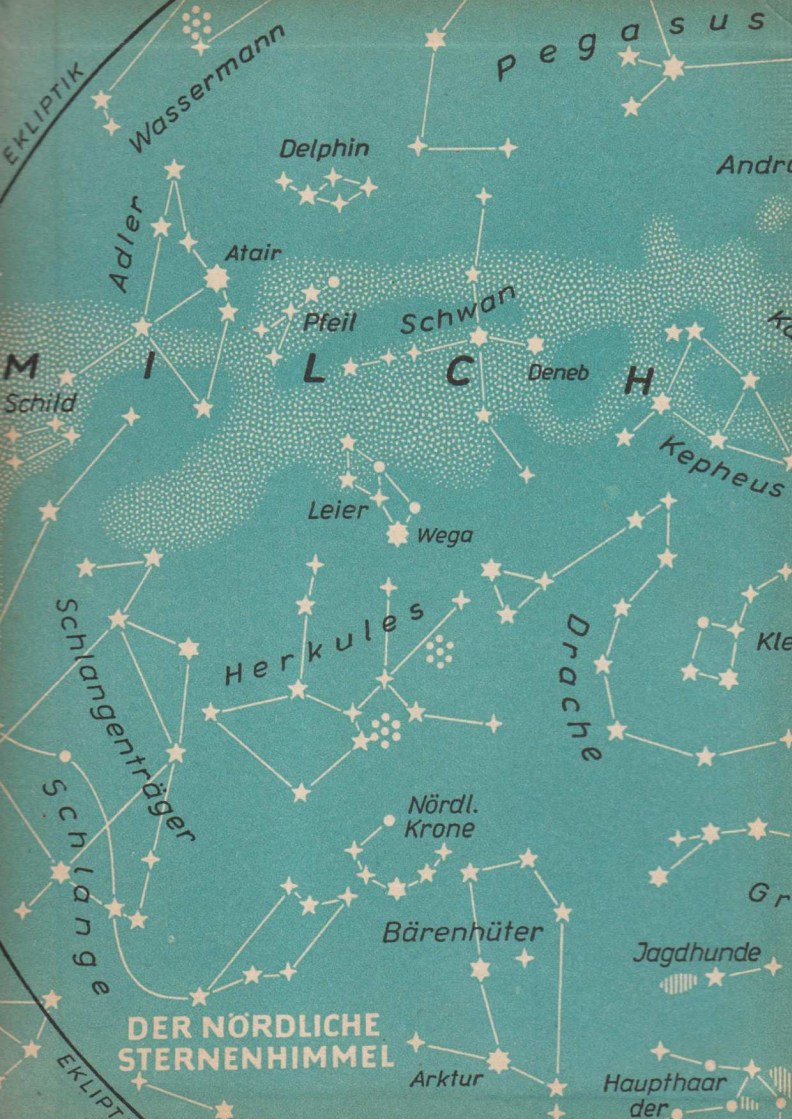
10

Astronomie


EKLIPTIK
Wassermann
Pegasus
Delphin
Andr
Adler
Atair
Pfeil
Schwan
M I L C H
Deneb
Schild
Kepheus
Leier
Wega
Schlangenträger
Herkules
Drache
Kle
Nördl. Krone
Schlange
Bärenhüter
Gr
Jagdhunde
DER NÖRDLICHE STERNENHIMMEL
Arktur
Haupthaar der
EKLIPT

Walfisch
Eridanus
Dreieck
Widder
EKLIPTIK
Plejaden
Stier
eda
Algol
Perseus
Aldebaran
opeia
T
R
A
S
S
E
Rigel
Kapella
Orion
Giraffe
rstern
nmels-
rdpol
Fuhrmann
Beteigeuze
r Bär
Kastor
Zwillinge
Einhorn
Pollux
Luchs
Kl. Hund
er Bär
Prokyon
Krebs
Löwe
EKLIPTIK
eserschlange
Stern 1. Größe
" 2. "
" 3. "
" 4. "
" 5. "
Sternhaufen

