

GOLDMANNNS
MONDATLAS

VON VINCENT DE CALLATAY



le Serpentaire

la Vierge

Pégase

Le Dauphin

S

LE VERSEAU

LE CAPRICORNE

LE SCORPION

Le Bouvier

Andromède

COPERNICUS

GALILÆI

N

E. LEENSSERS

Clavius
 Magnus Longomontanus
 Tycho Wilhelm
 Maurolycus
 Petavius
 Frascatorius
 Catharina
 Purbach
 MARE NUBIUM
 MARE HUMORUM
 MARE NECTARIS
 Cyrillus
 Theophilus
 Arzachel
 Alphonsus
 Ptolemaeus
 Hipparchus
 Gassendi
 Langrenus
 MARE FECUNDITATIS
 Taruntius
 MARE TRANQUILLITATIS
 MARE OCEANUS PROCELLARUM
 MARE VAPORUM
 Copernicus
 Kepler
 Eratosthenes
 MARE CRISIUM
 MARE SERENITATIS
 Posidonius
 Autolycus
 Archimedes
 Aristarchus
 Herodotus
 Geminus
 Aristillus
 MARE IMBRIUM
 Atlas
 Hercules
 Eudoxus
 Aristoteles
 Plato
 Endymion
 MARE FRIGORIS
 Pythagoras

Vincent de Callatäy . Goldmanns Mondatlas

GOLDMANN'S
MONDATLAS

ASTRONOMIE - ASTRONOMIE

VON VINCENT DE CALLATÄY

BEWEGUNGS- UND QUANTITÄT

VON DR. H. W. M. J. VAN DER WOUDE

GOLDMANN'S MONDATLAS

ASTRONOMIE • ASTRONAUTIK

VON VINCENT DE CALLATAÿ

HERAUSGEGEBEN UND BEARBEITET

VON DR. PHIL. NAT. W. JAHN



WILHELM GOLDMANN VERLAG MÜNCHEN

GOLDMANN'S
MONDIAL
ASTRONOMIE-ASTRONAUTIK
100 VINGET DE CANTAT
HERAUSGEGEBEN VON BRUNNEN
VON DR. PHIL. HAN. W. JAHN

1962

© COPYRIGHT BY ALBERT DE VISSCHER

DEUTSCHE RECHTE BEIM WILHELM GOLDMANN VERLAG MÜNCHEN

JEDER NACHDRUCK, AUCH AUSZUGSWEISE, BEDARF DER GENEHMIGUNG DES VERLAGES

DRUCK : L'ANCIENNE SOCIÉTÉ DE ROTOGRAVURE D'ART IN BRÜSSEL

VORWORT

Was wir heute über den Mond wissen und was in diesem Atlas niedergelegt ist, ist die Frucht jahrtausendelanger Arbeit. Es ist zustande gekommen, indem die Errungenschaften der Technik, die ihrerseits auf alter handwerklicher Erfahrung fußt, zusammen mit den Ergebnissen und Methoden der Wissenschaft eingesetzt wurden, um Beobachtungsinstrumente zu bauen, Beobachtungsverfahren zu entwickeln, die unmittelbaren Meßergebnisse zu analysieren und widerspruchsfrei zu deuten. Hierin gleicht der Mond jedem anderen Objekt naturwissenschaftlicher Forschung. Das trifft auch insofern zu, als jede Antwort, mit der der Mond die Fragen des Wissenschaftlers beantwortet, zugleich neue Fragen aufwirft. Dieser Prozeß wird nicht beendet sein, wenn der Mensch einmal seinen Fuß auf den Mond gesetzt hat, wenn die ersten Gesteinsproben in unseren Laboratorien analysiert wurden und Gestalt und Höhe der Oberflächenerhebungen sowie die Mondform vermessen worden sind. Rein wissenschaftliche Ergebnisse weiten sich oft zu großer praktischer Bedeutung aus, und auch der technischen Entwicklung scheinen keine vorherzusehenden Grenzen gesetzt zu sein. Aller Voraussicht nach ist der Mond eines Tages nicht nur Beobachtungsplatz. Vielleicht stehen dann Bohr- und Fördertürme auf seiner Oberfläche, und aus Schächten wird energiereiches Gestein zutage gebracht; vielleicht breiten Sonnenbatterien ihre Flügel aus, um Wohnhöhlen, Motoren und Raumfahrzeuge zu beliefern. Was auf der Erde in gänzlich verschiedenen Bereichen menschlicher Betätigung erschaffen und errungen wurde, findet auf dem Monde eine unerwartete Anwendung. Das ist dann das Ergebnis einer Entwicklung, zu der die Arbeiten des Handarbeiters wie des Wissenschaftlers, des Technikers wie des Psychologen, des Organisators wie des Raumpiloten zuletzt in geplantem Zusammenwirken beigetragen haben. Es wird auch am Menschen liegen, daß die Etappe Mond Ausgangspunkt einer segensreichen Fortentwicklung ist.

Wir sind somit Zeuge, wie ein Abschnitt in der Geschichte des Mondes abgeschlossen wird. Bisher ist er für uns ein Gestirn am Himmel gewesen, das wie jedes andere im wörtlichen Sinne unserem Zugriff entzogen ist. Außer dem Gesichtssinn wird kein anderes Sinnesorgan von einem Gestirn - die Sonne ausgenommen - unmittelbar angesprochen. Das kommt einer Abstraktion gleich; ein Gestirn steht deshalb von Anfang an fast ausschließlich im Bereich des Geistigen und regt vorzugsweise geistige Fähigkeiten an. So haben

die Gestirne zur Festlegung von Himmelsrichtungen verholfen und den Menschen gelehrt, die Zeit zu messen, fortlaufend zu zählen und Perioden zu erkennen. Auch der Mond hat dieser Bedeutung als Gestirn entsprochen. Vielleicht war er es, der dem Menschen beigebracht hat, über die ersten Zehner hinweg zu zählen, und schon vor Jahrtausenden hat er die Zeitmaße der Woche, des Monats und des Saros geliefert. Seine verwickelten Bewegungen haben zum scharfen Beobachten angeregt; bereits Ptolemäus war die Evекtion bekannt. Bei der Gewinnung des ptolemäischen und des kopernikanischen Weltbildes hat der Mond keine geringere Rolle gespielt als die Sonne und die Planeten.

Unter den Gestirnen nimmt der Mond eine einzigartige Stellung ein. Nur an ihm beobachten wir mühelos und regelmäßig die einprägsamen Formen seiner Lichtgestalten. Sie haben den Mythos aller Völker und Zeiten aufs stärkste belebt. Durchweg wurde dieser Lichtwechsel als ein Werden und Vergehen gedeutet und mit den Lebensvorgängen auf der Erde verglichen. Mancherorts hält noch heute der Landwirt und der Gärtner an solchem alten Geistesgut fest. So wie sich die Knospe der Pflanze aus dem Verborgenen zur Blüte entfaltet und zur vollen Frucht entwickelt, so wächst auch der zunehmende Mond aus dem unsichtbaren Neumond zum Vollmond; und so wie das ausgestreute Samenkorn in die Erde eindringt und dem Lichte entschwindet, so verschwindet auch der abnehmende Mond vor dem Sonnenlicht und tritt doch eines Tages als Neumond wieder hervor. War es dieser Vergleich, der dem Säenden seit alters her eingegeben hat, bei zunehmendem Monde das auszustreuen, dessen Frucht im Lichte wächst und bei abnehmendem Monde das der Erde anzuvertrauen, was unter der Erde Frucht treibt? Hier herrscht offensichtlich der alte Glaube, daß sich das Werden auf der Erde und im Kosmos gleichartig und gleichzeitig vollzieht. Schließlich sichern auch die vielen Einzelheiten der Mondoberfläche, die wir mit bloßem Auge und mit dem Fernrohr sehen können, dem Monde als Gestirn eine besondere Bedeutung für die Entwicklung des menschlichen Geistesgutes zu. Alles, was in dem vorliegenden Atlas über die Mondoberfläche geschrieben worden ist, zeigt, wieviel Scharfsinn zur Deutung der Krater, Meere und Rillen aufgewendet worden ist. Die photographischen Mondaufnahmen, die hiermit zum Teil erstmalig der Öffentlichkeit vorgelegt werden, sind das Ergebnis meisterlicher astronomischer Beobachtungskunst und gehören zum

Eindrucksvollsten, was in der Naturwissenschaft zu finden ist.

Im Text des vorliegenden Mondatlas kommen modernste Ansichten und Absichten zu Wort. Manche Behauptung der Astronomen wird sich vielleicht bald als irrig und manche Planung der Raumfahrtfachleute binnen kurzem als überholt erweisen. Neue Wörter

sind geprägt worden, Begriffe verändern ihren Inhalt, und Gleiches wird verschieden bezeichnet (Astronaut-Kosmonaut). Daran kann ersichtlich werden, daß wir leicht einzigartigen Fortschritts menschlicher Leistungsfähigkeit sind.

Dr. Willy Jahn

EINFÜHRUNG

Ausdrücke wie »Er greift nach dem Mond«, »Er guckt in den Mond« und »Er ist weit hinter dem Mond« werden bald ihre verächtliche Bedeutung verloren haben. Sind es doch nicht allein die eifrigen Verfechter von Weltraumfahrten, für die eine Landung auf dem Monde nur noch eine Frage von Jahren, vielleicht auch nur von Monaten ist. Besonnenere Gemüter lassen allerdings keinen Zweifel, daß von der Fülle der hier bevorstehenden Aufgaben manche noch nicht im geringsten gelöst ist; dennoch darf man sagen, daß der Mond die menschliche Erfindungsgabe gegenwärtig in nie gekanntem Maße anspricht. Dieser Unternehmungsgeist ist auch um so verständlicher, als in den beiden letzten Jahrzehnten auf dem Gebiete der Mondforschung und auf dem der Astronautik geradezu fabelhafte Fortschritte erzielt worden sind.

Durch Anwenden ebenso neuartiger wie einfallsreicher Methoden sind die Astronomen der Gegenwart in der Lage, über die Beschaffenheit des Mondkörpers recht genaue Aussagen zu machen, so über seine Temperatur und über die Einflüsse, die auf ihn einwirken. Ihre riesigen Teleskope zeigen Mondformationen und Eigenheiten der Mondoberfläche, deren Ausmaße hundert Meter nicht weit übersteigen. Die Raketenfachleute sind ebenfalls in einem kaum geahnten Maße erfolgreich gewesen, als sie einen Flugkörper zum Monde schickten und auch die Rückseite des Mondes fotografierten. Man darf überzeugt sein, daß sie eines Tages Registriergeräte auf dem Monde absetzen und noch schärfere und noch größere Aufnahmen aus geringerer Entfernung unter jedem beliebigen Winkel machen werden. Diese Ergebnisse und die daran geknüpften Erwartungen haben in einzigartiger Weise Fragen um unseren Erdsatelliten angeregt und Bemühungen, seine vielfältigen Bewegungen und Eigenheiten zu verstehen, in Gang gesetzt. Das vorliegende Werk wendet sich vorwiegend an diesen Kreis Wißbegieriger.

Das Werk setzt sich aus drei Teilen zusammen. Im ersten werden die grundlegenden, astronomischen Tatsachen unseres Wissens vom Monde wiedergegeben; das geschieht in 16 Kapiteln über die Mondbewegungen,

über Mondaufbau und sonstige Eigenschaften. - Der zweite Teil ist ein photographischer Atlas mit 22 Aufnahmen, die, einander überlappend, die gesamte uns von jeher bekannte Mondoberfläche darstellen. Jeder Aufnahme sind zwei zusätzliche Aufnahmen geringerer Vergrößerung beigegeben, von denen die eine die Großaufnahme in den Zusammenhang einordnet und die andere die von der Internationalen Astronomischen Union festgelegten Namen der Mondformationen enthält. Ein kurzer Text beschreibt die auffälligsten dieser Formationen. Der Atlas ist selbstverständlich durch eine zusammengesetzte Aufnahme von der Rückseite des Mondes vervollständigt.

Ein modernes Werk darf es sich nicht versagen, ein Minimum an Informationen über die gegenwärtig zur Verfügung stehenden Mittel zur Eroberung des Mondes zu geben. Deshalb sind in den vier Kapiteln des dritten Teiles die Grundlagen der Astronautik, die zum Verständnis von Raketenflug und Raumfahrt zum Monde bekannt sein müssen, dargelegt.

Um das Auffinden der Mondformationen im Atlas zu erleichtern, ist ein allgemeines Register beigegeben, das die Formationen und deren Aufnahmen verzeichnet und auch auf zusätzliche Erklärungen hinweist. Da die Mehrzahl der Formationen auf mehreren Aufnahmen erscheint, ist es unerlässlich, auf das Register zurückzugreifen, will man die Erklärung zu einer Formation nachlesen.

Der vorliegende Mondatlas unterscheidet sich grundlegend von den uns bekannten Erdatlanten, weil er die Mondoberfläche mit allen Einzelheiten nicht so wiedergibt, wie sie in Wirklichkeit ist, sondern wie wir sie sehen. Die Minderung der Abbildungsgüte als Folge der nicht ebenen Mondoberfläche und zufolge des immer gleichen Aufnahmestandpunktes wirken sich um so mehr aus, je näher die Aufnahme dem Mondrand kommt. Das wird sich erst dann ändern, wenn sich die Astronauten in der Lage sehen, ihre Kameras um den Mond herumzuschicken und alle Aufnahmen machen zu lassen, die in einem vollständigen Atlas enthalten sein müssen. Hierbei liegen die Verhältnisse so, daß

ganz bestimmte Bedingungen erfüllt sein müssen, hängt doch die Schärfe der Aufnahme im wesentlichen von der Beleuchtung des Mondes ab. Das zeigt sich an den Aufnahmen, auf denen nur ein Teil der Mondoberfläche abgebildet ist, während der andere Teil völlig im Dunkeln liegt.

