V. A.: On the tectonic grids of the Moon. JBAA, *67*, 309, 1957.
Firsoff, V. A.: Paleography of the Nubian and Imbrian Plains. JBAA, *67*, 130, 1957.
Fischer, F.: Problém „mostu" ve východním valu M. Crisium. R. H. *38*, 181, 1957.
Fischer, F., Fischer, K.: Měsíční vulkanismus. Vesmír 4, 1959.
Franz, J.: Der Mond. Leipzig 1906.
Fremlin, J. H.: Volcanoes on the Moon. Nature, *183*, 239, 1959.
Du Fresne, E. R.: Note on the high relief of the lunar maria. Astroph. J. *124*, 638, 1956.
Gale, S. I., Megson, F. H.: Lunar craters in the laboratory. Sky and Telescope *9*, 7, 1949.
Gaydon, A. G., Learner R. C. M.: Simulation of lunar craters: a Blow-hole theory. Nature *183*, 37, 1959.
Gerstenkorn, H.: Über Gezeitenreibung beim Zwei-Körperproblem. Zeitschr. Astroph., *36*, 245, 1955.
Gibson, J. E.: Lunar Thermal Radiation at 35 KMC. Proc. IRE 1958.
Gilvarry, J. J., Hill, J. E.: The impact theory of the origin of lunar craters. P. A. S. P., *68*, 223, 1956.
Gilvarry, J. J.: Nature of the lunar surface. Nature *180*, 911, 1957.
Gold, T.: The lunar surface. Month. Notices Roy. Astr. Soc. *115*, 585, 1955.

Goodacre, W.: The Moon. Waratah 1931.
Hopmann, J.: Selenodätische Untersuchungen. Mitt. d. Univ.-Sternwarte Wien. *6*, Nr. 3, 1952.
Iwanowa, I. W.: Луци лунных кратеров и эллиптические образования. Bulletin VAGO, 17/24/1956.
Kaidanowski, H. L., Turusbekow, M. T., Chaikin, S. E.: Тепловое радиоизлучение луны, Тр. 5-го совещания по вопр. космогонии 1955, изд. АНСССР.
O'Keefe, J. A.: Lunar rays. Astroph. J. *126*, 466, 1957.
Kettner, R.: Všeobecná geologie I-III. Praha 1941—48.
Komarow, W.: „Всё ли знаем о луне." Vortrag im Moskauer Rundfunk am 6. 1. 1959.
Kopal, Z.: Volcano on the Moon? The New Scientist, November 27, 1958.
Kopal, Z.: Origin of the lunar craters and maria. Nature *183*, 169, 1959.
Kosyrew, N. A.: Люминесценция лунной поверхности и интенсивность корпускулярного излучения солнца, издств. Крим. Астрофиз. обсерв. 16, 148, 1956.
Kosyrew, N. A.: Observation of a vulcanic process on the Moon. Sky and Telescope, XVIII, 4. February 1959.
Kosyrew, N. A.: Вулканическая деятельность на Луне. Природа, 3, 1959.
Landerer, J. J.: Sur l'angle de polarisation de la lune. C. R. 1889.
Landerer, J. J.: Sur la polarisation de la lumière lunaire. C. R. *150*, 1164, 1910.
Landerer, J. J.: Sur l'angle de polarisation des roches ignées et sur les premières déductions sélénologique qui s'y rapportent. C. R. 1890.
Link, F.: Sur les éclipses de satellites de Jupiter. C. R. *200*, 2063, 1935.
Link, F.: Sur la luminiscence lunaire. C. R. 1946.
Link, F.: Théorie photometrique de la pénombre pendant les éclipses de Lune. Cas. pro pest. mat. a fyz. *72*, 65, 1947, Praha.
Link, F.: Relations entre les phénomènes solaires et terrestres. Colloque de Lyon, 1947, Ed. Revue d'Optique 1949.
Link, F., Široký, J.: Discussion photométrique des récentes éclipses de Lune. B. A. C. *2*, 86, 1950.
Link, F.: Variations lumineuse de la Lune. B. A. C. *2*, 131, 1950.
Link, F.: Die Mondfinsternisse. Probleme der kosmischen Physik. Akad. Verlags-Ges., Leipzig 1956.
Link, T. A.: Whence came the hydrocarbons? Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geology, 1957, 41, 7.
Loewy, Puiseux: Atlas photographique de la Lune puplié par l'Observatoire de Paris. Paris 1896—1910.
Longauer, F.: Po stopach kultu Mesiaca v Podunajsku. R. H. *4*, 1958.
Lyot, B.: Recherches sur la polarisation de la lumière des planètes et de quelques substances terrestres. Ann. de l'Obs. de Meudon, *8*, 1929.
Markow, A.: О физических особенностях лунной поверхности и возможных её изменениях, издтсв. Глав. астр. обс. в Пулкове, 1952.
Matoušek, O.: Geologie krajiny Sinus Iridum na Měsíci. Ř. H. 1924.
Matoušek. O.: Die Gegend Sinus Iridum am Monde. Zentralbl. f. Mineral. 1924.