Astronomie

Ein Lehrbuch für die Oberschule · Klasse 10

VOLK UND WISSEN
VOLKSEIGENER VERLAG BERLIN
1964

Die Manuskripte wurden verfaßt von
Dr. Paul Ahnert (Kapitel 3)
Dr. Otto Günther (Kapitel 1, Kapitel 4)
Prof. Dr. Johannes Hoppe (Abschnitte 2.3 bis 2.7)
Prof. Dr. Hermann Lambrecht, Dr. Karl-Heinz Schmidt (Abschnitte 2.1 und 2.2, Abschnitt 5.2)
Dr. Karl-Heinz Schmidt (Abschnitt 5.1)

Redaktionelle Beabeitung: Oskar Mader

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Lehrbuch für die Oberschule bestätigt

Ausgabe 1964

Vorsätze: Max Kinzel
Typografische Gestaltung: Günter Runschke
ES 11 F · Bestell-Nr.: 08 10 04 - 1 · DM 2,10 · Lizenz Nr. 203 · 1000/64 (E)
Kartengenehmigung Nr. 634/64
Satz: Oswald Schmidt KG, Leipzig III/18/65
Druck: Philipp Reclam jun., Leipzig III/18/170

1. Orientierung am Sternhimmel 7

1.1. Die Himmelskugel - Koordinatensysteme 7

1.1.1. Sternbilder 7
1.1.2. Die Himmelskugel 10
1.1.3. Anleitung zum Gebrauch einer drehbaren Sternkarte 13
1.1.4. Das Horizontsystem 15
1.1.5. Das ruhende Äquatorsystem 16
1.1.6. Das rotierende Äquatorsystem 19
1.1.7. Zusammenfassung 21
1.1.8. Fragen und Aufgaben 21

1.2. Scheinbare und wahre Bewegungen im Sonnensystem 21

1.2.1. Die scheinbare tägliche Bewegung der Sonne 21
1.2.2. Der scheinbare jährliche Umlauf der Sonne 25
1.2.3. Die scheinbare Bewegung des Mondes 28
1.2.4. Die scheinbare Bewegung der Planeten 28
1.2.5. Die Bedeutung der Astronomie für die Praxis 29
1.2.6. Anleitung für die Himmelsbeobachtung 31
1.2.7. Zusammenfassung 32
1.2.8. Fragen und Aufgaben 32

2. Das Sonnensystem 33

2.1. Überblick über das Sonnensystem 33

2.1.1. Die Astronomische Einheit 33
2.1.2. Überblick über die Körper des Sonnensystems 34
2.1.3. Zusammenfassung 39
2.1.4. Fragen und Aufgaben 39

2.2. Die Sonne 39

2.2.1. Physische Beschaffenheit 39
2.2.2. Sonnenaktivität und Sonnenflecke 41
2.2.3. Die Strahlung der Sonne 42

2.2.4. Der Energiehaushalt der Sonne 44
2.2.5. Sonnenenergie in der Natur 45
2.2.6. Technische Anwendungen der Sonnenenergie 45
2.2.7. Zusammenfassung 45
2.2.8. Fragen und Aufgaben 46

2.3. Die Erde 46

2.3.1. Charakteristik des Planeten Erde 46
2.3.2. Die Erde im Sonnensystem 47
2.3.3. Die astronomische Bedeutung der im Internationalen Geophysikalischen Jahr begonnenen Beobachtungen und Messungen 48
2.3.4. Zusammenfassung 48
2.3.5. Fragen und Aufgaben 48

2.4. Der Erdmond 49

2.4.1. Der Mond als Himmelskörper 49
2.4.2. Rotation und Umlauf 49
2.4.3. Finsternisse 50
2.4.4. Physische Beschaffenheit der Mondoberfläche 51
2.4.5. Zusammenfassung 53
2.4.6. Fragen und Aufgaben 53

2.5. Die großen Planeten 54

2.5.1. Merkur und Venus 54
2.5.2. Mars 55
2.5.3. Jupiter und Saturn 57
2.5.4. Uranus, Neptun und Pluto 59
2.5.5. Zusammenfassung 60
2.5.6. Fragen und Aufgaben 60