Vielleicht wird man bei der Durchsicht des Atlas mit Erstaunen bemerken, daß Großaufnahme und zusätzliche Kleinaufnahme manche Einzelheit verschieden wiedergeben. Verzerrungen sind dabei einzig auf die Librationsunterschiede zur Zeit der Aufnahmen zurückzuführen. Was man unter Libration versteht, ist in Teil I erklärt.

Es muß ausdrücklich bemerkt werden, daß das jeweils beigegebene Übersichtsbild der Mondscheibe eine Photomontage ist, in der eine Aufnahme des ersten Viertels und eine des letzten aneinandergesetzt worden sind. Wie im Text erklärt, zeigt der Vollmond nicht so viele Einzelheiten seiner Oberflächenformen wie das erste und das letzte Viertel, die deshalb zum Erkennen der Formationen besser zu gebrauchen sind. Das Benutzen einer Photomontage ist deshalb berechtigt.

Schließlich muß erinnert werden, daß die Astronomen den Mond nur durch das Fernrohr betrachten, wobei rechts und links, oben und unten miteinander vertauscht sind. Die Mondphotographien zeigen deshalb Norden unten und Osten rechts, eine Regel, die nur dann durchbrochen ist, wenn der Mond wie mit unbewaffnetem Auge gesehen dargestellt wird.

Alle im Atlas enthaltenen Photographien sind einer Sammlung entnommen, deren Einzelstücke der verstorbene französische Astronom Bernard Lyot auf dem Pic du Midi aufzunehmen begann und die seine Mitarbeiter fortgeführt haben. Prof. A. Danjon, Direktor der Sternwarte Paris, hat sie bereitwilligst zur Verfügung gestellt; sie stellen eine Aufnahmereihe dar, deren einzelne Glieder zum größten Teil noch niemals veröffentlicht worden sind. Der frühere Mitarbeiter B. Lyots, A. Dollfus, hat persönlich die Herstellung der Photoabzüge geleitet und möge dafür meinen Dank entgegennehmen. Der Dank muß um so herzlicher sein, als er die Liebenswürdigkeit hatte, mich über eine große Zahl seiner wertvollen Arbeiten zu unterrichten und mich ständig zu beraten.

Ebenso danke ich M. Verbaandert, Astronom an der Königlichen Sternwarte Brüssel-Uccle, der bereitwilligst mein Manuskript gelesen hat und dessen Ratschläge mir äußerst wertvoll waren. Mein Dank gilt auch J. Dommanget, ebenfalls Astronom in Uccle, der mich über seine letzten Arbeiten unterrichtete, und J. Ruland, Amateurastronom, von dem die beachtliche Aufnahme der Sonnenfinsternis vom 15. Februar 1961 und die des aschgrauen Mondlichtes stammt. Endlich habe ich meine große Dankbarkeit den Direktoren der Observatorien Mount Wilson und Palomar sowie der Lick-Sternwarte, die mich lebenswürdigerweise zur Wiedergabe ihrer prächtigen photographischen Aufnahmen ermächtigt haben, zu bekunden.

Vincent de Callatay.

DANK AN DIE MITARBEITER

Der Verlag hält es für seine Pflicht, diesem Werk, das in Deutschland bislang nicht seinesgleichen hatte, einige Dankesworte an die zahlreichen Mitarbeiter voranzustellen. Vor allem sei des verstorbenen französischen Astronomen Bernard Lyot vom Observatorium Meudon gedacht, aus dessen Nachlaß die Sammlung der folgenden Mondaufnahmen zusammengestellt wurde. Von Lyots Mitarbeitern und Schülern waren die Herren Camichel, Gentili und Dollfus beteiligt. Nach Lyots Tod wurde das Programm der Mondaufnahmen am Observatorium Pic-du-Midi von Direktor Jean Rösch und seinen Mitarbeitern Clastre und Leroy fortgesetzt. André Danjon, der Direktor des Pariser Observatoriums, sorgte dafür, daß der Lyotsche Nachlaß wissenschaftlich ausgewertet wurde. Um diese schwierige Aufgabe machten sich besonders die Herren Combaz, Foulon, Dragesco, Leroy und Bataillard verdient. Der

Vorschlag, die Aufnahmen im Rahmen eines Mondatlases der Öffentlichkeit zugänglich zu machen, ging von dem Brüsseler Verleger Albert de Visscher aus, der für die textliche Gestaltung dieses Werkes Vincent de Callatay gewann. Herr Dr. phil. nat. Willy Jahn bearbeitete die deutsche Ausgabe. Eine englische Ausgabe wird im Verlag Macmillan in London erscheinen; die Verlage de Visscher in Brüssel und Gauthier-Villars in Paris veröffentlichen die französische Ausgabe.

Wie bei dem Himmelsatlas von Callatay wurde auch beim Mondatlas eine internationale Zusammenarbeit erreicht. Sie hat zu einem Ergebnis geführt, das dem Fortschritt und der Wissenschaft dient.

Allen am Entstehen des Mondatlases Beteiligten sei an dieser Stelle für ihre mühevollen Kleinarbeit Dank gesagt.

Wilhelm Goldmann

INHALTSVERZEICHNIS

DAS BILDMATERIAL dieses Werkes ist in drei Gruppen eingeteilt, die auch besonders numeriert sind.

DIE TAFELN sind im 2. Teil des Werkes auf den Seiten 98 bis 150 zusammengefaßt. Zu ihnen gehört auf den Seiten 94-97 ein eigenes alphabetisches Verzeichnis der Mondformationen. DIE ABBILDUNGEN sind zeichnerische Darstellungen, die vor dem Text mit der Abkürzung Abb. 1 usw. bezeichnet sind. DIE PHOTOGRAPHIEN sind fortlaufend numeriert mit der Bezeichnung Photo 1 usw.

	Seite
Vorwort	7
Einführung	8
Inhaltsverzeichnis	11
Verzeichnis der Abbildungen	12
Verzeichnis der Photographien	13

Erster Teil

ASTRONOMISCHE GRUNDLAGEN - BEWEGUNG UND BESCHAFFENHEIT DES MONDES 15

I. DIE GRUNDLEGENDEN BEWEGUNGSETCHE DES MONDES	17
Kepler und Galilei	17
Newton	18

II. DER UMLAUF DES MONDES UM DIE ERDE	21
Die siderische und die synodische Umlaufzeit	21
Die wirklichen und scheinbaren Bewegungen	21
Der Doppelplanet Erde-Mond	23

III. DIE MONDPHASEN	25
Die Albedo des Mondes	25
Der zunehmende Mond	25
Das aschgraue Mondlicht	26
Der abnehmende Mond	30
Die Mondsichel am Himmel	30

IV. ENTFERNUNG, OBERFLÄCHE UND MASSE DES MONDES	31
Die größte und die kleinste Entfernung	31
Die Oberfläche und die Masse	34

V. DIE DREHUNG DES MONDES UM SICH SELBST	35
Der Umlauf und die gleichzeitige Umdrehung	35
Die Mondlibrationen	36

VI. DIE BAHN DES MONDES AM HIMMEL	41
Angenommene Schwankungen der Erdkugel	41
Die scheinbare Mondbahn im Sommer und im Winter	41
Die aufsteigenden und absteigenden Knoten der Mondbahn	42
Die Mondaufgänge und die Monduntergänge	43

VII. DER ABLAUF DER VERFINSTERUNGEN	45
Totale und partielle Finsternisse	45
Die Häufigkeit der Sonnen- und Mondfinsternisse	46
Die Voraussage von Finsternissen	47
Der Saros	47
Die Anzahl der Finsternisse in einem bestimmten Zeitabschnitt	48
Die Größe einer Finsternis	48

VIII. MONDFINSTERNISSE	49
Der Schatten und der Halbschatten der Erde	49
Der Anblick des verfinsterten Mondes	50
Mondfinsternisse vom Monde aus gesehen	50
Eine Mondfinsternis bei Sonnenuntergang	50

IX. SONNENFINSTERNISSE	51
Die verschiedenen Arten der Sonnenfinsternisse	51
Formen und Geschwindigkeit des Mondschattens auf der Erde	52
Wiederkehr von Sonnenfinsternissen	55

X. DIE GEZEITEN	57
Die Gezeitenbewegungen	57
Spring- und Nippfluten	58
Die Gezeiten in Theorie und in Wirklichkeit	59
Die Gezeiten der Erdrinde	60
Die atmosphärischen Gezeiten	62

XI. BESCHREIBUNG DER MONDOBERFLÄCHE	63
Die Bedeutung der Mondbeleuchtung	64
Die Mondmeere	65
Die Mondkrater	66
Die Mondgebirge	68
Die Rillen und Spalten der Mondoberfläche	70

XII. DIE BESCHAFFENHEIT DER MONDOBERFLÄCHE	71
Die wechselnde Helligkeit des Mondlichtes	71
Lichtmessungen und Farbmessungen	71
Polarisationsmessungen	72
Die Depolarisation	72
Die Wärmestrahlung des Mondes	73
Die radio-elektrische Strahlung des Mondes	74
Radarechos vom Monde	74

XIII. DER URSPRUNG DER MONDFORMATIONEN	75
Die vulkanischen und plutonischen Theorien	75
Die Meteoritentheorie	75
Die Erosion auf dem Monde	76
Verteidigung der Meteortheorie	78
Die Entstehung der Mondmeere	80
Sichtbare Veränderungen auf dem Monde	81

XIV. DIE ATMOSPÄRE DES MONDES	83
Atmosphäre und Schwerkraft	83
Spuren einer Mondatmosphäre	83
Der Mond ohne Atmosphäre	86

XV. DIE VORDERSEITE UND DIE RÜCKSEITE DES MONDES	87
Ein Aufenthalt auf der Vorderseite des Mondes	87
Der Aufbau der Rückseite des Mondes	88
Photographie der Mondrückseite	89

XVI. DIE FORM DES SELENOIDES	91
Das Selenoid	91
Die Einzelheiten des Mondprofils	91

Zweiter Teil

ATLAS	93
Verzeichnis der Mondformationen	94
Tafel 1	98
Tafel 2	100
Tafel 3	102
Tafel 4	104
Tafel 5	106
Tafel 6	109
Tafel 7	109
Tafel 8	110
Tafel 9	112
Tafel 10	114
Tafel 11	116
Tafel 12	118
Tafel 13	120
Tafel 14	122
Tafel 15	124
Tafel 16	126
Tafel 17	128
Tafel 18	130
Tafel 19	132
Tafel 20	134
Tafel 21	136
Tafel 22	138
Tafel 23 Die Rückseite des Mondes	140

Dritter Teil

ASTRONAUTISCHE GRUNDLAGEN . DER FLUG ZUM MONDE	141
XVII. AUSSERIRDISCHE BAHNEN	143
Die Kreisbahngeschwindigkeit	143
Die parabolische und die hyperbolische Geschwindigkeit	143
XVIII. DIE RAKETEN	145
Der Antrieb durch Rückstoß	145
Die Endgeschwindigkeit	146
Die Stufenrakete	147
Der Abschub und die Stabilisierung	149
Treibstoffe	149
XIX. DER AUFENTHALT IN EINER RAKETE	151
Die Überschwere	151
Die Schwerelosigkeit	152
Temperatur, Luftdruck und Ernährung	152
Vibrationen	153
Meteoritentreffer	154
Strahlungsschäden	155
XX. DIE ETAPPEN EINER MONDREISE	155
Die vier Abschnitte einer Mondreise	155
Der Abschub	156
Die Geschwindigkeiten im Raume	157
Das Netz von Fernleitanlagen	158
Die Rückkehr in die Atmosphäre	158
Ausblick in die Zukunft	160

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung	Seite
1 Die Keplerschen Gesetze	17
2 Die auf einen Flugkörper wirkenden Kräfte	18
3 Der Einfluß der Erdkrümmung auf die Flugbahn	19
4 Der Mond und Newtons Schwerkraftgesetz	20
5 Siderischer und synodischer Umlauf des Mondes	21
6 Die Neigung der Erdachse gegen die Ekliptik	21
7 Scheinbare Bewegungen der Sonne	22
8 Die Drehung der Erde und des Mondes um das gemeinsame Schwerkzentrum	23
9 Die Ellipsenbahn des gemeinsamen Schwerkzentrums von Erde und Mond um die Sonne	23
10 Schematische Darstellung der Mondbahn	24
11 Die wirkliche Form von Erd- und Mondbahn	24
12 Die Mondphasen	25
13 Die Form der Mondsichel	26
14 Die Stellung der Mondsichel am Himmel	30
15 Die Messung der Entfernung Erde-Mond	31
16 Die Entfernungen zum Monde in seiner Zenit- und in seiner Horizontstellung	32
17 Vergleich von Erd- und Monddurchmesser	32
18 Bestimmung der Mondmasse	34
19 Der Umlauf und die gleichzeitige Umdrehung	35
20 Auswirkung einer Ungleichheit von Umlauf und Umdrehung	36
21 Die Libration in Länge	37
22 Die Libration in Breite	39
23 Die tägliche Libration	40
24 Die Stellungen der Erdachse zur Sonne	41
25 Die scheinbare Tagesbewegung der Ekliptik	42
26 Die scheinbaren Bahnen von Sonne und Mond; Knotenrücklauf	43
27 Die Drehung der Mondbahn	43
28 Kurven des Mondaufgangs, des Monduntergangs und des Meridiandurchgangs	44
29 Mondschaten und Erdschaten	45
30 Nichteintreten und Eintreten einer Finsternis	46
31 Häufigkeit der Sonnen- und Mondfinsternisse	46
32 Der Finsternisbogen der Ekliptik	48
33 Die drei Arten von Mondfinsternissen	49
34 Totale und ringförmige Sonnenfinsternis	51
35 Die drei Arten von Sonnenfinsternissen	52
36 Die totale Sonnenfinsternis vom 17. April 1912	54
37 Die totale Sonnenfinsternis vom 15. Februar 1961	54
38 Eine Finsternisfamilie in einem Saroszyklus	56
39 Verformung eines flüssigen Körpers beim Fall	58
40 Wirkung der Fliehkraft auf ein deformierbares System	58
41 Schematische Darstellung der Springflut	58
42 Schematische Darstellung der Nippflut	59
43 Schematische Darstellung eines Horizontalpendels	61
44 Aufzeichnungen der Gezeiten der Erdrinde	62
45 Höhenmessung der Mondberge	70
46 Übersicht über die Schwingungszahlen (Frequenzen) des Lichtes	73
47 Die Neuerde vom Monde aus gesehen	87
48 Scheinbare Bewegungen der Erde über dem Mondhorizont	88
49 Übersicht über die Mondrückseite	88
50 Lunik III schematisch	89
51 Die Stellung von Lunik III während der Aufnahmen	89
52 Mondprofile	92
53 Theoretische Flugbahnen eines horizontal abgeschossenen Körpers	144