Matoušek, O.: Tectonics of the Moon. Pan American Geologist 1930.
McCorkle, K. E., Lambert, W. C.: Flares on the Moon? Sky and Telescope *15*, 45, 1955.
Moore, P.: Lunar Summit Craters. J. B. A. A. *64*, 34, 1953.
Moore, P.: Life on the Moon? Irish Astr. J., *3*, 133, 1955.
Nasmyth, J., Carpenter, J.: The Moon. London 1874.
Neison, E.: The Moon. London 1876.
Neustupný, J.: Náboženství pravěkého lidstva v Čechách a na Moravě. Praha 1940.
Neustupný, J.: Pravěk lidstva. Praha 1946.
Nininger, H. H.: The Moon as a source of tektites. Sky and Telescope *2*, 8, 1943.
Oberndorfer, H.: Das Problem der „Mondbrücke". Die Sterne *31*, 59, 1955.
Öpik, E. J.: The origin of the Moon. Irish Astr. J., *3*, 245, 1955.
Öpik, E. J.: Meteor Impact on solid surface. Irish Astr. J. *5*, 14, 1958.
Öpik, E. J.: On the Catastrophic effects of collisions with celestial bodies. Irish Astr. J., *5*, 34, 1958.
Pastorff, C. J. G.: Über den Mondfleck Alhazen. Astr. Jahrbuch f. d. Jahr 1827. Berlin 1824.
Pawsey, J. L., Bracewell, R. N.: Radio astronomy. Oxford 1955.
Pickering, W. H.: The Moon. New York 1903.
Piddington, J. H.: Minnett, H. C.: Microwave thermal radiation from the Moon. Austr. J. Sci. Res., A 2, 1949.
Proctor, R. A.: The Moon. London 1873.
Quiring, H.: Gedanken über Alter, Zusammensetzung und Entstehung des Mondes. Zeitschr. d. deutsch. Geol. Ges., 98, 1946.
Rükl, A., Příhoda, P.: Dno kráteru Archimedes. Ř. H. 32, 105, 112, 1951.
Sabanejew, P. F.: О происхождении лунных цирков. WAGO 13 (20), 1953.
Sabanejew, P. F.: К вопросу о происходении мелких кратеров на поверхности луны, WAGO 16 (23), 1955.
Sabanejew, P. F.: Результаты моделирования лунных цирков в исловиче вакуума, WAGO 27 (24), 1956.
Sabanejew, P. F.: Результаты моделирования при пониженной силе тяжести, WAGO 21 (28), 1958.
Sadil, J.: Měsíc. Praha 1953.
Sadil, J.: On the so-called "Lunar Bridge". B. A. C., VIII 33, 1956.
Sadil, J.: Nové příspěvky k otázce vzniku povrchových útvarů na Měsíci. Ř. H. 2, 1958.
Schwinner, R.: Die hellen Strahlensysteme des Mondes, geologisch gedeutet. A. N. *274*, 137, 1943.
Singer, S. F.: The origin and age of meteorites. Irish Astr. J. *4*, 165, 1957.
Sinton, W.: Observations of solar and lunar radiation at 1,5 mm. J. Optical Soc. America *45*, 975, 1955.
Soják, F.: Astronomická orientace únětických hrobů. Archeologické rozhledy, Praha, XI., 1959.

Spurr, J. E.: Geology, applied to the Selenology; the Imbrian Plain region of the Moon. I., II. Lancaster 1944.
Struve O.: The making of the Barrington Meteorite Crater. Sky and Telescope, *18*, 187, 1959
Sytinskaja, N. N.: Луна и её наблюдение. Moskau 1956.
Sytinskaja, N. N.: De quoi la Lune est-elle couvert? Kosmos News papers of the Organizing Committee for the Xth General Assembly of the Int. Astr. Union, 4, 1958.
Sytinskaja, N. N.: Новые материалы по метеор-шлаковой теории образования наружного покрова лунной поверхности. A. ЮС. XXVI, 2, 1959.
Scharonow, W. W.: Природа планет. Moskau 1958.
Šimon, R.: Seznam lokalit meteorických kráterů. Čas. čsl. úst. astronomických, 7, 5, 1957.
Trexler, J. H.: Lunar Radio Echoes. I. Proc. IRE, 46, 1. 1958.
Urey, H. C.: The Planets. London 1952.
Urey, H. C.: The origin and significance of the Moon's surface. Vistas in Astronomy 2, London 1956.
Urey, H. C.: Diamonds meteorites and the origin of the solar system. Astroph. J., *124*, 623, 1956.
Urey, H. C.: Zum Ursprung der Oberflächenstruktur des Mondes. Angew. Chem., *68*, 17, 1956.
Urey, H. C.: The origin of the Moon's surface features I., II. Sky and Telescope *15*, 108, 161, 1956.
Vand, V.: Teorie vývoje povrchových útvarů na Měsíci. Ř. H. 1945.
Varsavsky, C. M.: Dynamical limits on a lunar origin for tektites. Geochim. et Cosmochim. Acta, 1958, 14.
Viete, G.: Geologie und Selenologie. Die Sterne *29*, 4, 1953.
Wegener, A.: Die Entstehung der Mondkrater. Braunschweig 1921.
Wilkins, H. P., Moore, P.: The Moon. London 1958.
Wood, R. W.: Selective Absorption of light on the Moon's surface and lunar petrography. Astroph. J., *36*, 75, 1912.