2.6. Die Kleinkörper des Sonnensystems 60

2.6.1. Das System der Planetoiden 60
2.6.2. Kometen, Meteoriten und Meteore 61
2.6.3. Staub und Gas im interplanetaren Raum 63
2.6.4. Zusammenfassung 63
2.6.5. Fragen und Aufgaben 63

2.7. Künstliche Erdsatelliten und Raumsonden 64

2.7.1. Allgemeine Betrachtungen 64
2.7.2. Künstliche Erdsatelliten 65
2.7.3. Raumsonden 67
2.7.4. Die naturwissenschaftliche Bedeutung der astronautischen Experimente und Forschungen 68
2.7.5. Zusammenfassung 69
2.7.6. Fragen und Aufgaben 70

3. Aus der geschichtlichen Entwicklung der Auffassungen über das Sonnensystem 71

3.1. Die Anfänge der Astronomie 71
3.2. Die Astronomie im Altertum 72
3.3. Das heliozentrische Weltsystem 74
3.4. Die Erweiterung der astronomischen Kenntnisse bis zur heutigen Zeit 77
3.5. Fragen und Aufgaben 80

4. Das Milchstraßensystem und das Weltall 81

4.1. Sterne und interstellare Materie 81

4.1.1. Die scheinbare Helligkeit der Sterne 81
4.1.2. Parallaxe und Entfernung 83
4.1.3. Farbe, Spektrum und Spektralklasse der Sterne 84
4.1.4. Leuchtkraft und Spektrum 85
4.1.5. Doppel- und Mehrfachsterne 89
4.1.6. Veränderliche Sterne 90
4.1.7 Interstellare Materie 92
4.1.8. Zusammenfassung 93
4.1.9. Fragen und Aufgaben 93

4.2. Das Milchstraßensystem und andere Galaxien 94

4.2.1. Die Bewegung der Sterne 94
4.2.2. Offene Sternhaufen und Kugelsternhaufen 95
4.2.3. Das Milchstraßensystem 96
4.2.4. Andere Galaxien 97
4.2.5. Unendlichkeit des Universums in Raum und Zeit 97
4.2.6. Zusammenfassung 98
4.2.7. Fragen und Aufgaben 98

5. Vorstellungen über die Entwicklung im Weltall 99

5.1. Ursprung und Alter der Himmelskörper 99

5.1.1. Altersbestimmung im Universum 99
5.1.2. Entstehung und Entwicklung der Sterne 100
5.1.3. Kosmogonie des Sonnensystems 101
5.1.4. Zusammenfassung 102
5.1.5. Fragen und Aufgaben 102

5.2. Geschichtlicher Rückblick auf die kosmogonischen Theorien 103

Anhänge und Verzeichnisse 104

Quellennachweis der Bilder

Die Zeichnungen wurden nach Vorlagen der Autoren von Horst Deckardt angefertigt.

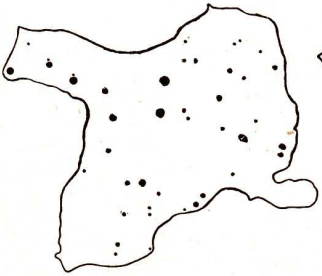
Sternwarte Babelsberg: 17/1 · Otto Günther, Potsdam: 29/2 · Harvard-Observatorium: XII/1 · Johannes Hoppe, Babelsberg: II; IV/2; V/3 · E. P. Hubble: XV/2 · Hermann Lambrecht, Jena: 43/1 · Lyot, Observatorium Pic du Midi: 42/1 · Oskar Mader, Berlin: 9/1 · Astr. Observatorium, Michigan: X/1 · Mt. Palomar Observatorium: XII/2; XVI/1 · Mt. Wilson Observatorium: XIV/2; XV/1 · Hans-Joachim Nitschmann, Bautzen: 31/1 · Astrophysikalisches Observatorium, Potsdam: VIII/1; IX · Ross-Calvert: XIII/1 · Zeitschrift Sky and Telescope: VIII/2; X/2 · TASS/Zentralbid: III; VI/3; VII; VIII/3 · Sternwarte Tautenburg: XI; XIV/1 · Archiv Volk und Wissen VEV: 44/1; 78/1; sämtliche Porträts · Diedrich Wattenberg, Berlin: 41/1; I; VI/1; VI/2 · VEB Carl Zeiss, Jena: 16/1; 17/2; 30/1