ERSTER TEIL - Astronomische Grundlagen

Bewegung und Beschaffenheit des Mondes

I Die grundlegenden Bewegungsgesetze des Mondes

Kepler und Galilei

Unsere Erde führt bei ihrem beständigen Umlauf um die Sonne den Mond als Begleiter mit sich, der dabei unablässig um sie herumläuft. Seit der frühesten Antike bereits bemühten sich die Astronomen um das Warum und Wie der Mondbewegung sowie der Bewegungen aller Himmelskörper; man mußte sich indes bis zu Anfang des 17. Jahrhunderts gedulden, bis die korrekte Antwort auf diese Fragen gegeben wurde. Es war die Ruhmestadt Johannes Keplers, der jene drei Gesetze verkündete, die untrennbar mit seinem Namen verbunden sind und die ebenso für die Umläufe der Planeten um die Sonne wie für die Bahnen der Satelliten um die Planeten gelten.

Das erste der Keplerschen Gesetze bestimmt die Form einer solchen Bahn: Im Gegensatz zur Ansicht der Alten ist diese keine Kreisbahn, sondern eine Ellipse; einer ihrer beiden Brennpunkte wird von dem Körper eingenommen, um den sich der Umlauf des anderen vollzieht. Das zweite Gesetz, das Gesetz der Fahrstrahlen, bestimmt, daß die Bewegung nicht gleichförmig ist und daß sie um so schneller abläuft, je näher die beiden Körper einander kommen. Dieses zweite Keplersche Gesetz bestätigt ein bekanntes Phänomen, das man sich leicht vor Augen führt, wenn man einen Stein an einem Faden um die Hand herum schleudert. Rollt sich der Faden um unseren Arm herum auf, so nähert sich der Stein seinem Umlaufszentrum und beginnt sogleich, immer schneller herumzusenken. Endlich bringt das dritte Keplersche Gesetz einen Zusammenhang zum Ausdruck, der zwischen der Umlaufdauer und der die beiden Körper trennenden Entfernung besteht. Es gestattet deshalb, die eine dieser beiden Größen zu bestimmen, wenn man die andere kennt (Abb. 1).

Um das Werk Keplers zu würdigen und seinen Beitrag zur astronomischen Wissenschaft zu verstehen, muß man bedenken, daß dieser unermüdliche und hervorragende Meister im Reiche der Zahlen im Jahre 1571 geboren worden ist, also fast ein Jahrhundert später als Kopernikus. Seine Arbeiten liegen in einer Epoche, in der man - der um sieben Jahre ältere Galilei ausgenommen - noch nicht wagt, sich zum heliozentrischen System, das der Philosophie jener Zeit zuwiderlief, zustimmend auszusprechen. Recht bezeichnend ist, daß Kopernikus erst kurz vor seinem Tode jenes Werk erscheinen ließ, in dem er darlegte, daß die Sonne im Mittelpunkt der Welt stünde und alle Planeten, die Erde inbegriffen, sie umwanderten.

Kepler war Mystiker: überzeugt, daß in der Welt »Harmonien« obwalteten, gab er dieser Meinung in seinem 1619 veröffentlichten Werk »Harmonices mundi« oft Ausdruck. Obgleich ein glühender Anhänger der kopernikanischen Lehre, sah er sich nicht gehindert, eine lebhaft bewundernde Tycho Brahe zu bezeugen, den berühmten dänischen Astronomen, der Gegner des Kopernikus war. Kepler hatte das unschätzbare Glück, die Beobachtungsbücher übernehmen zu können, in denen Tycho seine zahllosen Himmelsbeobachtungen aufgezeichnet hatte; als Mathematiker ersten Ranges studierte er alle Beobachtungsergebnisse mit unendlicher Geduld, um schließlich daraus die nach ihm benannten Himmelsgesetze abzuleiten. Damit jedoch kamen seine Bemühungen zu einem Ende, denn er ging nicht so weit, auch die Ursachen der Planetenbewegungen, die er so vollständig

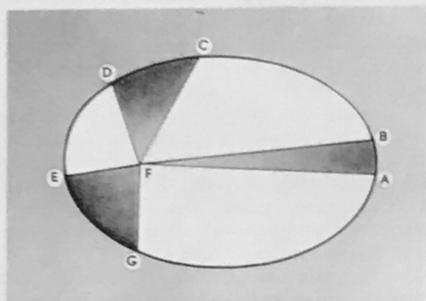


Abb. 1. Die Keplerschen Gesetze. Die Keplerschen Gesetze gelten für alle umeinander kreisenden Himmelskörper. Auf den Umlauf der Planeten um die Sonne angewendet, lauten sie:

1. Gesetz: Die Bahnen der Planeten sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Gesetz: Die Fahrstrahlen überstreichen in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
3. Gesetz: Die Quadrate der Umlaufzeiten sind proportional den Kuben der mittleren Entfernungen der Planeten von der Sonne.

Die Abbildung veranschaulicht das 2. Gesetz, gewöhnlich Gesetz der Fahr- oder Leitstrahlen genannt. Der Planet durchläuft die Ellipsenbogen AB, CD und EG in gleichen Zeiten, weil die Flächen FAB, FCD und FEG gleich groß sind.

Mit Hilfe des 3. Gesetzes berechnet man entweder die Entfernung des Planeten von der Sonne, sofern man seine Umlaufzeit kennt, oder seine Umlaufzeit, sofern man seine Entfernung D von der Sonne kennt. Es läßt sich so schreiben:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{D_1^3}{D_2^3}$$

Nimmt man die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne, d. i. die astronomische Einheit der Entfernung, als Einheit der Entfernung und ebenso die Umlaufzeit der Erde um die Sonne, d. i. ein Jahr, als Einheit der Umlaufzeit, so läßt sich jetzt schreiben:

$$\frac{T^2}{1^2} = \frac{D^3}{1^3} \quad \text{oder} \quad T^2 = D^3$$

Beispiele: 1) Jupiter ist 5,2 astronomische Einheiten von der Sonne entfernt. Wie groß ist seine Umlaufzeit? Aus der letzten Formel folgt $T = \sqrt[3]{5,2^3} = 11,8$ Jahre.

2) Wie weit ist Saturn von der Sonne entfernt, wenn seine Umlaufzeit 29,4 Erdjahre beträgt? Die letzte Formel wird geschrieben:

$$D = \sqrt[3]{T^2}, \text{ und deshalb ist}$$

$$D = \sqrt[3]{29,4^2} = 9,5 \text{ astr. Einheiten}$$

oder rund 1.400 Millionen Kilometer.

bestimmen konnte, aufzudecken. Von diesem Blickpunkt aus gesehen stellt sich sein Werk im wesentlichen als empirisch dar.

Zur gleichen Zeit hat Galilei seinerseits diejenigen Gesetze formuliert, die den Fall der Körper beherrschen; aber auch er beschränkte sich auf die Feststellung von Tatsachen, ohne die tieferen Ursachen zu ergründen.

Newton

Erst gegen Ende des gleichen (siebzehnten) Jahrhunderts leuchtete erneut ein Genie, das größte von allen, auf und wies nach, daß sich Keplers und Galileis Gesetze von ein und demselben Prinzip, dem Prinzip der Gravitation oder der universellen Attraktion, herleiten ließen. Es war Isaac Newton, der im Jahre 1643 geboren wurde, kaum daß Galileis Leben erloschen war.

In seinem Werk, das allgemein als eines der reinsten Hauptwerke menschlichen Geistes überhaupt betrachtet werden darf, in den »Philosophiae naturalis principia mathematica«, weist Newton die Identität nach, die zwischen den Kräften, die die Himmelskörper aufeinander ausüben, und der auf der Erde herrschenden Schwerkraft besteht. Das nach ihm benannte Newtonsche Attraktionsgesetz ist von einer erstaunlichen Einfachheit; dennoch reicht es aus, um alle Bewegungen der Himmelskörper zu erklären und somit unwiderlegbar darzutun, daß zu diesem Zwecke ein und dieselbe Mechanik genügt. Es lautet: »Die Anziehung, die zwei Körper aufeinander ausüben, ist direkt proportional dem Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung ihrer Massenschwerpunkte.«

Die Legende besagt, daß die Idee des Fundamentalgesetzes einer universellen Gravitation in Newtons Gedanken aufkeimte, als er einen Apfel fallen sah. »Warum«, so habe er sich gefragt, »fällt dieser Apfel auf die Erde und nicht auch der Mond?« Daraufhin sei ihm die Intuition gekommen, daß der Mond tatsächlich zur Erde hin falle,

Dieser geniale Physiker stellte außerdem eines der wichtigsten Prinzipien der Mechanik auf: das Prinzip der Beharrung, nach dem jeder Körper seinen Zustand der Ruhe oder der Bewegung zu erhalten bestrebt ist. Aber Galilei sah keinen Zusammenhang zwischen Keplers Himmelsmechanik, die er nur für die Körper im Weltraum anwendbar hielt, und seiner soeben begründeten Mechanik, die nur die Körper auf der Erdoberfläche betrifft.

da er aber außerdem dem Beharrungsprinzip folgt, strebt er gleichzeitig danach, sich auf einer geradlinigen Bahn senkrecht zur Fallrichtung von der Erde zu entfernen. Diese beiden gleichzeitig wirkenden Kräfte der Schwere und der Beharrung sollten sich in jedem Augenblick ausgleichen und so den Umlauf des Mondes um die Erde hervorgerufen.

Das ist in der Tat der Ursprung der Mondbewegung, zu dessen Demonstration ein ganz einfaches, aber rein theoretisches Gedankenexperiment genügt, ohne daß man es nötig hat, auf irgendeine mathematische Formel zurückzugreifen. Ein Geschütz, das horizontal ausgerichtet ist, feuere von einer sehr hoch gelegenen Stellung aus ein Geschloß ab. Die elementare Ballistik lehrt, daß die Geschloßbahn hauptsächlich von zwei Faktoren abhängt: von der Schußkraft des Geschützes, genauer von der dem Geschloß übertragenen lebendigen Kraft (oder Bewegungsenergie = $\frac{1}{2}$ Masse mal Geschwindigkeit²) und der Schwerkraft, deren Größe von der Höhe der Geschloßstellung über dem Meeresspiegel bestimmt wird (Abb. 2). Tatsächlich existiert noch ein dritter Faktor, der Luftwiderstand, der jedoch hier außer acht gelassen werden kann, weil er dort, wo sich der Mond und alle sonstigen Satelliten der Planeten bewegen, nicht vorkommt.

Gäbe es keine Schwerkraft, so würde unser Geschloß auf geradliniger Bahn fortfliegen und sich zufolge des Prinzips der Beharrung unbegrenzt weit entfernen. Dann läge eine gleichförmige Ortsveränderung vor. Träte aber lediglich

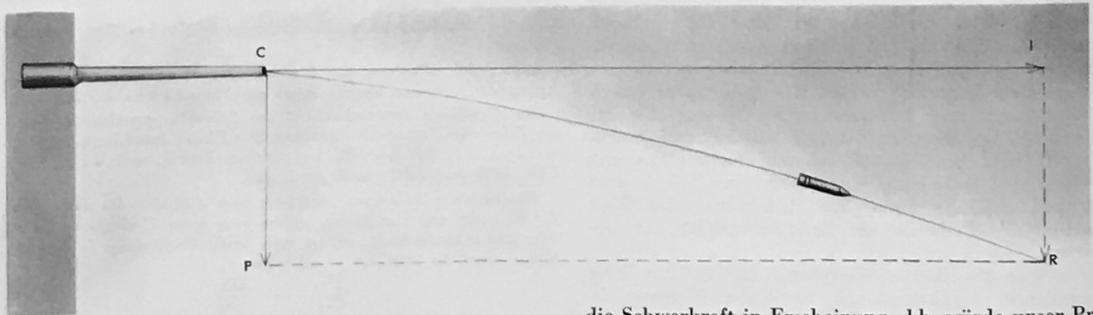


Abb. 2. - Die auf einen Flugkörper wirkenden Kräfte. Wenn auf den Flugkörper nach dem Abschuß keine Schwerkraft einwirkte, würde er seinem Beharrungsvermögen zufolge die horizontale Flugbahn CI einhalten. Unterliegt aber der Flugkörper unmittelbar nach dem Abschuß keiner vorwärtstreibenden Kraft, so wirkt auf ihn nur die Schwere ein, und er fällt senkrecht nach unten längs CP. Bewahrt aber der Flugkörper die ihm beim Abschuß mitgegebene Bewegungsgröße und fällt er gleichzeitig nach unten, so durchläuft er die Flugbahn CR.

die Schwerkraft in Erscheinung, d.h. würde unser Projektil anstatt vorwärtsgeworfen nur aus dem Geschützrohr ausgestoßen werden, so würde es sich unverzüglich zum Erdzentrum hin richten und vollführte einen freien Fall. Da nun die beiden Kräfte gleichzeitig in Aktion treten, entfernt sich das Geschloß so weit, als ob die Schußkraft des Geschützes allein gewirkt hätte, und gleichzeitig verliert es so viel an Höhe, als ob die Schwerkraft ihrerseits allein in Wirkung gewesen wäre. Demzufolge ist die Flugbahn eine Kurve, die den Erdboden in um so größerer Entfernung trifft, je größer die Schußkraft des Geschützes oder auch je größer die dem Geschloß übertragene Anfangsgeschwindigkeit ist.