MONDFORMATIONEN,

die auf der Karte von P. Přihoda verzeichnet sind

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Abulfeda	B 2	64	arabischer Historiker, Geograph und Astronom (1273 bis 1331)
Aestuum Sinus	C 3		lat.: Meerbusen (Bucht) der Fluten
Agrippa	B 3	45	Astronom aus dem antiken Bithynien (etwa 92 v. u. Z.)
Albategnius	B 2	129	arabischer Astronom (850 bis 929)
Alhazen	A 3	33	arabischer Mathematiker (987 bis 1038)
Aliacensis	B 1	84	Aliacensus, französischer Theologe (1350 bis 1420)
Alpetragius	C 2	43	arabischer Astronom (etwa 1100)
Alphonsus	C 2	113	spanischer König (1223 bis 1284)
Alpes	B/C 4	(etwa 5000 m hoch)	Alpen
Alpine Valley	B 4	(etwa 6 bis 10 km breit und 130 km lang)	Alpental
Altai Mts.	B 2	(3500 m hoch, über 500 km lang)	Altai-Gebirge (Mts. = mountains, Gebirge)
Anaximenes	C 4	105	griechischer Philosoph (585 bis 528 v. u. Z.)
Anděl	B 2	30	tschechischer Selenograph (1884 bis 1947)
Apennines	B/C 3	(Höhen bis zu 6500 m)	Apenninen
Ariadaeus	B 3	15	mazedonischer König (verstorben 317 v. u. Z.)
Archimedes	C 3/4	81	griechischer Gelehrter (287 bis 212 v. u. Z.)
Aristarchus	D 3	46	griechischer Astronom (310 bis 230 v. u. Z.)
Aristillus	B 4	56	griechischer Astronom (etwa 280 v. u. Z.)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Aristoteles	B 4	97	griechischer Philosoph (383 bis 322 v. u. Z.)
Arnold	B 4	81	deutscher Astronom (1650 bis 1695)
Arzachel	C 2	97	arabischer Astronom (1028 bis 1087)
Atlas	B 4	89	Gestalt aus der griechischen Sage
Australe Mare	A 1		lat.: Südmeer
Autolycus	B 3/4	39	griechischer Astronom (etwa 330 v. u. Z.)
Bailly	C 1	294	französischer Astronom (1736 bis 1793)
Bessel	B 3	19	deutscher Astronom (1784 bis 1846)
Biela	B 1	74	österreichischer Astronom tschechischer Herkunft (1782 bis 1856)
Birt	C 2	17	englischer Selenograph (1804 bis 1881)
Blancanus	C 1	92	italienischer Astronom (1566 bis 1624)
Bond, W. C.	B/C 4	125	amerikanischer Astronom (1789 bis 1859)
Bonpland	C 2	57	französischer Botaniker (1773 bis 1858)
Bullialdus	C 2	63	französischer Astronom (1605 bis 1694)
Byrgius	D 2	64	Schweizer Uhrmacher und Mathematiker (1552 bis 1632)
Caesar siehe Julius Caesar			
Capella	A 2	48	Richter in Karthago (etwa 450)
Capuanus	C 1	56	italienischer Astronom (etwa 1450)
Carpathians	C 3		Karpaten
Cassini	B 4	58	italienischer Astronom (1625 bis 1712)
Catharina	B 2	89	heilige Katharina (etwa 307)
Caucasus	B 4		Kaukasus
Clavius	C 1	233	deutscher Jesuit, Mathematiker (1537 bis 1612)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Cleomedes	A 3	129	griechischer Astronom (etwa 50 v. u. Z.)
Copernicus	C 3	90	großer polnischer Astronom und Theologe (1473 bis 1543)
Crisium Mare	A 3	(450 km breit, 560 km lang)	lat.: Meer der Gefahren
Cyrillus	B 2	89	Cyrillus von Alexandria, Kirchenpatriarch, später heilig gesprochen (verstorben 444)
Darwin	D 2	140	berühmter englischer Naturwissenschaftler (1809 bis 1882)
Doerfel Mts.	C 1		deutscher Astronom (1643 bis 1688)
De la Rue	B 4	128	englischer Astronom (1815 bis 1889)
Delisle	C/D 3/4	26	französischer Astronom (1688 bis 1768)
Diophantus	C/D 3	21	griechischer Mathematiker (etwa 350)
Doppelmayer	D 2	64	deutscher Astronom (1671 bis 1750)
Endymion	A/B 4	126	Held der griechischen Sage
Epidemiarum Palus	C 1		lat.: palus, < Sumpf
Eratosthenes	C 3	61	griechischer Geometer und Astronom (276 bis 196 v. u. Z.)
Eudoxus	B 4	64	griechischer Astronom, Freund Platos (408 bis 355 v. u. Z.)
Euler	C 3	31	Schweizer Mathematiker (1707 bis 1783)
Flammarion	C 2	74	großer französischer Astronom (1842 bis 1925)
Flamsteed	D 2	15	englischer Astronom (1646 bis 1720)
Foecunditatis Mare	A 2		lat.: Meer der Fruchtbarkeit
Fontenelle	C 4	37	französischer Astronom (1657 bis 1757)
Fracastorius	A/B 2	97	italienischer Astronom (1483 bis 1553)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Fra Mauro	C 2	81	venetianischer Geograph (verstorben 1459)
Frigoris Mare	B/C 4		lat.: Meer der Kälte
Furnerius	A 1	129	französischer Jesuit, Mathematiker (etwa 1643)
Gassendi	D 2	89	französischer Theologe und Astronom (1592 bis 1655)
Gauss	A 4	177	deutscher Mathematiker (1777 bis 1855)
Geminus	A 4	89	griechischer Astronom (etwa 70 v. u. Z.)
Gemma Frisius	B 1	129	holländischer Gelehrter (1508 bis 1555)
Godin	B 3	43	französischer Mathematiker (1704 bis 1760)
Grimaldi	D 2	193	italienischer Jesuit, Astronom (1618 bis 1686)
Große Wand siehe Wall β (val β)			lat.: vallum, Wand, Wall
Guericke	C 2	58	deutscher Physiker (1602 bis 1686)
Haemus Mts.	B 3	(bis 2700 m)	Hämus-Gebirge
Hagecius	B 1	77	tschechischer Arzt, Physiker und Astronom (1525 bis 1600)
Hainzel	C 1	97	deutscher Astronom (etwa 1570)
Helicon	C 4	21	griechischer Mathematiker (etwa 400 v. u. Z.)
Hell	C 1	32 (zwischen Lexell und Pitatus)	Wiener Astronom (1720 bis 1792)
Hercules	B 4	72	Held der griechischen Sage
Herodotus	D 3	37	griechischer Historiker (484 bis 408 v. u. Z.)
Herschel	C 2	45	großer englischer Astronom (1738 bis 1822)
Herschel, Caroline	C 4	13	Astronomin, Schwester des Vorigen (1750 bis 1848)
Herschel, J.	C 4	145	englischer Astronom, Sohn von Sir W. Herschel (1792 bis 1871)
Hesiodus	C 1/2	45	griechischer Dichter (etwa 735 v. u. Z.)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Hevelius	D 3	113	bekannter Danziger Astronom und Selenograph (1611 bis 1687)
Hipparchus	B 2	149	griechischer Astronom (etwa 140 v. u. Z.)
Hortensius	C 3	16	holländischer Astronom (1605 bis 1639)
Humboldtianum Mare	A/B 4		deutscher Geograph und Naturwissenschaftler (1769 bis 1859)
Humorum Mare	D 2		lat.: Feuchtigkeitsmeer
Hyginus	B 3	6	spanischer Astronom (etwa 100)
Imbrium Mare	C 3/4	(Fläche von etwa 900000 km²)	lat.: Regenmeer
Iridum Sinus	C 4		lat.: Regenbogengolf
Isidorus	A 2	48	spanischer Bischof (570 bis 636)
Janssen	B 1	161	französischer Astronom (1824 bis 1907)
Julius Caesar	B 3	80	römischer Heerführer (102 bis 44 v. u. Z.)
Jura	C 4		
Karpaten siehe Carpathians			
Kaukasus siehe Caucasus			
Kepler	D 3	35	deutscher Astronom (1571 bis 1630)
König	C 2	33	Wiener Selenograph (1865 bis 1927)
Kunowsky	C 2	19	deutscher Astronom (1786 bis 1846)
Lacus Mortis siehe Mortis Lacus			
Lacus Somniorum siehe Somniorum Lacus			
Lambert	C 3	29	deutscher Physiker (1728 bis 1777)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Landsberg	C 2/3	47	belgischer Gelehrter (1561 bis 1632)
Lange Wand siehe Wall β (val β)			
Langrenus	A 2	137	belgischer Selenograph (1600 bis 1675)
Leibniz Mts.	B 1		deutscher Gelehrter und Philosoph (1646 bis 1716)
Letronne	D 2	110	französischer Archäologe (1787 bis 1848)
Leverrier	C 4	18	französischer Astronom und Mathematiker (1811 bis 1877)
Lexell	C 1	63	finnischer Astronom und Mathematiker (1740 bis 1784)
Licetus	B 1	74	italienischer Philosoph (1577 bis 1657)
Linné	B 3	(8)	schwedischer Naturwissenschaftler (1707 bis 1778)
Longomontanus	C 1	145	dänischer Mathematiker (1562 bis 1647)
Macrobius	A 3	68	griechischer Schriftsteller (etwa 400)
Mädler	B 2	32	deutscher Selenograph (1794 bis 1897)
Maginus	C 1	177	italienischer Astronom (1555 bis 1617)
Manilius	B 3	40	römischer Dichter (etwa 100 v. u. Z.)
Manzinus	B 1	97	italienischer Philosoph (1599 bis 1677)
Marginis Mare	A 3		lat.: Randmeer
Maurolycus	B 1	117	sizilianischer Abt (1494 bis 1575)
Medii Sinus	B/C 2/3		lat.: Mittlere Bucht
Menelaus	B 3	32	griechischer Geometer und Astronom (etwa 100)
Mercator	C 2	45	holländischer Geograph (1512 bis 1594)
Mersenius	D 2	72	französischer Mathematiker (1588 bis 1648)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Messala	A 4	117	arabischer Astronom (etwa 815)
Messier	A 2	15	französischer Astronom (1730 bis 1817)
Meton	B 4	161	griechischer Astronom (etwa 432 v. u. Z.)
Moretus	C 1	121	belgischer Mathematiker (1602 bis 1667)
Mortis Lacus	B 4		lat.: See des Todes
Mösting	C 2	27	dänischer Staatsmann (1759 bis 1843)
Mösting A	C 2	(11)	siehe oben
Mutus	B 1	81	spanischer Seefahrer und Astronom (verstorben 1650)
Nebularum Palus	B/C 4		lat.: Sumpf der Nebel (Dünste)
Nectaris Mare	A/B 2		lat.: Meer des Nektars
Nubium Mare	C 2		lat.: Wolkenmeer
Oceanus Procellarum	D 3	(Fläche von etwa 5000000 km²)	lat.: Ozean der Stürme
Orontius	C 1	112	französischer Mathematiker (1494 bis 1555)
Palus Nebularum siehe Nebularum Palus			
Palus Putredinis siehe Putredinis Palus			
Parrot	B 2	64	deutscher Physiker (1792 bis 1840)
Parry	C 2	45	englischer Forscher (1790 bis 1855)
Petavius	A 2	161	französischer Chronist (1583 bis 1652)
Phocylides	C/D 1	97	holländischer Astronom (1618 bis 1651)
Piazzi	D 1	129	italienischer Astronom (1740 bis 1826)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Piccolomini	B 1/2	90	italienischer Erzbischof, Astronom (1508 bis 1578)
Pickering, W. H.	A 2	15	amerikanischer Astronom (1858 bis 1938)
Pico	C 4	(2400 m hoch)	span. u. portug.: Bergspitze
Pitatus	C 1/2	81	italienischer Astronom (etwa 1550)
Pitiscus	B 1	84	deutscher Mathematiker (1561 bis 1613)
Piton	B/C 4		
Plato	C 4 (am Rande der Alpen)	97	griechischer Philosoph (427 bis 347 v. u. Z.)
Plinius	B 3	48	römischer Historiker (etwa 23 bis 79)
Posidonius	B 3/4	100	griechischer Philosoph (135 bis 51 v. u. Z.)
Procellarum Oceanus siehe Oceanus Procellarum			
Promontorium Lavinium	A 3		lat.: Vorgebirge Lavinium
Promontorium Olivium	A 3		lat.: Vorgebirge Olivium
Ptolemaeus	C 2	145	griechischer Astronom (etwa 130)
Purbach	C 2	121	deutscher Astronom (1423 bis 1461)
Putredinis Palus	B 3		
Pyrenaeus	A 2	(etwa 3900 m hoch)	Pyrenäen
Pytheas	C 3	19	griechischer Seefahrer (etwa 350 v. u. Z.)
Rabbi Levi	B 1	81	Prager Theologe und Astronom (1288 bis 1344)
Regiomontanus	B/C 2	105	deutscher Astronom (1436 bis 1476)
Reinhold	C 3	48	deutscher Mathematiker (1511 bis 1553)
Rheita	A 1	68	tschechischer Kapuziner, Optiker und Astronom (1597 bis 1660)