1. Orientierung am Sternhimmel

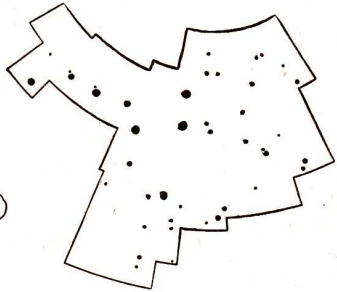
1.1. Die Himmelskugel – Koordinatensysteme

1.1.1. Sternbilder

Auf der Erde können wir uns nach dem Verlauf von Gebirgen, Flüssen usw. leicht orientieren und danach die Lage bestimmter Punkte beschreiben. Um auch ein Zurechtfinden am Sternhimmel zu ermöglichen, sind schon in sehr alten Zeiten einzelne Gruppen von Sternen zu *Sternbildern* zusammengefaßt worden. Die Abgrenzung dieser Sterngruppen und ihre bildhafte Deutung sind willkürlich. Ein großer Teil der jetzt international festgelegten Sternbilder ist von den Astronomen des griechischen



7/1 Das Sternbild des Großen Bären nach einer älteren Sternkarte

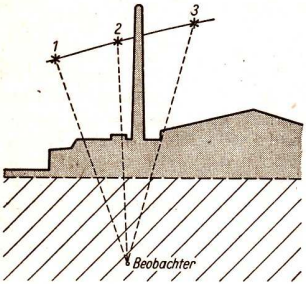


7/2 Das Sternbild des Großen Bären mit den neuen Grenzen

Altertums übernommen worden. Die Einteilung des Himmels in Sternbilder hat vor allem den Vorteil, daß sie eine kurze Angabe über den ungefähren Ort eines Objekts, z. B. eines neuentdeckten Kometen, ermöglicht. Die ganze Himmelskugel wird in 88 Sternbilder aufgeteilt (siehe Anhang, Tabelle 8). Auf alten Sternkarten waren die Grenzen der Sternbilder kompliziert und nicht ganz einheitlich (Bild 7/1).

Durch ein internationales Übereinkommen wurden vereinfachte Sternbildgrenzen genau festgelegt (Bild 7/2).
Schon im Altertum wußte man aus Beobachtungen, daß die meisten Sterne ihre Stellung in den Sternbildern beibehalten, aber wenige Sterne ähnlich wie die Sonne und der Mond die Sternbilder eines Streifens um den Himmel durchwandern. Die „feststehenden" Sterne werden *Fixsterne* genannt. Die „wandernden" Sterne sind als *Planeten* bekannt.
Die einzelnen Sterne erscheinen uns in sehr verschiedenen Helligkeiten.

Achten Sie bei Himmelsbeobachtungen besonders auf diese Helligkeitsunterschiede!



8/1 Die scheinbare Bewegung eines Sterns von *1* nach *3* ändert seine Stellung zu einer festen irdischen Marke (Schornstein)

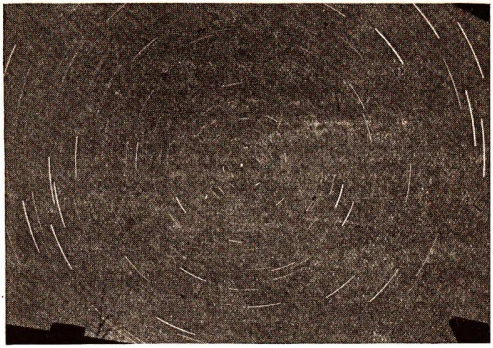
Wenn von Sternen 1. Größe, 2. Größe usw. gesprochen wird, soll damit ihre Helligkeit grob gekennzeichnet werden.