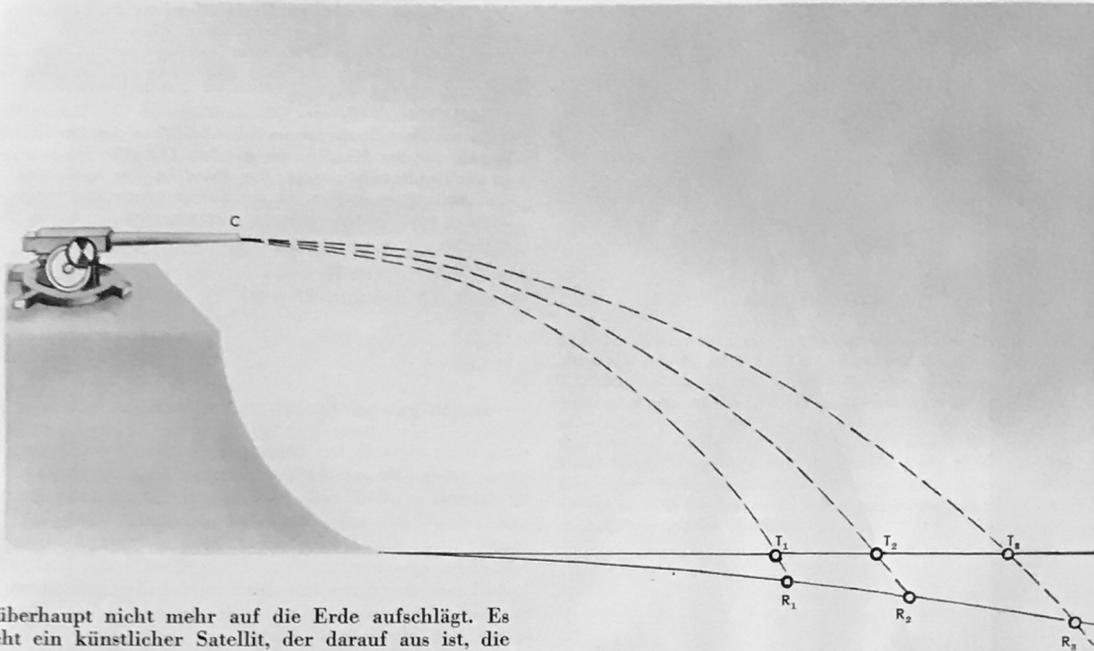
Will man aber die Flugbahn genauer ermitteln, so muß

man noch eine Größe in Rechnung stellen, die von sehr geringer Bedeutung ist, solange man es mit Flugbahnen geringer Reichweite zu tun hat. Erst bei großen Reichweiten macht sie sich bemerkbar. Es ist die Krümmung der Erdoberfläche.

Man überzeugt sich leicht, daß diese Krümmung einen günstigen Einfluß auf die erreichbare Flugweite des Projektils ausübt, weil der Erdboden gleichsam vor ihm zurückweicht; der Treffpunkt liegt infolgedessen in größerer Entfernung, als wenn die Erdoberfläche vollkommen eben wäre. Bahnform des Geschosses und Erdprofil wirken also einander parallel, und zwar um so mehr, je größer die Flugweite ist (Abb. 3). Schließlich muß man einräumen, daß bei genügender Vergrößerung der Anfangsgeschwindigkeit der Flugkörper längs des Erdprofils fliegt

Fallstrecke wäre genausogroß wie die Strecke, um die sich der Mond von der Erde in der gleichen Zeitspanne entfernen würde, wenn er, von jeglicher Erdanziehung frei, längs der Tangente seiner Bahn weiterreisen könnte (Abb. 4).

Mit der Entdeckung des Gesetzes der universellen Gravitation hat sich Newton mehr noch als Kepler in der Erforschung der grundlegenden Ursachen, die die Bewegung der Gestirne beherrschen, verdient gemacht. In der Tat lassen sich unmittelbar aus Newtons Gravitationsgesetz die Keplerschen Gesetze ableiten, die die Formen der Planetenbahnen beherrschen. Der Ruhm dessen, der diesen Zusammenhang aufgedeckt hat, ist um so größer, als er selbst zugleich auch die Grundlagen der dazu notwendigen Infinitesimalrechnung geschaffen hat.



und überhaupt nicht mehr auf die Erde aufschlägt. Es entsteht ein künstlicher Satellit, der darauf aus ist, die Erdkugel unbegrenzt zu umlaufen, so wie es der Mond auch tut.

Allerdings besteht ein großer Unterschied zwischen der Umlaufzeit des Mondes und der eines künstlichen Satelliten. Der erste braucht 27 1/3 Tage, um einen Umlauf zu vollenden, was einer Bahngeschwindigkeit von etwa 1 km pro Sekunde entspricht (genau 1017 m/s). Der künstliche Satellit dagegen benötigt 1 Stunde 30 Minuten, um einen vollen Umlauf in 280 km Höhe über der Erdoberfläche zu machen. Das entspricht einer Bahngeschwindigkeit von 7,75 km/s. Diese Abhängigkeit der Bahngeschwindigkeit vom Attraktionszentrum machte auch Newton ein halbes Jahrhundert nach Kepler zum Gegenstand der Untersuchung, und das ließ ihn sein Gesetz finden. Indem er die Schwerkraft, die den Apfel auf den Erdboden fallen läßt, mit der Anziehungskraft, die die Erde auf den Mond ausübt, identifizierte, berechnete er den Wert, den erstere in Mondentfernung haben müßte, wobei er fand, daß sich die Schwerkraft proportional dem Quadrate der Entfernung abschwächte. Andererseits errechnete er die Strecke, die der Mond zur Erde hin in einer Sekunde durchfallen müßte, wenn ihn nicht das Beharrungsvermögen auf seiner Bahn weiterlaufen ließe. Auf diese Weise konnte er die vollständige Exaktheit seiner Intuition bestätigen: Die

Abb. 3. - Der Einfluß der Erdkrümmung auf die Flugbahn. Die Flugbahnen haben die Bogenlängen CT_1 , CT_2 und CT_3 . Die Auftreffpunkte R_1 , R_2 und R_3 rücken wegen der Erdkrümmung nacheinander viel weiter fort als die Punkte T_1 , T_2 und T_3 . Ist die Bewegungsenergie des Flugkörpers schließlich groß genug, so fliegt er parallel zur Erdoberfläche.



Abb. 4. - Der Mond und Newtons Schwerkraftgesetz. M_1 und M_2 sind zwei Mondstellungen in einem zeitlichen Abstand von 1 Sekunde. PM_2 ist die Strecke, um die der Mond zur Erde hin gefallen ist, während er längs M_1P gelaufen wäre, hätte ihn die Erde nicht angezogen. Die Strecke PM_2 kann berechnet werden, wenn die Umlaufzeit des Mondes und seine Entfernung von der Erde bekannt sind. Sie ist 1,35 mm lang.

Nach Galileis Fallgesetz fällt ein Körper an der Erdoberfläche im luftleeren Raum in der ersten Sekunde 4,90 m tief. Das ist 3600 mal so viel, wie der Mond in der gleichen Zeit fällt. Diese letzte Zahl ist die Quadratzahl von 60. Der Mond ist aber auch 60mal weiter vom Erdzentrum entfernt als der Körper an der Erdoberfläche. Die Aussage von Newtons Schwerkraftgesetz wird an diesem Beispiel bestätigt.

II Der Umlauf des Mondes um die Erde

Die siderische und die synodische Umlaufszeit

Aus den verschiedensten Gründen wird unser Mond zu einer beträchtlichen Anzahl von Bewegungen gezwungen, die ihn in ihrer Gesamtheit eine recht komplizierte Bahn durchlaufen lassen. Die grundlegende Bewegung ist die der Revolution, die er um die Erde herum ausführt : Zu einem solchen Umlauf, siderischer Umlauf genannt, benötigt der Mond 27 Tage 7 Stunden 43 Minuten und 11 Sekunden. Am Ende dieser Periode ist die Verbindungslinie Erde-Mond genauso zu den Sternen ausgerichtet, wie sie es am Anfang war. Das Gleiche läßt sich indessen nicht auch von der Orientierung sagen, die diese Gerade in bezug auf die Sonne einnimmt, denn die Erde wandert selbst um die Sonne herum, während der Mond um die Erde wandert. Zuzufolge dieser weiteren Bewegung ist es notwendig, daß unser Satellit seinen Lauf noch reichlich zwei Tage fortsetzt, bis die drei Weltenkörper wieder dieselbe Position zueinander erreicht haben wie am Anfang der obengenannten Periode. Diesem so vollendeten, längeren Umlauf hat man die Bezeichnung synodischer Umlauf oder Lunation gegeben, wobei die letztere auf die bekannte Aufeinanderfolge der Mondphasen hinweist. Die Dauer einer Lunation beträgt 29 Tage 12 Stunden 44 Minuten und 2 Sekunden (Abb. 5).

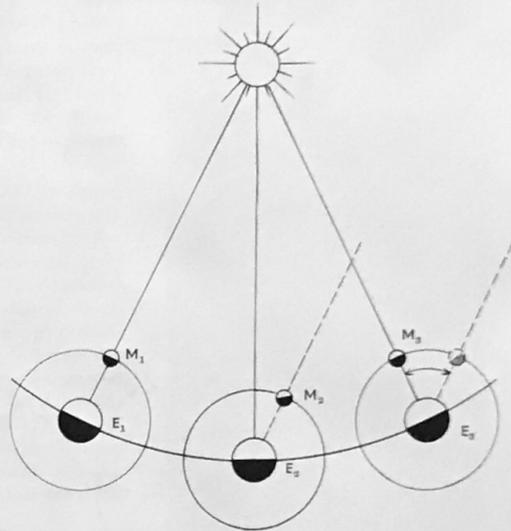


Abb. 5. - Siderischer und synodischer Umlauf des Mondes. Während die Erde von E_1 nach E_2 läuft, durchheilt der Mond einen vollen Kreisumfang (360°), d. i. einen siderischen Umlauf. EM bleibt in gleicher Weise zu den Sternen ausgerichtet, zeigt aber nach einem siderischen Umlauf des Mondes nicht mehr zur Sonne. Damit die drei Gestirne wieder auf eine Gerade zu liegen kommen, muß der Mond seine Bewegung fortsetzen, bis die Erde E_2 erreicht hat. Der Kreisbogen M_1M_3 entspricht einem synodischen Umlauf oder einer Lunation. (Die Zeichnung ist nicht maßstabgerecht. In Wirklichkeit ist E_1E_2 viel größer als E_2E_3 .)

Die wirklichen und scheinbaren Bewegungen

Um auch die weiteren Bewegungen des Mondes zu begreifen, ist es wichtig, sich zuvor zu erinnern, daß diese ihren Ausgang von der Erde nehmen. Die Erde vollendet in 365 Tagen und 6 Stunden einen vollständigen Umlauf um die Sonne. Außerdem dreht sie sich im Laufe von 24 Stunden einmal um ihre Drehachse, die keineswegs senkrecht auf der Erdbahnebene, das heißt auf der Ebene der Ekliptik, steht, vielmehr gegen die letztere unter einem Winkel von $66^\circ 33'$ geneigt ist, was darauf hinausläuft, daß Äquator- und Ekliptikebene einen Winkel von $23^\circ 27'$ miteinander einschließen (Abb. 6).

Von unserem irdischen Blickpunkt aus können wir uns nur von den wirklichen Bewegungen unserer Erde überzeugen, soweit sie sich auf die scheinbaren Bewegungen aller anderen Gestirne auswirken. Einesteils ruft die Bewegung der Erde um sich selbst bei uns die Illusion hervor, daß sich die Sonne und mit ihr das ganze Himmelsgewölbe um uns dreht. Und andererseits erweckt uns die jährliche Bewegung der Erde den Eindruck, als ob sich die Sonne fortwährend unter den Sternen weiterschiebt und in einem Jahr die zwölf Sternbilder des Tierkreises durchläuft (Abb. 7). Sogar die Neigung der Rotationsachse der Erde spielt bei dieser Art von Illusionen eine Rolle : Sie ist verantwortlich für die Änderungen, denen die tägliche Sonnenbahn unterliegt, und ebenso für die Unterschiede in den Zeitdauern, während deren sich unser Tagesgestirn über dem Horizont befindet.