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Rheita Valley	A 1		engl.: valley, Tal
Riccioli	D 2 (neben Grimaldi)	161	italienischer Jesuit, Astronom (1598 bis 1671)
Riccius	B 1	81	italienischer Missionar (1552 bis 1610)
Riphaeus Mts.	C 2 (oberhalb Landsberg neben Ural Mts.)	(bis 1000 m)	Riphäen-Gebirge (Mts.: mountains, Gebirge)
Roris Sinus	D 4		lat.: Bucht des Taues
Sacrobosco	B 2	84	englischer Mathematiker (verstorben 1256)
Santbech	A 2	71	holländischer Astronom (etwa 1561)
Scheiner	C 1	113	deutscher Jesuit, Astronom (1575 bis 1650)
Schickard	D 1	216	deutscher Mathematiker (1592 bis 1635)
Schiller	C 1	180	deutscher Astronom (um 1627)
Schröter	C 3	32	deutscher Selenograph (1745 bis 1816)
Serenitatis Mare	B 3		lat.: Meer der Heiterkeit
Silberschlag	B 3	13	deutscher Astronom (1721 bis 1791)
Sinus Iridum siehe Iridum Sinus			
Smythii Mare	A 2/3		Smith, englischer Admiral und Astronom (1788 bis 1865)
Snellius	A 1/2	81	holländischer Astronom (1591 bis 1626)
Somniorum Lacus	B 4		lat.: See der Träume
Stevinus	A 1	81	belgischer Mathematiker (1548 bis 1620)
Stiborius	B 1	37	österreichischer Astronom (1465 bis 1515)
Stößer	B 1	141	deutscher Astronom (1452 bis 1534)
Straight Wall siehe Wall β			engl.: straight, gerade
Spitzbergen	C 4		Insel Spitzbergen