Für wenige helle Fixsterne sind noch besondere Namen im Gebrauch, die hauptsächlich von den Griechen und den Arabern übernommen worden sind, wie z. B. Sirius, Aldebaran usw. Viele hellere Sterne werden mit einem griechischen Buchstaben bezeichnet, dem der lateinische Name des Sternbilds beigefügt wird. So ist z. B. Sirius = α Canis Maioris = α im Großen Hund oder Deneb = α Cygni = α im Schwan.

Die *scheinbare tägliche Bewegung* der Sonne und des Mondes vom *Aufgang* im Ostteil des Horizonts über den höchsten Stand im Süden, der als *obere Kulmination* bezeichnet wird, zum *Untergang* im Westteil des Horizonts ist jedem bekannt. Die entsprechenden Bewegungen der Sterne lassen sich leicht feststellen, wenn ein Beobachter, ohne seinen Platz zu ändern, die scheinbare Bewegung von Sternen gegen eine feste irdische Marke (z.B. einen Schornstein oder eine Mauerkante; Bild 8/1) verfolgt.
Besonders eindrucksvoll sind die scheinbaren täglichen Bewegungen der Sterne zu verfolgen durch photographische Aufnahmen von Sternspuren (Bild 9/1).

Zeigen Sie, daß sich während der Aufnahme alle Sterne um den gleichen Winkel weiterbewegt haben!

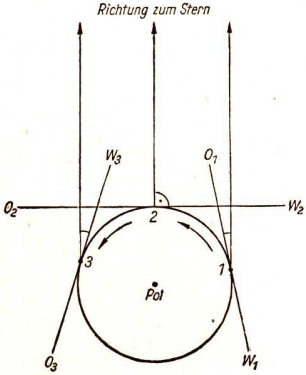
9/1 Sternspuren um den Himmelspol



Die täglichen Bewegungen werden als *scheinbare* Bewegungen bezeichnet, weil sie durch die Rotation der Erde um ihre Achse hervorgerufen werden. Der Beobachter wird bei dieser Rotation mitgeführt, während wir von den Sternen vorläufig annehmen wollen, daß sie unbewegt in äußerst großer Entfernung stehen (Bild 9/2). Die Rotation der Erde bemerken wir nicht unmittelbar. Es gibt aber *Beweise für die Erdrotation*, von denen hier zwei erwähnt werden sollen.

1. Ein frei schwingendes Pendel behält seine Schwingungsebene unverändert bei. Nach Bild 10/1 würde sich unter einem solchen Pendel, das über dem Pol angebracht wäre, im Verlauf von 24 Stunden die Erdoberfläche um volle 360° drehen, in einer Stunde also um 15°. Ein Beobachter, der die Erde als ruhend betrachtet, hat allerdings den Eindruck, daß die Schwingungsebene des Pendels sich dreht.

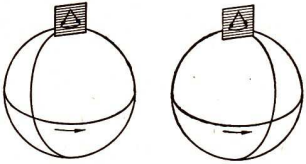
   Wird das Pendel an einem Ort mit geringerer geographischer Breite ($90° > \varphi > 0°$) angebracht, so erfolgt die scheinbare Drehung der Schwingungsebene des Pendels entsprechend langsamer.



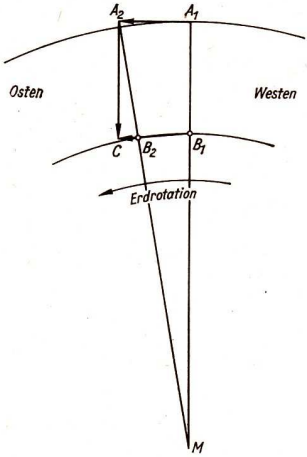
9/2 Durch die Erdrotation gelangt der Beobachter von *1* über *2* nach *3*. Ein Stern, der im Zeitpunkt *1* dicht über dem Osthorizont (O_1) zu sehen ist, erreicht zur Zeit *2* seine größte Höhe. Zur Zeit *3* steht er niedrig über dem Westhorizont (W_3)

Der erste, der mit einem Pendelversuch öffentlich einen eindrucksvollen Beweis für die Erdrotation erbrachte, war der französische Physiker FOUCAULT. Der Versuch wurde 1851 im Pantheon in Paris durchgeführt.