Gleich der Sonne, nur etwas langsamer, scheint auch unser Mond täglich längs einer Bahn von Osten nach Westen über den Himmel zu ziehen. Weil diese scheinbare Bewegung des Mondes am Himmelsgewölbe langsamer ist als die der Sonne, verschiebt er sich auch unter den Sternen mit anderer Schnelligkeit. Wir sehen ihn von

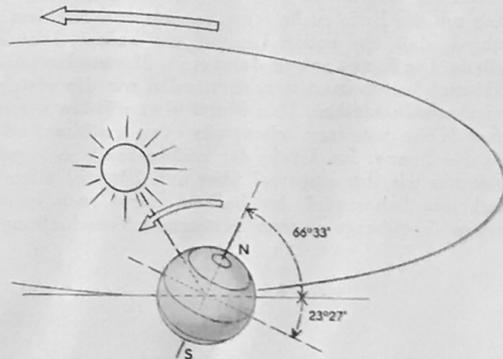


Abb. 6. - Die Neigung der Erdachse gegen die Ekliptik. Die Ebene, in der die Bahn der Erde und die Sonne liegen, ist die Ekliptik. Die Drehachse NS der Erde ist gegen die Ekliptik um $66^\circ 33'$ geneigt. Deshalb bildet die Äquatorebene mit der Ekliptik einen Winkel von $23^\circ 27'$.

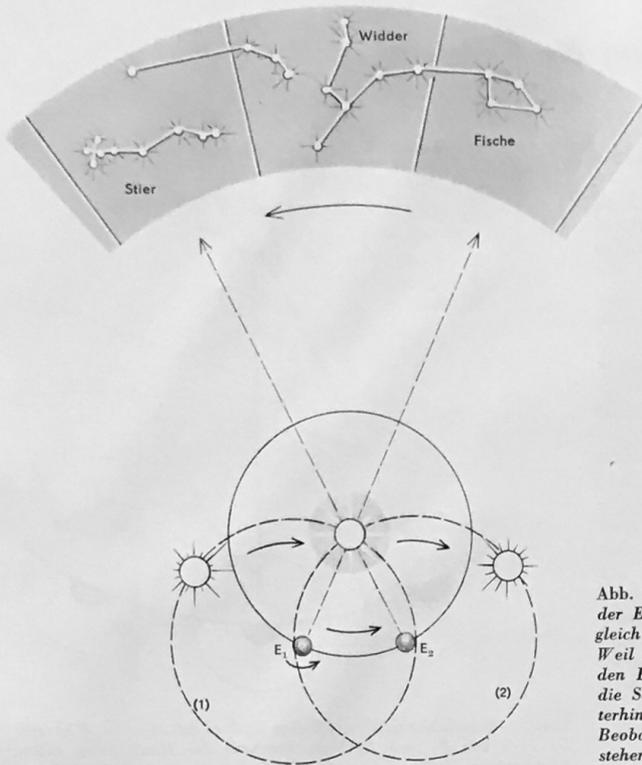


Abb. 7. - Scheinbare Bewegungen der Sonne. E_1 zeigt die Stellung der Erde im März. Könnte ein Beobachter Sonne und Sterne zugleich sehen, so stände für ihn die Sonne im Sternbild der Fische. Weil sich die Erde um ihre eigene Achse dreht, hat der Beobachter den Eindruck, als ob sich das Himmelsgewölbe herumdrehte und die Sonne die scheinbare Bahn (1) beschrieb. Da die Erde weiterhin die Sonne umläuft, so erreicht sie 2 Monate später E_2 . Einem Beobachter schiene dann die Sonne im Sternbild des Stieres zu stehen. Die scheinbare Bahn der Sonne wäre dann die Bahn (2).

einem Tag zum anderen später auf- und untergehen; die tägliche Verzögerung beträgt durchschnittlich 50 Minuten 30 Sekunden.

Um es ganz richtig zu sagen: Wir könnten die Mondbewegung nur dann einwandfrei abschätzen, wenn sich die Erde einmal nicht mehr um ihre Achse drehte. Ließe sich das herbeiführen, so würden wir nicht mehr von Tag und Nacht sprechen können. Wenn sich aber unser Erdball trotzdem weiterhin um die Sonne drehte, würde auch weiterhin wie bisher Jahr für Jahr ablaufen. Jene zweite scheinbare Bewegung unseres Tagesgestirns würde sich weiterhin vollziehen, und wir würden bemerken, daß es sich um die Erde zu bewegen scheint, nur mit dem Unterschied, daß ein voller Umlauf ein ganzes Jahr dauern würde. Die Sonne würde dann sechs Monate lang über den Himmel laufen, und danach würden wir die gleiche Zeit im Dunkeln bleiben. Den Mond aber würden wir in gleicher Weise wandern sehen, nur etwa zwölfmal schneller als die Sonne. Im Laufe der sechsmonatigen Dunkelheit könnten wir ihn sechsmal über den Himmel eilen sehen, und das Schauspiel der halben Lunationen würde bei jedem Vorübergang eine bestimmte Verschiebung erleiden.

Zu Beginn der halbjährigen Nacht würde der Mond als Vollmond aufgehen und als Neumond untergehen. In der Mitte der Nacht sähen wir die halbe Lunation vom ersten bis zum letzten Viertel und zum Schluß der Nacht spielte sich die halbe Lunation vom Neumond bis zum Vollmond vor unseren Augen ab.

Nehmen wir schließlich noch an, unser Erdball hörte auf, sich um die Sonne zu drehen, so wäre die eine seiner Hälften beständig von Sonnenlicht überflutet, während die andere dauernd Nacht hätte. Von der dunklen Hemisphäre aus würde man sehen, daß der Mond, so wie in unserer vorhergehenden Annahme, periodisch eine Hälfte seiner Bahn beschreibt, ohne daß sich indessen die Mondphasen von Umlauf zu Umlauf verschieben. Dann könnte auch nicht mehr von einem synodischen Umlauf die Rede sein, weil dieser mit dem siderischen identisch wäre.

Mit diesen gänzlich hypothetischen Betrachtungen soll gezeigt werden, in welchem Maße die Bewegungen unserer Erde diejenigen der Sterne vor unseren Augen verzerren. Zugleich wird verständlich, warum die Menschheit so viel Zeit gebraucht hat, um die beobachteten Vorgänge in unserem Sonnensystem verständlich zu machen.

Der Doppelplanet Erde-Mond

So sehr auch Erde und Mond in mancherlei Hinsicht voneinander verschieden sind, so bilden sie dennoch in unserem Sonnensystem miteinander ein Ganzes. Obwohl sich ihre einzelnen Massen und Volumina ganz beträchtlich voneinander unterscheiden, sind diese Unterschiede recht gering gegenüber denjenigen, die man an sonstigen doppelten Systemen feststellen kann. Unter diesem Gesichtspunkt sind die folgenden Beispiele neben dem von Erde und Mond besonders vielsagend. Der Durchmesser des großen Planeten Neptun ist zehnmal größer als der seines Satelliten Triton, indessen hat derjenige der Erde nicht einmal das Vierfache vom Monddurchmesser. Die Masse des Jupiter ist zehntausendmal beträchtlicher als die seines dritten Mondes, während die Erdmasse nur 81 Mondmassen gleich ist. Was endlich die gegenseitige Entfernung von Erde zu Mond angeht, so gehört auch diese unter Berücksichtigung der sonstigen Proportionen zu den kleinen Entfernungen dieser Art.

Aus diesen verschiedenen Gründen belegt man das System Erde-Mond zuweilen mit dem Namen Doppelplanet, in Analogie zur Bezeichnung Doppelsterne, die eine zahlenmäßig große Sternengruppe kennzeichnet. Die Einzelkomponenten der Doppelsterne sind nicht allzu verschieden groß und bewegen sich so, daß jede eine elliptische Bahn um den gemeinsamen Massenschwerpunkt (Gravitationszentrum) beschreibt. Im Grunde gilt das auch für das Gespann Erde-Mond, doch ist hier jener Schwerpunkt im Erdinnern zu suchen, und zwar ist er um drei Viertel Erdradien vom Erdzentrum entfernt. Betrachtet man in aller Strenge die gegenseitigen Bewegungen von Erde und Mond, so muß man folgenden Tatsachen Rechnung tragen: Während der Mond seine Keplersche Ellipse um das Gravitationszentrum, dem Erde und Mond zugehören, beschreibt, zieht die Erde auf einer anderen, aber ebenfalls Keplerschen Ellipse um das gleiche Zentrum herum (Abb. 8). Zudem ist der Punkt, der jahraus jahrein eine elliptische Bahn um die Sonne zieht, nicht der Erdmittelpunkt, sondern eben dieses Gravitationszentrum (Abb. 9).

In diesem Zusammenhang muß noch ein anderer Punkt ins Auge gefaßt werden; er betrifft die Form der Bahn, die der Mond in seinem Verhältnis zur Sonne einhält. Man kann durchaus nicht sagen, daß der Mond die Erde umläuft wie ein Hund seinen promenierenden Herrn, denn dann wäre die Mondbahn eine Kurve mit Schleifen. Vielmehr ist die Geschwindigkeit, mit der die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne eilt, dreißigmal größer als die Geschwindigkeit, mit der der Mond um die Erde läuft. Daraus ist ersichtlich, daß die Mondbahn die Form einer Wellenlinie ausbildet, die ständig von einer Seite zur anderen Seite der Erdbahn wechselt (Abb. 10). Schließlich ist die Distanz der Erde von der Sonne vierhundertmal größer als die, die unseren Erdball vom Monde trennt. Unter diesem Verhältnis gesehen weicht die Mondbahn nur wenig von der Erdbahn ab; sie ist trotz ihres Charakters einer Wellenlinie derartig auseinandergezogen, daß sie in jedem Punkt konkav zur Sonne hin bleibt (Abb. 11).

Abb. 9. - Die Ellipsenbahn des gemeinsamen Schwerzentrums von Erde und Mond um die Sonne. Die Mittelpunkte von Erde und Mond umwandern beständig das gemeinsame Schwerzentrum. Nur dieses beschreibt, in jedem Jahr einmal, eine Ellipsenbahn um die Sonne.

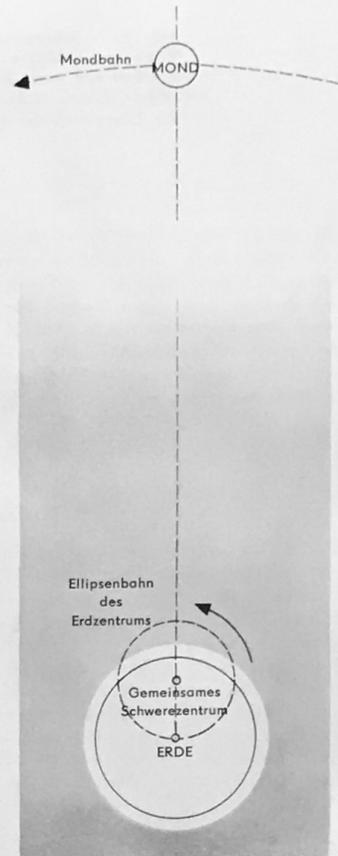
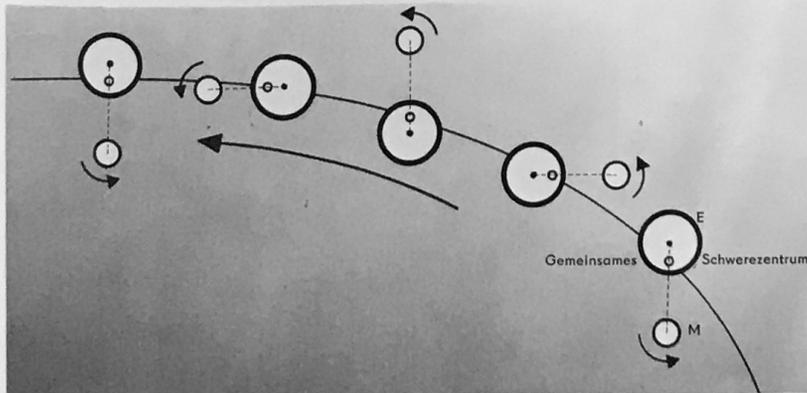


Abb. 8. - Die Drehung der Erde und des Mondes um das gemeinsame Schwerzentrum. Die Lage des Schwerzentrums wird durch das Massenverhältnis der beiden Körper bestimmt. Wären beide Massen gleich, so läge das Schwerzentrum in der Mitte zwischen beiden Massenzentren. Da aber die Erdmasse 81,5mal größer ist als die des Mondes, liegt das Schwerzentrum 81,5mal näher dem Erdmittelpunkt. Tatsächlich liegt es 4650 km von diesem entfernt. Deshalb beschreibt auch das Erdzentrum während eines Mondumlaufs eine geschlossene Bahn von knapp 5000 km Halbmesser um dieses Schwerzentrum.

Abb. 10. - Schematische Darstellung der Mondbahn. Der Mond beschreibt keineswegs eine Reihe von Schleifen um die Erde herum. Seine Bahn ist vielmehr eine Wellenlinie, die fortwährend von einer zur anderen Seite der Erde wechselt. Da ein synodischer Umlauf 29,53 Tage umfaßt, dauern 12 Lunationen rund 354 Tage, d.h. von Jahr zu Jahr verschiebt sich der Beginn der Lunationen um etwa 11 Tage.