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Struve, O.	D 3	280	russischer Astronom (1819 bis 1905)
Taruntius	A 3	61	römischer Philosoph (etwa 86 v. u. Z.)
Thebit	C 2	48	Astronom aus Bagdad (826 bis 901)
Theophilus	B 2	105	Heiliger, alexandrinischer Bischof (verstorben 412)
Timocharis	C 3	40	griechischer Astronom (etwa 280 v. u. Z.)
Torricelli	B 2	19	italienischer Physiker (1608 bis 1647)
Tranquillitatis Mare	A/B 3	(Fläche von 243000 km²)	lat.: Meer der Ruhe
Triesnecker	B 3	23	österreichischer Astronom (1745 bis 1817)
Tycho	C 1	87	dänischer Astronom, wirkte bis Ende seines Lebens in Prag (1546 bis 1601)
Ural Mts.	C 2 (oberhalb Kunowsky neben Riphaeus Mts.)		Ural-Gebirge
Vaporum Mare	B 3		lat.: Meer der Dünste
Vendelinus	A 2	161	belgischer Astronom (1580 bis 1667)
Vieta	D 2 (links oberhalb Byrgius)	81	französischer Mathematiker
Vitruvius	A/B 3	32	römischer Architekt und Ingenieur (etwa 100 v. u. Z.)
Wall β (val β)	C 2	(Länge: 100 km, Höhe: 300 m)	lat.: vallum, Wall
Wallace	C 3	20	englischer Naturwissenschaftler (1823 bis 1913)
Walter	B/C 1	145	deutscher Astronom (1430 bis 1504)
Wargentin	D 1	89	schwedischer Astronom (1717 bis 1783)
Weinek	A 2	32	Prager Astronom (1848 bis 1913)
Werner	B 2	72	deutscher Mathematiker

Bezeichnung	Lage auf der Karte	Durchmesser in km	Benennung nach...
Wilhelm I.	C 1	97	Wilhelm IV., Landgraf von Hessen-Kassel, Astronom. Die Bezeichnung wurde später dem deutschen Kaiser Wilhelm I. zugeordnet
Wolf, M.	C 2	32	deutscher Astronom (1863 bis 1932)
Zagut	B 1	81	spanischer Astronom (etwa 1480)
Zach	B 1	70	deutscher Astronom (1754 bis 1832)

Abenezra 97
Abulfeda 97
Agrippa 112, 210
Albategnius 112
Alhazen 250, 251, 252, 253
Alpen 31, 98, 99, 100, 101, 108, 125
Alpental 108, 109
Alphonsus 36, 95, 137, 200, 201, 258, 259, 260, 261, 264, 268
Altai 31, 100, 101, 102, 216, 218, 245
Antolychus 168, 169
Apenninen 31, 33, 100, 109, 125, 168, 169, 216, 218
Ariadaeus 106, 108
Archimedes 94, 125, 168, 169, 193, 210, 216
Aristarch(us) 33, 36, 75, 94, 96, 107, 112, 137, 152, 157, 163, 165, 177, 178, 210, 271
Aristillus 94, 112, 168, 169, 210, 271
Aristoteles 182, 183
Arzachel 94, 95, 102
Atlas 112
Autolycus 297

Bailly 88, 94, 115
Bartlett 254
Beer 210
Bessel 36, 97, 256
Birt 102, 237
Bond 36, 216
Borda 101
Bradley Mt. 31
Bürg 210

Capella 210, 216
Catharina 34, 123, 216
Caucasus siehe Kaukasus
Cepheus 210
Clavius 34, 91. 95, 163, 189, 190, 193, 232
Colombo 101
Condorcet 303
Copernicus siehe Kopernikus
Curtius 32
Cyrillus 123, 216

Dionysius 163
Doerfel Mts. 32

Endymion 271, 303
Eratosthenes 104, 270, 271
Eudoxus 36

Firmicus 303
Flammarion 95
Flamsteed 103
Fontenelle 254
Fra Mauro 109, 226
Furnerius 239

Gassendi 33, 34, 36, 37, 216
Gerade Wand 101
Godin 112
Grimaldi 33, 88, 177

Hadley Mt. 31, 49
Haemus 109
Hahn 33
Hercules 112
Herodot(us) 96, 97. 108, 178
Herschel 108, 109, 210
Hesiodus 237
Hind 112
Hipparchus 236
Hortensius 84
Humboldt, W. 137
Huygens Mt. 31
Hyginus 36, 105, 109, 136, 257
Hyginus-Rille 110

Isidorus 216

Janssen 216
Joliot-Curie 303

Karpaten 99, 100, 125, 226
Kaukasus 33, 37, 100, 104, 112, 165, 179
Kepler 36, 234
Kopernikus 33, 94, 95, 96, 99, 104, 112, 125, 177, 190, 193, 216, 218, 234, 245
Kraft 157
Krüger 177

Lacus Mortis 184
Lacus Somniorum 165
Lambert 36, 104
Landsberg 33, 36

Langrenus 177, 216, 303
Lange Wand (Straight Wall) 102, 242
Leibniz Mts. 31
Linné 36, 174, 177, 255, 256, 257
Lomonossow 303
Longomontanus 94