2. Ein Körper, der in einen senkrechten tiefen Schacht fällt, trifft nicht genau senkrecht unter dem Ausgangspunkt auf, sondern weicht etwas nach Osten ab. Diese Erscheinung ist so zu erklären: Der Schacht AB (Bild 10/2) bewegt sich mit der Erddrehung. Der Punkt A hat dabei eine größere Bahngeschwindigkeit als der Punkt B, weil er von der Rotationsachse, der Erdachse, weiter entfernt ist. Der Körper, der von A aus fällt, behält infolge der Trägheit die größere Bahngeschwindigkeit bei, überholt somit während des Fallens die Punkte auf der Verbindungsstrecke AB und trifft auf der Sohle des Schachtes in einem Punkt auf, der in der Bewegungsrichtung *vor* dem Punkt B liegt. Am Äquator ist die Ostabweichung am größten, an den Polen ist sie gleich Null.



10/1 Zum Nachweis der Erdrotation durch Pendelversuch



10/2 Zur Ostabweichung frei fallender Körper

Erklären Sie diesen Zusammenhang!

Bei stillstehender Erde wäre eine solche Erscheinung nicht zu beobachten.

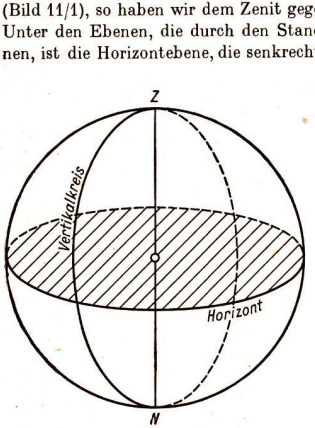
1.1.2. Die Himmelskugel

Der sichtbare Teil des Taghimmels wie auch des Nachthimmels erscheint uns nicht genau in der Form einer Halbkugel, sondern etwas abgeflacht. Auch haben wir den Eindruck, daß der scheinbare Durchmesser des Mondes oder der Sonne in der Nähe des Horizonts größer ist als bei höherem Stand. Genaue Winkelmessungen zeigen,

daß es sich nur um eine Täuschung handelt. Es ist deshalb zweckmäßig und auch berechtigt, wenn wir einfach von der *Himmelskugel* sprechen. Die Himmelskugel ist eine gedachte Kugelfläche, auf die sich die Gestirne vom Zentrum, dem Standpunkt des Beobachters, aus projizieren.

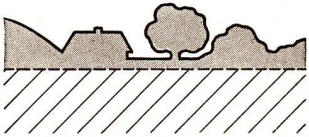
Für einen Beobachter ohne besondere Hilfsmittel ist eine Richtung vor anderen ausgezeichnet, nämlich die Richtung nach dem Punkt senkrecht über ihm. Dieser Punkt wird *Zenit* genannt. Ergänzen wir die sichtbare Halbkugel zur vollen Himmelskugel (Bild 11/1), so haben wir dem Zenit gegenüber den *Nadir*.

Unter den Ebenen, die durch den Standpunkt des Beobachters gelegt werden können, ist die Horizontebene, die senkrecht zur Richtung Zenit – Nadir liegt, als natürliche Grundebene gegeben. Diese Ebene schneidet die Himmelskugel in einem Großkreis, dem *mathematischen Horizont*. Seine Punkte haben vom Zenit und vom Nadir jeweils einen Winkelabstand von 90°.