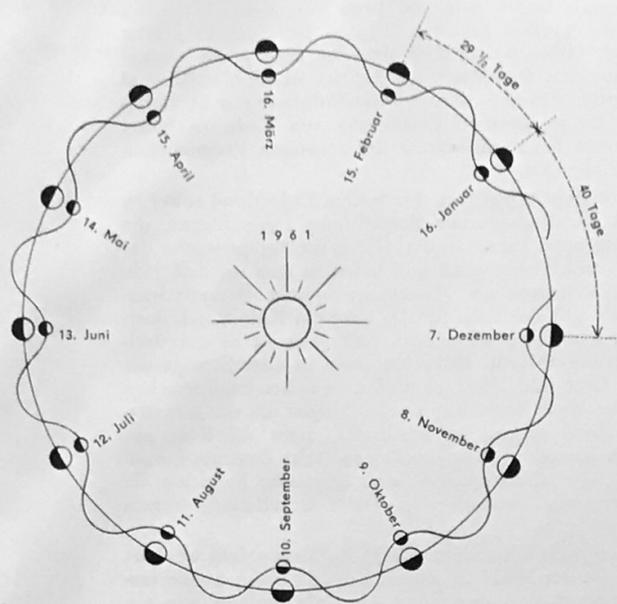
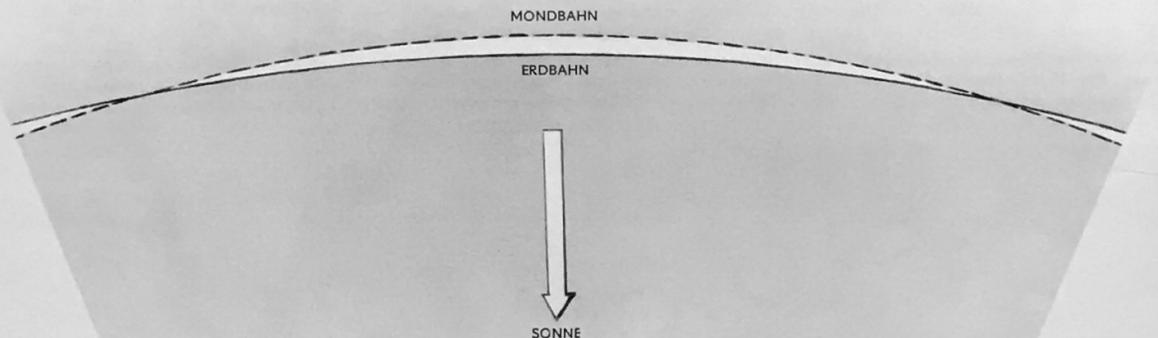


Abb. 11. - Die wirkliche Form von Erd- und Mondbahn. Wie die Erdbahn ist auch die des Mondes beständig zur Sonne hin gekrümmt.



III Die Mondphasen

Die Albedo des Mondes

Unser Erdsatellit ist ein undurchsichtiger Körper, der kein eigenes Licht aussendet. Wenn er trotzdem hell scheint, so deshalb, weil er einen Teil des Lichtes, das ihm die Sonne schickt, zurückwirft. Seine Albedo, so heißt sein Reflexionsvermögen, ist aber äußerst gering. Die Albedo hängt von der Art des Oberflächenmaterials ab; sie beträgt z.B. bei der Erde 0.39, während die des Mondes nur 0.07 ist. Das bedeutet, daß unser Satellit 93 % des auftretenden Sonnenlichtes verschluckt. Er zieht wohl am Him-

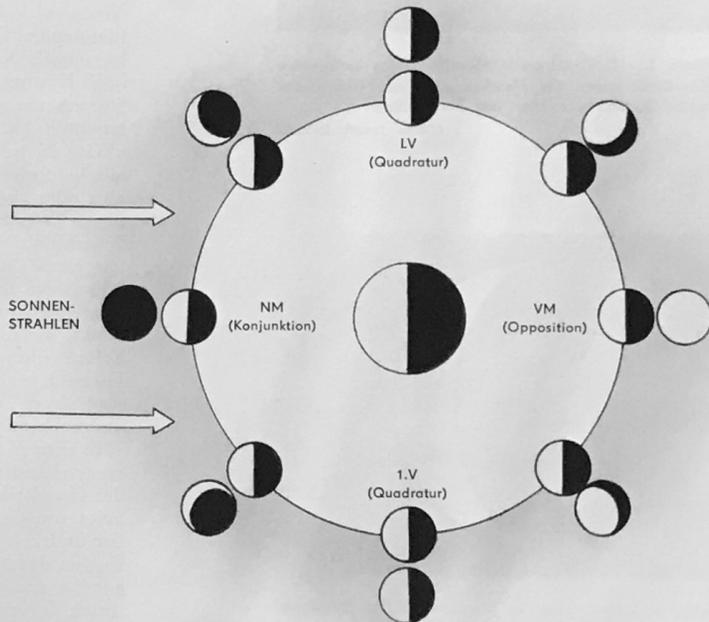
melsgewölbe eine Bahn, die der Sonnenbahn analog ist, wenn sie auch langsamer durchlaufen wird; aber der erhellte Anteil seiner Oberfläche, der unseren Augen das helle Licht gibt, wechselt fortwährend, weil er von der Stellung abhängig ist, die der Mond zu Sonne und Erde einnimmt. Die verschiedenen Lichtgestalten, in denen der Mond zufolge des Winkels, unter dem er von der Sonne beleuchtet wird, von der Erde aus zu sehen ist, heißen die Mondphasen.

Der zunehmende Mond

Die Ebene, in der sich der Mond um die Erde bewegt, ist der Ekliptik nahe. Um aber die Erscheinung der Mondphasen auf einfache Art und ohne beträchtliche Fehler zu erklären, darf man annehmen, beide Ebenen seien miteinander verschmolzen (Abb. 12). Befindet sich unser Mond für uns in der gleichen Richtung, in der wir die Sonne sehen, so wendet er uns seine nicht erleuchtete Oberfläche zu, und wir können nichts von ihm wahrnehmen. Das ist die Zeit des Neumondes oder, wie die Astronomen sagen, der Konjunktion. Würden die beiden genannten Ebenen, Mondbahn und Erdbahn, wirklich zusammenfallen, so

würde der Mond bei jeder Konjunktion ganz genau vor der Sonnenscheibe vorüberziehen und sie demzufolge verdunkeln. Die wenigen Grade, um die diese beiden Gestirne zu diesem Zeitpunkt jedoch im allgemeinen am Himmel voneinander entfernt sind, bilden den Grund, warum Verfinsterungen so selten eintreten. Vom zweiten Tag nach Neumond, zuweilen schon vom ersten Tage an, ist der Winkel, den die Richtungen von uns zu Sonne und Mond miteinander bilden, groß genug, um uns einen sehr schmalen Teil der Mondscheibe sichtbar werden zu lassen. Wir sehen dann eine sehr dünne Sichel, die zur Sonne hin

Abb. 12. - Die Mondphasen. Die Kreisscheiben außerhalb der Kreislinie zeigen den Anblick der Mondscheibe in den verschiedenen Mondphasen von der Erde aus gesehen. Die Kreisscheiben auf der Kreislinie zeigen den Anblick der Mondkugel zur gleichen Zeit, jedoch mit einer Blickrichtung senkrecht zur Mondbahnebene.



gewölbt ist. Dem Auftreten dieser zarten Lichtfigur ist von jeher eine solche Bedeutung beigelegt worden - manche Religionen haben sogar diesen Zeitpunkt gewählt, um den Beginn einer rituellen Periode festzulegen -, daß sie nicht selten unbedenklich als Neumond selbst bezeichnet wird. Zuweilen hört man auch die Meinung vertreten, daß der Eintritt dieses ersten Mondlichtes vom Mondalter, das heißt von der Anzahl der Stunden, die seit der Konjunktion verfließen sind, abhängt. Auch das ist nicht richtig. Denn aus mancherlei später noch darzulegenden Gründen

tritt der Zeitpunkt, an dem die beiden Richtungen zu Sonne und Mond genügend weit auseinandergelassen, bei jedem synodischen Umlauf früher oder später ein. Die scheinbare Schnelligkeit unseres Satelliten am Himmelsgewölbe variiert übrigens ebenfalls, so daß der genaue Winkel, der für das Sichtbarwerden des ersten Mondlichtes entscheidend ist, durchaus nicht unabänderlich mit dem Alter des Mondes in Beziehung steht. Man darf - von besonderen Umständen abgesehen - sagen, daß dieser Winkel einen Mindestwert von 10° haben muß.



Photo 1. - Das aschgraue Mondlicht. Im aschgrauen Mondlicht treten die gleichen dunklen Flecken und hellen Konturen hervor wie bei Vollmond.

(Photo Joseph Ruland.)

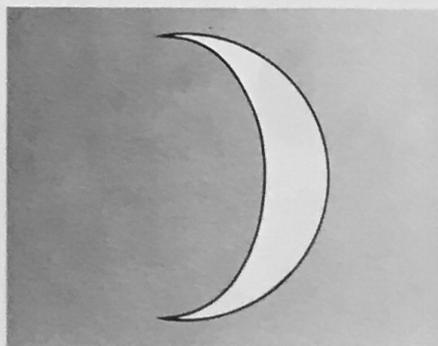


Abb. 13. - Die Form der Mondsichel. Der Mondrand hat immer die Form eines Kreisbogens. Der Terminator dagegen, in Wirklichkeit ein halber Großkreis, erscheint uns in der Form eines Ellipsenbogens.

Das aschgraue Mondlicht

Obwohl zur Zeit des Neumondes das gesamte Sonnenlicht, das unseren Satelliten trifft, auf die Halbkugel fällt, die uns nicht zugewendet ist, wäre es falsch zu behaupten, seine Vorderseite würde keinerlei Beleuchtung erfahren und für uns dunkel bleiben. Ganz im Gegenteil: sie zeichnet sich sehr wohl durch eine merkliche Aufhellung aus. Um das einzusehen, genügt es, sich auf den Mond versetzt zu denken. Man würde sich dann auf der Nachtseite des Mondes befinden; aber die Erde würde man genauso am Himmel glänzen sehen, wie wir Erdbewohner den Vollmond erblicken. Dieser Erdschein, den die Astronauten dereinst erblicken zu können hoffen, ist weitaus heller als der Mondschein auf unserer Erde, was zwei Ursachen hat: Einmal erscheint die Erde vom Monde her gesehen als eine viel (13,5mal) größere Scheibe am Himmel, und zum anderen ist die Albedo der Erde viel (5,5mal) größer. Man errechnet, daß der Vollerde-Schein deshalb dem Monde 40 bis 50mal mehr Licht spendet, als uns der Vollmond zur Erde herüberwirft.

Wenn wir von unserem irdischen Beobachtungspunkt aus dieses reflektierte Licht auch nicht im Zeitpunkt des Neumondes beobachten können, weil es gegenüber dem blendenden Sonnenlicht verblaßt, so ist das kurz vor oder kurz nach Neumond anders. Wir können z.B. zwei Tage nach Konjunktion bei Betrachtung des Mondes kurz nach Sonnenuntergang, wenn die Dämmerung nur wenig fortgeschritten ist, außer der zarten Lichtsichel die gesamte übrige Mondscheibe schwach erleuchtet sehen. Personen mit besonders großer Sehschärfe können darauf sogar die eine oder andere Einzelheit erkennen (Phot. 1). Man hat diese indirekte Beleuchtung, die eines der seltsamsten Schauspiele unseres Satelliten darstellt und die die Gelehrten lange in Verlegenheit gebracht hat, das aschgraue Mondlicht genannt. Das ist übrigens recht überraschend, wenn man nur an die mancherlei richtigen Erklärungen denkt, die die Männer der Wissenschaft seit den ältesten Zeiten über sonstige, komplizierte Erscheinungen am Himmel gegeben haben. Leonardi da Vinci und Kepler sind als die ersten zu nennen, die den wahren Ursprung des aschgrauen Mondlichtes aufgezeigt haben.

In dem Maße, in dem sich der von unseren Sehstrahlen eingeschlossene Winkel vergrößert, wächst auch die Breite der Mondsichel. Ihr Profil am Himmel wird auf der einen Seite von dem Rande der Mondscheibe gebildet und auf der anderen Seite von der Linie, die die hell erleuchtete Region der Mondoberfläche von der noch im Schatten liegenden trennt. Diese Grenzlinie heißt mit dem Fachausdruck Terminator, man könnte auch sagen Aufgangsterminator, weil ein Beobachter auf einem beliebigen Punkte dieser Linie die Sonne aufgehen sähe. Im Gegensatz zu der Form, in der die meisten Künstler den Terminator darstellen, verläuft er nicht wie ein Kreisbogen, sondern wie eine Ellipse, was aus den Gesetzen der Geometrie und der Perspektive folgt (Abb. 13).

Mondphasen

Mondphasen

(Photos Observatorien Mount Wilson und Palomar, 250 cm Spiegel.)



Photo 2. - Der Mond 3 Tage alt.



Photo 3. - Der Mond 5 Tage alt.



Photo 4. - Das erste Viertel.



Photo 5. - Der Mond 11 Tage alt.



Photo 6. - Der Vollmond.

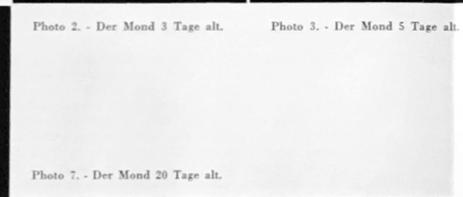


Photo 7. - Der Mond 20 Tage alt.



Photo 8. - Das letzte Viertel.

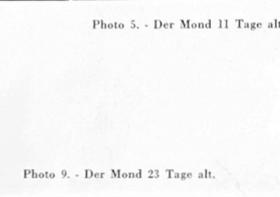


Photo 9. - Der Mond 23 Tage alt.



Photo 10. - Der Mond 26 Tage alt.

Wenn der Mond das Alter von etwa einer Woche erreicht hat, zeigt er uns die Form einer halben Kreisscheibe; damit ist der Augenblick des ersten Viertels oder der Quadratur erreicht. Der Terminator ist dann eine gerade Linie, die die Mondscheibe in zwei gleich große Flächen teilt. Von dieser Zeit an geht der Mond so weit am Himmelsgewölbe hinter der Sonne her, daß man ihn bereits am Nachmittag bequem erkennen kann. Zur Zeit des ersten Viertels gibt es so gut wie kein aschgraues Mondlicht mehr. Von seiner ersten Sichtbarkeit an vermindert es sich tagtäglich mehr, nicht nur weil sich die helle Sichel darüber hinwegbreitet, sondern auch, weil die Phase des Erdscheins, die der

unserer Mondphasen entgegengesetzt ist, ein immer mehr abnehmendes Erdlicht zeigt.