McClure 101
Mädlers Square (Mädlersches Quadrat) 254
Maginus 163, 189
Mare Australe 33, 216, 303
Mare Copernicanum 104
Mare Crisium 33, 34, 85, 86, 104, 163, 164, 165, 177, 179, 182, 216, 250, 251, 252, 253, 303, 307
Mare Foecunditatis 34, 164, 165, 177, 179, 183, 216, 303
Mare Frigoris 163, 164, 166, 179, 182, 216, 254
Mare Humboldtianum 88, 184, 216, 303
Mare Humorum 33, 104, 107, 166, 202, 216, 245
Mare Imbrium 32, 33, 85, 87, 88, 89, 99, 100, 101, 104, 109, 124, 164, 165, 166, 177, 179, 192, 201, 202, 216, 238, 239, 245, 297
Mare Marginis 52, 303
Mare Moskwa 303, 307
Mare Nectaris 101, 109, 245
Mare Nubium 86, 87, 103, 104, 109, 165, 166, 179, 200, 216
Mare Parvum 115
Mare Serenitatis 33, 34, 81, 82, 83, 85, 87, 109, 112, 135, 163, 164, 165, 166, 174, 177, 179, 183, 184, 216
Mare Smythii 52, 303
Mare Spumans 303
Mare Tranquillitatis 33, 34, 87, 104, 109, 166, 179, 216, 297
Mare Undarum 303
Mare Vaporum 109, 216, 236, 297
Maurolycus 216
Menelaus 111
Moskauer Meer siehe Mare Moskwa
Mösting 36, 116

Neander 101
Neper 303

Oceanus Procellarum 32, 33, 86, 87, 103, 157, 164, 166, 167, 177, 179, 184, 216, 218
Oken 303

Palus Nebularum 182
Palus Somniorum 163
Petavius 216, 303
Picard 97
Piccolomini 100
Pickering, W. H. 137
Plato 33, 94, 101, 125, 135, 136, 137, 166, 177, 193, 201, 216, 226, 270, 271
Posidonius 33
Proclus 33, 36
Ptolemäus 82, 91, 92, 93, 94, 95, 125, 138, 193, 216, 218
Pythagoras 36, 210

Regiomontanus 179, 208, 209
Rheita-Tal (Rheita Valley) 109, 110
Riphaeus 103
Römer 210
Rutherford 189

Schickard 136, 177
Seleucus 157
Silberschlag 108
Sinus Aestuum 184
Sinus Astronautici 303
Sinus Iridum 34, 88, 89, 109, 216
Sinus Medii 87, 109, 116, 179, 183, 216, 227
Sinus Roris 216
Snellius 303
Sowjetski Mts. 303
Stevinus 303

Tacitus 100
Taruntius 36
Thales 36
Thebit 36, 102
Theophilus 33, 94, 109, 123, 193, 216
Triesnecker 36, 107
Tycho 33, 94, 111, 112, 114, 115, 151, 152, 153, 166, 190, 204, 216, 234, 239

Ukert 33
Ural 103

Vendelinus 216, 303

Wall β 102
Wargentin 229

Xenophanes 210

Ziolkowski 303

Abbot 175
Abu Ali al Hasan ben al Hasein (Alhazen) 250
Airy 132, 134
Akabane Kenji 156
Alleghany 149
Alter 98, 137, 138, 204, 221, 241, 256, 258, 264
Anaxagoras 16, 77, 122, 123, 247
Anděl 126, 127
Arago 160
Aristarch von Samos 14. 15, 16
Aristoteles 23, 247
Arthur 113, 115

Balász, Julia 297
Baldwin 85, 209, 210, 221, 228, 229, 230, 232, 234
Banachiewicz 29
Barabaschew 157. 161. 165, 166, 205, 206
Barnard 256
Bartlett 254, 255
Bauer 184, 279
Baum 137
Bay 20
Beals 143
Beer 94, 251, 254
Belkowitsch 29
Beneš 200, 201, 202
Berg 168
Bird 160
Birt 136, 251
Bond 128, 160
Boneff 212
Bonestell 269
Borst 145, 146
Bouška 76
Brenner 110
Brown 58
von Buch 191, 192
Buckingham 225
Budějický 20, 87
Buettner 153
Bullen 25, 219, 281
von Bülow 152, 153, 162, 242, 243, 244, 245, 246
Bürgel 231

Carpenter 200, 203
Cassini 124
Chabakow 120, 121. 122, 159, 160, 161, 165, 166, 167, 168, 189, 205, 208, 216, 217, 218
Chaikin 156
Chlebzewitsch 286, 287
Christian 225
Cimino 176, 177
Cormier 239
Costain 141, 146
Cragg 137
Curtis 226

Darney 217
Darwin, G. H. 273, 274, 283
Delmotte 217
Dietz 85, 200, 233, 264, 265
Dittrich 9, 11
Dlushnjewskaja 297
van Dorn 232
Douglas 142
Draper, H. 128, 254
Draper, J. W. 128, 304
Dubois 176, 177, 178, 180, 181, 182, 183
Dutton 199

Ebert 211, 212, 228
Edwards 145, 146
Egyed 219
Ehmann 239
Elger 105, 119, 126, 131, 136
Ellery 128
Elsmore 141, 146
Epstein 150

Fairbairn 239
Fauth 31, 32, 82, 93, 94, 95, 110, 113, 120, 127 158
Fedorez 157
Fedynski 223, 224
Fessenkow 42, 138, 157, 229, 231, 252, 278
Fielder 81, 106, 108, 221, 236
Fillias 218
Firsoff 104
Flammarion 126, 135, 136, 142, 247
Fortini 176, 177
Franks 135
Franz 32, 33, 34, 117, 131, 163 307
Fremlin 226, 267, 268
Fresa 176, 177
Frič 128
Friedmann 239

Fuchs 242

Galilei 77, 78, 79, 247
Gaudibert 126
Gaydon 193
Gerstenkorn 283, 284
Giannuzzi 176
Gibson 155
Gilbert 108
Gilvarry 225
Gold 85
Goodacre 113, 119, 126, 130, 136, 208
Götz 157
Graff 157
Grimaldi 124
Gutenberg 274

Haas 142
Harding 250
Hargreaves 165, 166
Hartwig 29
Havemann 244
Hayn 34, 36, 37, 116, 117, 131, 276
Hédervári 219
Herschel 249
Herzog 239
Hevelius 123, 124, 247
Hill 221, 225
Hommel 189, 212
Hook 191, 192, 193
Hopmann 36, 37, 50, 225, 276, 277
Hörbiger 158
Hoyaux 221
Huggins 160
Huntley 184, 279

Jakowkin 29
Jeffreys 273
Jegorow 287
Jezerski 258, 259

Kaidanowski 156
Kalitin 24
O'Keefe 205
Keenan 165, 166
Kepler 57, 78
Kettner 197
Key 225
Khan Mohamed, A. R. 144
Kirchner 111
Klein 257
Klepešta 303, 304
Knott 255
Köhler 251, 252
Kopal 130, 145, 156, 232, 233, 239, 267, 283, 290
Kosyrew 144, 145, 176, 177, 178, 179, 191, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268
Kowal, I. K. 165, 166
Koziel 37
Kraus 244
Kuiper 129, 221, 265
Kunowsky 250, 252

Lambert 226
Lamèch 119, 217
Landerer 160, 161
van Langrenus 123, 247
Laplace 60
Leatner 193
Leitich 191
Leonardo da Vinci 42
Levin 25, 307
Lewitt 307
Link 76, 140, 141, 173, 174, 175, 176
Lipski 139
Loewy 121, 128
Lohrmann 94, 110, 126, 255
Lovas 297
Lucretius 38, 39
Lyot 161, 162

Mc Corkle 226
Mädler 94, 110, 126, 163, 250, 251, 252, 254, 255
Maine 279
Markow 157, 205, 206, 252, 270
Matoušek 189, 217
Mayer, T. 122, 125
Meredith 168
Michailow 301
Miethe 164
Montanari 125
Moore 104, 105, 109, 110, 123, 126, 135, 136, 137, 207, 210, 234, 252, 254, 256, 271
Müller, K. 127

Nasmyth 105, 199, 200, 203
Neustupný 13
Neison 94, 105, 126, 136, 251, 254
Neužil 140
Newton 63
Nininger 239, 241

Nicholson 135, 149, 150, 154
Nölke 276

Öpik 141, 227, 282
Orlowa 42, 157

Pastorff 250
Peal 158
Pease 115
Petruschewski 160
Pettit 135, 149, 150, 154
Pickering 142, 157, 204, 205, 211, 212, 256, 269, 270, 271, 274
Piérot 217
Pinson 239
Platt 186, 187
Plutarch 77, 123
Příhoda 82, 84
Proctor 220
Ptolemäus 23, 57
Puiseux 121, 128
Pulfrich 121

Quiring 84, 202, 236, 237, 239, 264, 274

Radlowa 164
Ramsey 26, 219
Raynard 135
Rheita (Šírek z Reity) 109, 118, 119, 123, 247
Riccioli 124, 255
Rinehart 240
Ritter 32, 34
Roche 275
Rosenberg 157
Rosse 149, 160, 247
Rougier 173
Rudaux 163, 248
Russel 155
Rutherford, L. M. 128
Ruud 218

Sabanějew 233
Sacco 189
Salisbury 208
Saunder 117
Scharonow 157, 158, 164
Scheiner 111, 123
Schmidt, J. 94, 95, 96, 110, 126, 255, 256
Schröter 94, 105, 110, 125, 228, 247, 250, 251, 252, 255
Schuchhardt 11

Schwiner 204
Secchi 94, 160, 191, 255
Sedow 309, 310
Seegert 164
Servigne 180, 181
Shapley 147
Šimon 239
Sigel 308
Singer 184, 185, 186, 279
Sinton 149, 154
Soják 11
Spurr 84, 192
Stanjukowitsch 170, 223, 224, 297
Staub 274
Stodola 20
Stuart 227
Suess 189, 191, 246
Švestka 76
Sytinskaja 157, 163, 164, 166, 168, 170, 171, 172

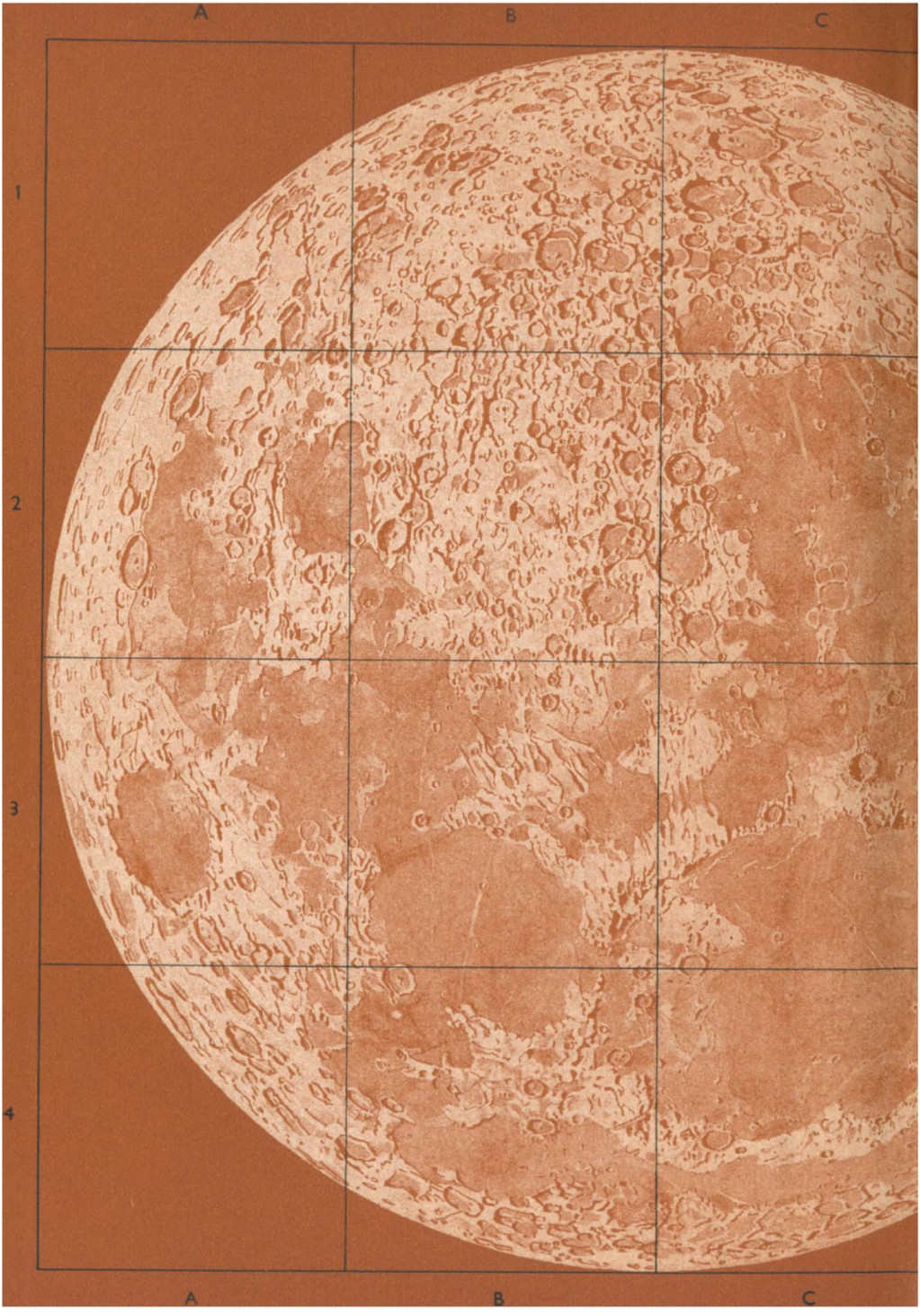
Thornton 137, 226, 256
Thüring 277
Tichow 43, 57
Tomkins 207
Trexler 87
Tschekirda 206
Turusbekow 156