Vom ersten Viertel an schreitet der erhellte Teil der Mondscheibe über deren Mitte vorwärts, der Terminator nimmt wieder elliptische Form an, nur verläuft jetzt seine Wölbung in anderem Sinne. Am Ende einer weiteren Woche ist die Totalität einer direkt erleuchteten Mondscheibe erreicht. Der Mond hat damit seine zunehmende Periode vollendet; er erhebt sich für uns über dem Horizont im Augenblick des Sonnenuntergangs. Diesen Zeitpunkt nennt man Vollmond oder Opposition (Photos 2-6).

Der abnehmende Mond

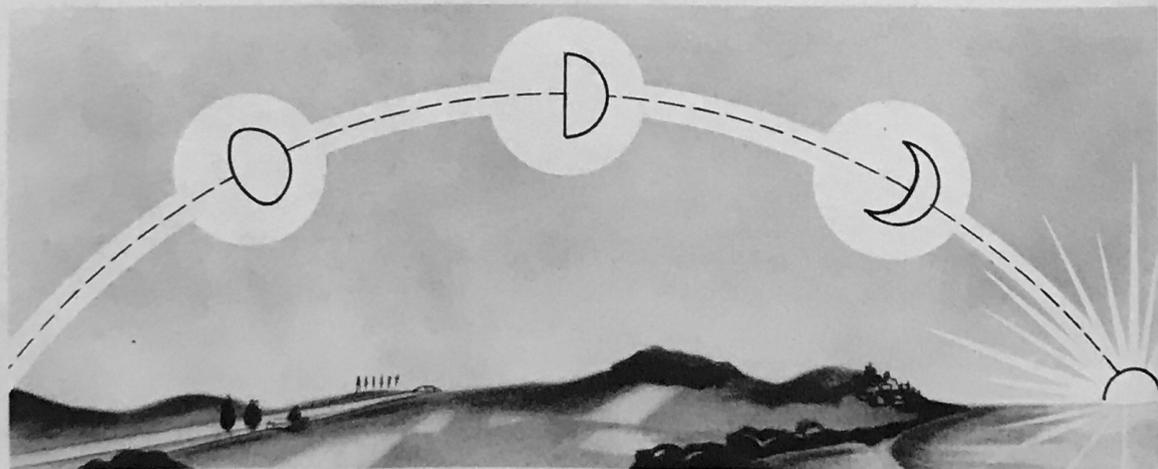
Sogleich nach Erreichen der Opposition beginnt die Periode des abnehmenden Mondes; eine neue Grenzlinie zwischen Schatten und Licht entsteht längs desselben Randes wie zu Beginn der Lunation, nur haben sich Schatten und Licht an ihr vertauscht. Diese Scheidelinie heißt jetzt Untergangsterminator, was sich in entsprechender Weise wie der Aufgangsterminator erklärt. Sie schreitet nunmehr wieder quer über die Mondscheibe Tag für Tag zurück, so wie sie in der zunehmenden Phase vorangeschritten ist. Der erleuchtete Teil wird deshalb stärker und stärker eingeschnürt, und der Mond geht von da an erst nach Sonnenuntergang auf.

Eine vierte Phase beginnt schließlich, wenn der Untergangsterminator die Mondscheibe in zwei gleiche Teile aufteilt, wobei er eine gerade Linie bildet und somit das letzte Viertel erzeugt, das das Spiegelbild des ersten Viertels ist. Der helle Teil des Mondes nimmt für uns die Form einer von Tag zu Tag schmaler werdenden Sichel an, deren Krümmung der der zunehmenden Sichel entgegengesetzt ist. Dann geht der Mond erst nach Mitternacht auf, und das aschgraue Mondlicht erscheint allmählich wieder. Schließlich ist der Mond 24 Stunden hinter der Sonne her, die Lunation ist beendet, und Sonne und Mond befinden sich wieder miteinander in Konjunktion (Photo 7-10).

Die Mondsichel am Himmel

Die eigenartige Stellung der Mondsichel am Himmel ist einige Überlegungen wert. Jedermann ist die Gedächtnisregel vertraut, die sagt, ob man es mit zunehmendem oder abnehmendem Monde zu tun hat. Verwirrend dagegen ist manchem zuweilen die Stellung der Mondsichel im Hinblick auf die Sonne. Vernünftigerweise sollte die Verbindung der Sichel- oder Hörnerspitzen in ihrer Mitte senkrecht auf der Geraden stehen, die diesen Punkt mit der Sonne verbindet. Wenn sich das auch bewahrheitet, solange die Sichel noch sehr schmal ist, so trifft das keineswegs mehr zu, sobald der Mond das erste Viertel erreicht oder das letzte Viertel noch nicht wieder hinter sich gebracht hat. Nichts könnte besser die Art, wie sich die Mondsichel am Himmel im Verlaufe einer Lunation mehr und mehr anders orientiert, besser dartun, als eine Folge photogra-

phischer Aufnahmen mittels einer feststehenden Kamera. Wäre diese auf den Himmel mit dem zunehmenden Monde ausgerichtet, so würde unser Satellit in dieser Reihenaufnahme wechselnde Orientierungen und Anblicke erkennen lassen. Durch Verbindung der Mittelpunkte aller Einzelaufnahmen würde man eine Kurve erhalten, die sämtliche Verbindungslinien der Sichelspitzen im rechten Winkel trifft und in ihrer Verlängerung bei der Sonne ankommt. Natürlich darf man nicht daraus den Schluß ziehen, daß die Sonnenstrahlen gekrümmt sind. Vielmehr liegt hier eine optische Täuschung vor. Ohne jeden Zweifel müssen wir hier jeden Sonnenstrahl als geradlinig ansehen, aber unser Auge zeichnet die Sonnenstrahlen in der Projektion auf das Himmelsgewölbe, und dessen Krümmung geht in der Täuschung auch auf den Sonnenstrahl über (Abb. 14).



IV Entfernung, Oberfläche und Masse des Mondes

Die größte und die kleinste Entfernung

Die mittlere Entfernung vom Erdzentrum bis zu dem des Mondes beträgt 384 000 km, was so viel ist wie der sechzigfache Erdradius. Dreißig Erdkugeln, in natürlicher Größe nebeneinandergesetzt, würden diese Strecke ausfüllen. Diese letztere Zahl ist für astronomische Verhältnisse nur klein zu nennen; bei unvoreingenommener Betrachtung mag sie erstaunen lassen. Sie liefert einen der Gründe, die die Bezeichnung »Doppelplanet« für das System Erde-Mond rechtfertigen.

Die Bahn des Mondes um die Erde ist elliptisch wie die aller Sterne. Nur ist ihre Exzentrizität ausgeprägter, sie beträgt $1/18$ oder 0,055 gegen 0,017 der Erdbahn. Der Punkt der Mondbahn, der von der Erde am weitesten entfernt ist, heißt Apogäum und hat eine mittlere Entfernung von 405 000 km von der Erde, im Maximum sogar 406 000 km. Der erdnächste Punkt dagegen wird als Perigäum bezeichnet und liegt im Mittel 363 000 km vom Erdzentrum entfernt, was sich im Minimum auf 356 500 km vermindert. Der Abstand Erde-Mond variiert somit recht beträchtlich, nämlich zwischen 28 und 32 Erddurchmes-

sern. Die Oberfläche der Erde ist von der Mondes im Augenblick der größten Annäherung aber nur 348 000 km entfernt.

Um die Distanz Erde-Mond zu berechnen, sind verschiedene Methoden erdnen worden; die gebräuchlichste von ihnen ist im Grunde die gleiche, wie sie von Feldmessern angewendet wird, um die Entfernung bis zu einem unzugänglichen Punkte zu messen. Dazu wird zunächst eine sehr genau ausgemessene Strecke als Basis derart festgelegt, daß sie, so gut wie möglich, einen rechten Winkel zum Zielpunkt der Messung einhält. Richtet der Feldmesser sein Winkelmeßgerät erst vom einen, dann vom anderen Endpunkt der Basisstrecke sowohl zum Zielpunkt als auch längs der Basis, so überblickt er ein Dreieck, von dem sich jedes beliebige Stück und somit auch die Entfernung zum Zielpunkt errechnen läßt. Die Genauigkeit einer solchen Messung hängt vor allem von der Länge der Basis ab. Schneiden sich die beiden Blickrichtungen im Ziel unter einem rechten Winkel, so erhält man die genauesten Meßergebnisse; deshalb wäre eine Basislänge doppelt so groß



Abb. 15. - Die Messung der Entfernung Erde-Mond. Die Entfernung Berlin-Kapstadt läßt sich leicht bestimmen. Aus den Blickwinkeln findet man die Größe der Winkel an B und C und kennt dann alle Teile des Dreiecks BCM, somit auch die gesuchte Entfernung. Da der Erdhalbmesser ebenfalls bekannt ist, so kennt man auch die Mondparallaxe.

wie die Entfernung Basismitte-Ziel ideal zu nennen. Wohl-gemerkt, handelt es sich um eine so große Entfernung wie die des Mondes von der Erde, so läßt sich der Idealfall auch nicht annähernd verwirklichen, und man sieht sich gezwungen, mit einer wesentlich kleineren Basislänge zu arbeiten. Um die Basis so gut wie möglich rechtwinklig zur Mondrichtung zu legen, legt man sie in einen Erdmeridian.

Es war im Jahre 1751, als die französischen Astronomen Lalande und Lacaille zum ersten Male dieses Verfahren auf den Mond anwendeten. Um diese in die Geschichte der Astronomie eingegangene Messung durchzuführen, begab sich der eine nach Berlin, der andere zum Kap der Guten Hoffnung, die beide auf demselben Meridian liegen. Sie erhielten Meßergebnisse außerordentlicher Genauigkeit, die heute noch erstaunen lassen, wenn man ihre zum Teil nur groben Hilfsmittel in Betracht zieht (Abb. 15).

Zu den weiteren seither erdnenen Methoden zur Bestimmung der Mondentfernung gehört auch die besonders eindrucksvolle des Radar. Das Prinzip dieses Forschungsverfahrens ist bemerkenswert einfach; es ist das des Echos. Dieses versetzt uns bekanntlich in die Lage, das Zurückkehren eines kurzen Rufes von einer genügend weit entfernten Wand zu vernehmen und aus der Zeit vom Ruf bis zu diesem Widerhall unseren Abstand von der zurückwerfenden Wand zu errechnen, sofern wir nur genau genug die Geschwindigkeit der Schallfortpflanzung kennen. Dasselbe geschieht mit radio-elektrischen Signalen; auch sie wer-

Links:

Abb. 14. - Die Stellung der Mondsichel am Himmel. Eine gedachte Verbindungslinie von der Sonne zum Mittelpunkt der Mondscheibe in den verschiedenen Phasen ist immer eine gerade Linie. Sie erscheint uns gekrümmt, weil wir sie auf das Himmelsgewölbe projizieren.

den zurückgeworfen, wenn sich ihrer Ausbreitung ein Hindernis entgegenstellt; das entstehende Echo kommt nach einer gewissen Laufzeit zurück, und aus ihr wird die gesuchte Entfernung an der geeichten Skala des Empfänger-Bildschirms abgelesen. Während sich der Schall mit einer Geschwindigkeit von rund 340 Metern pro Sekunde ausbreitet, laufen die radio-elektrischen (besser: elektromagnetischen) Wellen mit 300 000 km in jeder Sekunde durch den Raum; grob gesprochen: Fast eine Million mal schneller kehren die letzteren zurück. Das erfordert selbst bei weit entfernten Meßobjekten Apparaturen, mit denen sich sehr kurze Zeitintervalle, nämlich Millionstel Sekunden, erfassen lassen. Die erste exakte Messung der Mondentfernung mittels Radar, die bekannt geworden ist, wurde am 22. Januar 1946 durchgeführt. Das Echo wurde nach einer Laufzeit von etwa $2\frac{1}{2}$ Sekunden aufgefangen, was der astronomisch ermittelten Entfernung entspricht.

Mit der Mondentfernung hat man zugleich auch seine Parallaxe ermittelt, d.h. den Winkel, unter dem ein Beobachter vom Mondmittelpunkt aus den Erdradius sehen würde. Der mittlere Wert dieser Mondparallaxe ist 57

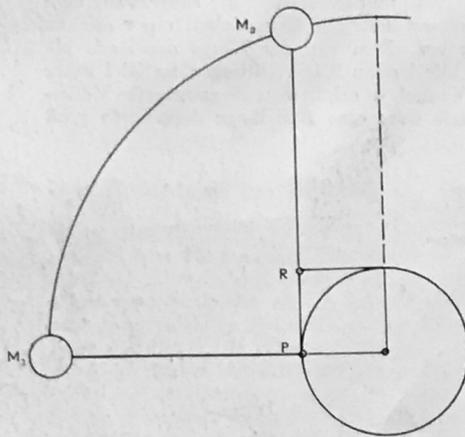


Abb. 16. - Die Entfernungen zum Monde in seiner Zenit- und in seiner Horizontalstellung. Ist der Mond für einen Beobachter in P im Zenit M_1 , so ist seine Entfernung PM_1 . Steht der Mond aber für denselben Beobachter im Horizont, d.i. in M_2 , so ist die Entfernung PM_2 , und es gilt: $PM_2 = PM_1 + \text{ein Erdradius}$.

Bogenminuten, somit praktisch ein Bogengrad. Den Mondhalbmesser dagegen sehen wir von der Erde aus 15 Bogenminuten und 32 Bogensekunden ($15'32''$) groß. Somit erscheint der mittlere Durchmesser unseres Satelliten dem Erdbewohner etwa 0,5 Bogengrad ($0,5^\circ$) groß, und er schwankt zwischen $29'31''$ und $33'30''$. Es ist seltsam, daß derartige Größen, nach Augenmaß geschätzt, ebenso häufige wie grobe Fehler hervorrufen. Bei weitem die Mehrzahl aller Personen schätzt viel zu hoch, wenn sie nach dem Durchmesser z.B. einer Münze gefragt werden, mit der wir bei ausgestrecktem Arm den Mond vor unseren Augen abdecken können. Die richtige Antwort überrascht jedermann: Die Münze dürfte nicht größer sein als der Querschnitt einer Zigarette.

Eine andere Augentäuschung besteht darin, daß wir gewöhnlich der Ansicht sind, der Mond sei in Horizontnähe viel größer, als wenn er hoch am Himmel stünde. Daran ist nichts Wahres, ja sogar das Gegenteil ist richtig, weil sich die beiden entsprechenden Entfernungen um einen Erdradius, d.h. um ein Sechzigstel der Mondentfernung, unterscheiden, um den wir im zweiten Falle dem Monde näher sind (Abb. 16). Dieses Paradoxon haben nicht wenige Gelehrte zu erklären versucht. Einige haben argumentiert, daß uns der Mond am Horizont größer erscheint, weil wir ihn dann zum Vergleiche mit großen irdischen Objekten sehen, was nicht mehr zutrifft, wenn der Mond hoch am Himmel steht. Das läßt sich aber sehr wohl bestreiten, denn der gleichen Täuschung unterliegt man, wenn der Mond über dem Meereshorizont steht, wo kein derartiger Vergleich durchgeführt werden kann. Andere Gelehrte haben die Hypothese befürwortet, daß uns ein Gegenstand größer erscheint, wenn wir ihn bequem vor uns sehen und nicht den Kopf mühsam nach hinten beugen müssen, um ihn zu betrachten. Indes hat keine der gegebenen Erklärungen bisher allgemeine Annahme zur Deutung dieser einzigartigen Sinnestäuschung gefunden. Diese beruht vielmehr auf einer besonderen Eigenart unseres Auges, derzufolge wir allen Gegenständen in geringer Höhe über dem Horizont einen zu großen Winkeldurchmesser beilegen. Noch bei 15° Höhe verschätzen wir uns um 100%.

Sobald die Entfernung des Mondes und auch seines scheinbaren Halbmessers bekannt waren, wurde auch sein wirklicher Durchmesser berechnet; er beträgt 3 476 km und ist deshalb nur das 0,272 fache von demjenigen der Erde. Vier Monddurchmesser nebeneinandergesetzt, würden somit etwas mehr ausmachen als der Erddurchmesser (Abb. 17).

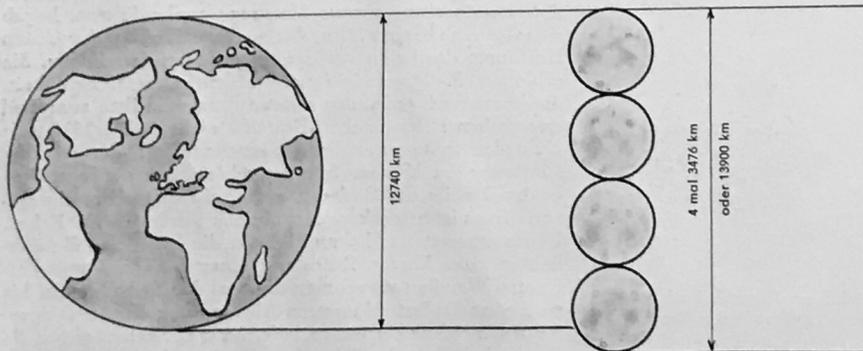


Abb. 17. - Vergleich von Erd- und Monddurchmesser

Rechts: Photo 11. - Vergleich von Erdoberfläche und Mondoberfläche. Die Oberfläche der Britischen Inseln und ein Teil der Mondoberfläche im NW der Mondscheibe.

(Photo Observatorien Mount Wilson und Palomar, 250 cm Spiegel.)



Die Oberfläche und die Masse

Die Oberfläche unseres Satelliten ist 13,46mal kleiner als die der Erde; die entsprechenden Werte sind 37 Millionen Quadratkilometer und 510 Millionen Quadratkilometer. Das Mondvolumen ist ziemlich genau fünfzigmal kleiner als das der Erde (Photo 11).

Die Masse des Mondes läßt sich mittels des fundamentalen Newtonschen Attraktionsgesetzes errechnen. Dieses erlaubt, die Bewegungen der umeinander kreisenden Himmelskörper zu bestimmen, sofern man nur deren Massen kennt, oder aber: bei Kenntnis der Bewegungen lassen sich auch die Massen errechnen. Man hat ermitteln können, bis zu welchem Ausmaße der Mond vermöge seiner Massewirkung die Erdbewegung stört, und aus den Abweichungen der gestörten Erde hat man gefunden, daß die Mondmasse nur $10/815$ der Erdmasse beträgt, d.i. 74 Milliarden mal Milliarden Tonnen (Abb. 18). Die mittlere Dichte des Mondes, die sich aus diesem Ergebnis errechnen läßt, ist 3,33, d.i. $6/10$ der unserer Erde. Die Schwere, die auf der Oberfläche unseres Satelliten herrscht, ist sechsmal kleiner als die am Erdäquator. Das hat zur Folge, daß eine Masse, für die eine Federwaage auf der Erde 1 kg anzeigt, auf dem Monde, mit derselben Waage gewogen, nur 166 g hat. Ein Astronaut wird sich auf dem Monde sechsmal so stark vorkommen wie auf der Erde, denn er könnte bei gleicher Anstrengung dort eine sechsmal so große Masse davontragen.

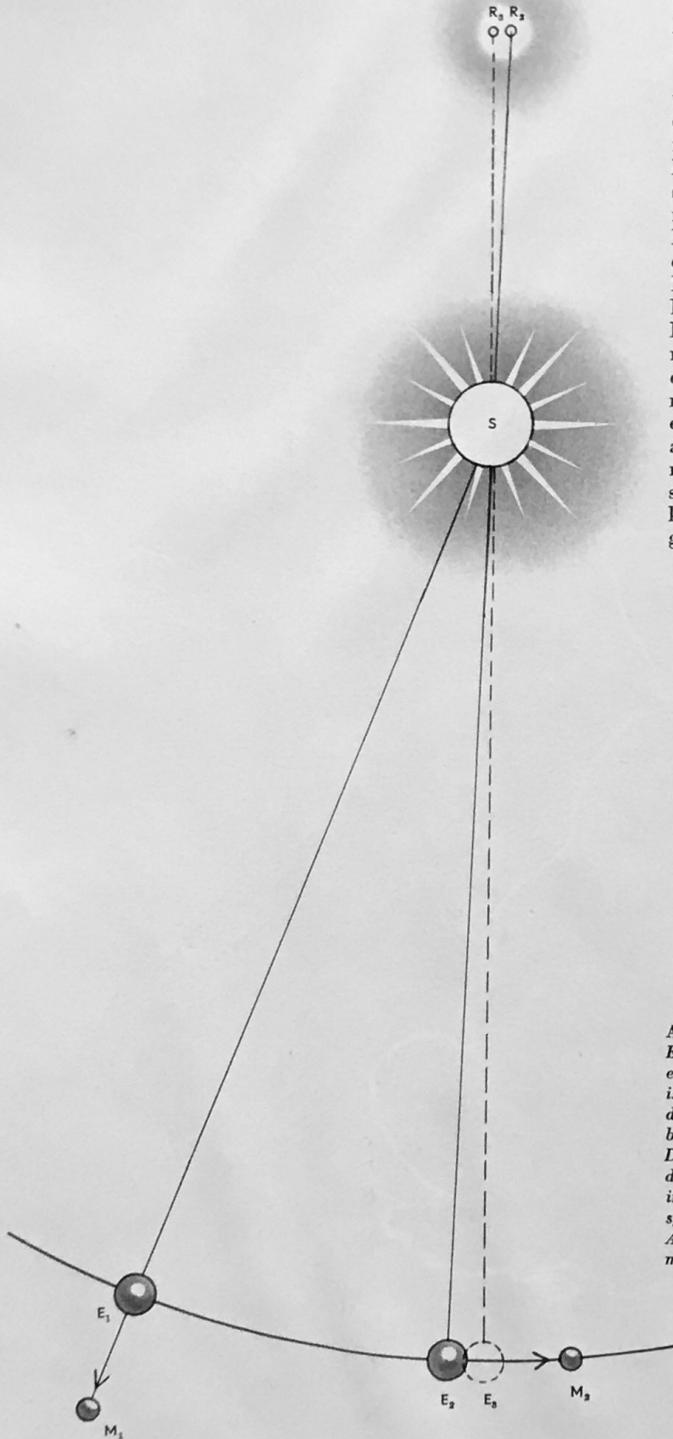


Abb. 18. - Bestimmung der Mondmasse. Befindet sich die Erde in E_1 und der Mond in Vollmondstellung in M_1 , so zieht er die Erde ein wenig aus seiner Bahn zu sich hin; diese leichte Abweichung ist schwer meßbar. Wenn die Erde 7 Tage später in E_2 wäre und der Mond im ersten Viertel in M_2 , so beschleunigte er die Bahnbewegung der Erde ein wenig, so daß sie tatsächlich E_3 erreicht. Dieses zusätzliche Bahnstück bewirkt eine scheinbare Verschiebung der Sonne am Himmel. Die Sonne wird in R_2 gesehen und nicht in R_3 . Der Winkel R_2SR_3 ist nur 6 Bogensekunden groß. Er entspricht dem Bogenstück E_2E_3 , d.i. $1/81$ der Entfernung Erde-Mond. Aus dieser Störung der Erdbewegung leitet man ab, daß die Mondmasse $1/81$ der Erdmasse ist.

V Die Drehung des Mondes um sich selbst

Der Umlauf und die gleichzeitige Umdrehung

Eine der besonders auffallenden Erscheinungen am Himmel wurde uns durch die Photographien von Lunik III wiederum offenbar gemacht : Wir haben niemals zuvor die Rückseite des Mondes gesehen, weil er uns immer dieselbe Seite zukehrt. Es mag in den Augen manchen Beobachters ein Manko für den Mond sein, daß er keine Rotation (Eigendrehung) zu zeigen scheint. Indes sehen wir beständig nur eine Seite von ihm, eben weil er sich um eine Drehachse dreht, und zwar in der gleichen Zeit, in der er die Erde umläuft. Ein Beispiel mag den Zusammenhang besser erklären. Wenn sich auf der Insel inmitten eines kleinen Weihers ein Beobachter aufhält, der ununterbrochen einen Schwan betrachtet, welcher im umgekehrten Sinne der Uhrzeigerbewegung um die Insel schwimmt, so sieht er den Schwan immer nur von links. Auf einem Photo könnte er vom Schwan keine andere Aufnahme machen als von derselben Seite ; nur der Hintergrund würde wechseln (Abb. 19). Was besagt dieses Beispiel ? Offensichtlich, daß sich der Schwan einmal um sich selbst dreht, wenn er einmal herumgeschwommen ist. Ein weiterer Beweis hierzu : Der Blick des Schwans streift im Laufe einer Tour rundum über alle Punkte des Horizontes.

Trotzdem erhebt sich ganz naturgemäß die Frage, warum die Zeiten einer Revolution und einer Rotation des Mondes genau miteinander übereinstimmen. Vor allem muß

man sich hierbei von der Annahme frei machen, als ob es sich nur um das gleichzeitige Eintreten zweier verschiedener Ereignisse handelte. Wäre dem jetzt und in der Vergangenheit des Mondes so gewesen, so hätte die geringste Störung - und deren gibt es nicht wenige im Weltraum - genügt, um diesen außerordentlichen Zufall zu korrigieren, und das Auseinanderfallen der beiden Bewegungen wäre in der Folge nur noch mehr betont worden. Es ist deshalb absolut gewiß, daß die Übereinstimmung der beiden Bewegungsperioden nur das Ergebnis einer gegenseitigen Unterjochung von Erde und Mond sein kann.

Die allgemein anerkannte Erklärung ist die : Ursprünglich war der Mond kein starrer, sondern ein zähflüssiger Körper, der sich ziemlich schnell um seine Achse drehte, so wie das alle Gestirne tun. Vermöge der Anziehung, die die Erde auf ihn ausübt, war er Gezeiten unterworfen, den gleichen, denen unsere Ozeane durch die Mondanziehung unterliegen. Weil aber unser Erdball eine 81,5mal größere Masse besitzt als der Mond, wurde dieser viel stärker beeinflusst, und der beständige Zwang formte schließlich den Mondball so um, daß er eine beiderseitige Aufwölbung bekam, die wie ein Bremsklotz wirkt. Die Rotation des Mondes wurde verlangsamt, so daß am Ende ihre Dauer mit der der Revolution übereinstimmte. Es entstand eine sogenannte gebundene Rotation.

Abb. 19. - Der Umlauf und die gleichzeitige Umdrehung. Befindet sich eine Kugel (links) auf einem Wagen, der einen Beobachter in O umkreist, so sieht dieser immer dieselben Kreissektoren (Nr. 9, 10, 11, 12, 1, 2, 3). Das kommt dadurch zustande, daß sich der Wagen im gleichen Maße um sich dreht, wie er sich auch um O dreht.