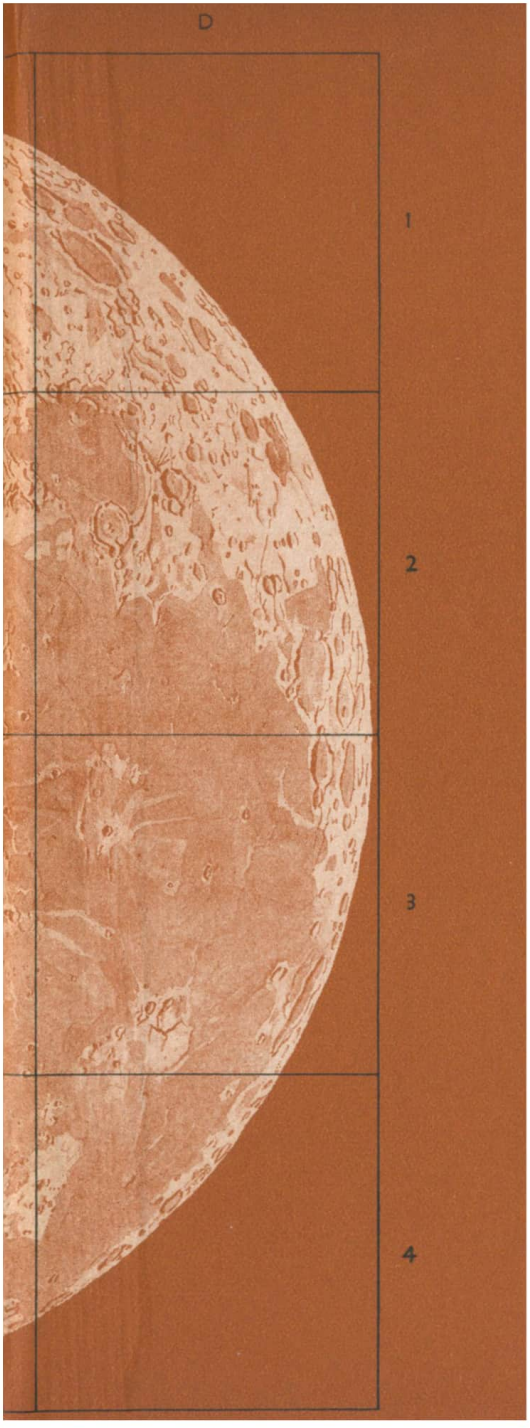
Uhlig 278
Urey 25, 112, 221, 234, 235, 236, 280, 281, 307

Vand 159, 222
Verey 149

Walsh 225
Warren de la Rue 121, 128
Warsawsky 240
Warth 163
Wates 142
Webb 135
Wesselink 151
Westfall 142
Wheatstone 120
Whipple 170, 240
Whitfield 141, 146
Wilkins 103, 104, 105, 109, 119, 123, 126, 127, 136, 137, 165, 206, 210, 234, 252, 256
Williams 199
de Witt 20
Wolf 120
Wood 165

BILDQUELLEN: Archiv des Verfassers: 10, 12, 13, 14, 17, 18, 21, 26, 30, 38, 64, 78, 80, 86, 88, 96, 101, 102, 111, 114, 118, 120, 122, 124, 127, 135, 139, 152, 162, 185, 195, 198, 201, 203, 209, 214, 222, 226, 231, 233, 248, 253, 261, 269, 272, 275, 288, 291, 292, 309. Observatorium Mt. Wilson: 82, 238. Royal Observatorium Greenwich: 70 oben. V. Karlický: 90. Prof. Gellert, Potsdam: 66. Yerkes-Sternwarte: 99, 282. Sternwarte Sonneberg/Thür.: 22. A. Rükl, Volkssternwarte Prag: 52, 140, 143. K. E. McCorkle: 73. Observatorium Mt. Palomar: 129, 190. Observatorium Pic du Midi: 35, 70/71, 92, 95, 105, 107, 169, 259. Vl. Černý, Volkssternwarte Prag: 91. J. Klepešta, Volkssternwarte Prag: 176. Dr. A. Bečvář: 41. Observatorium Paris: 308. Zentralbild: 48, 158. Universität Utah: 235. J. Schalamow: 263, 299, 302. F. W. Richter: 305, 306.


A
B
C
1
2
3
4
A
B
C



Die „Meere" und Gebirge des Mondes, seine großen Krater kann man schon mit einem guten Feldstecher erkennen, wenn man z. B. das erste Viertel am Abendhimmel, das letzte am Morgenhimmel betrachtet. Mit großen Fernrohren sind sogar Einzelheiten zu sehen, deren Ausdehnung nur 100 m beträgt.