11/1 Himmelskugel mit Zenit (*Z*), Nadir (*N*), Horizont und einem Vertikalkreis

Der natürliche Horizont, die Linie, auf der die Auf- und Untergänge der Sterne wirklich zu sehen sind, ist im allgemeinen durch die Erdkrümmung sowie die Umrisse von Bergen,



11/2 Natürlicher Horizont —— und mathematischer Horizont – – –

Gebäuden usw. merklich verschieden vom mathematischen Horizont (Bild 11/2). Wenn in der Astronomie das Wort Horizont ohne zusätzliche Bezeichnung gebraucht wird, ist der mathematische Horizont gemeint.

Kann der natürliche Horizont eines Beobachters auch unter dem mathematischen Horizont liegen?

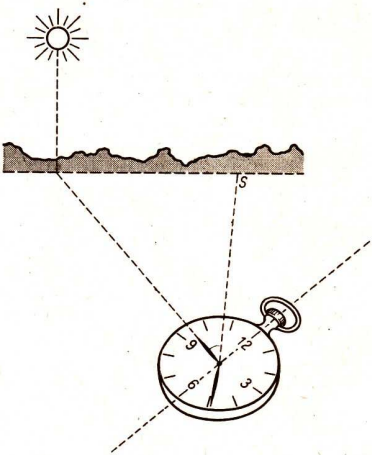
Alle Kreise, die den Zenit und den Nadir als Punkte enthalten, schneiden den Horizont senkrecht, sie werden *Vertikalkreise* genannt. Besonders wichtig ist der Vertikalkreis, der den Horizont in seinem Nordpunkt und in seinem Südpunkt schneidet. Er heißt *Meridian*.

Von den *Methoden zur Bestimmung der Nord-Süd-Richtung* sollen nur einige mit einfachen Hilfsmitteln ausführbare erwähnt werden.

1. Ein *Kompaß* zeigt die Nordrichtung ohne astronomische Beobachtung an. Die Mißweisung der Magnetnadel, d.h. der Winkel zwischen der geographischen Nord-

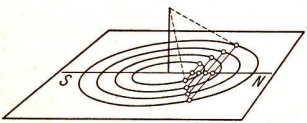
richtung und der Richtung der zum Magnetnordpol weisenden magnetischen Feldlinien, muß dabei aber beachtet werden.

2. Am Tage kann die ungefähre Südrichtung mit Hilfe einer *Taschenuhr* oder *Armbanduhr* bestimmt werden. Der Stundenzeiger ist auf die Sonne zu richten. Die Südrichtung ist dann gegeben durch die Winkelhalbierende zwischen der Richtung des Stundenzeigers und der Richtung vom Mittelpunkt zur Ziffer 12 (Bild 12/1). Im Winter genügt es, die Taschenuhr einfach waagerecht zu halten, im Sommer ist es notwendig, die Genauigkeit dadurch zu verbessern, daß die Uhr etwa der Neigung des Äquators entsprechend gehalten wird.



12/1 Bestimmung der Nord-Süd-Richtung mit Hilfe einer Taschenuhr

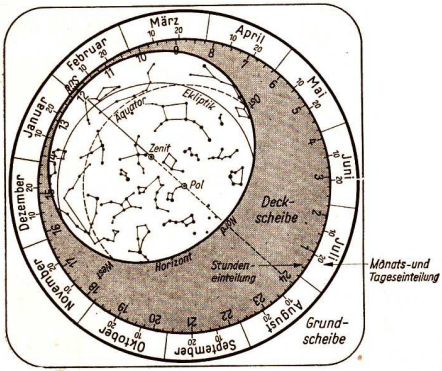
3. Größere Genauigkeit kann aus Beobachtungen des Schattens eines senkrecht angebrachten Stabes (eines *Gnomons*) erreicht werden. Auf einer waagerechten Ebene werden um den Fußpunkt des Stabes konzentrische Kreise gezeichnet. Auf diesen Kreisen werden am Vormittag und am Nachmittag *eines* Tages die Punkte markiert, die vom Schatten der Stabspitze getroffen werden (Bild 12/2). Zwischen den entsprechenden Punkten werden Sehnen gezeichnet und halbiert. Die Gerade durch die Halbierungspunkte und den Fußpunkt des Stabs gibt die Nord-Süd-Linie an.



12/2 Bestimmung der Nord-Süd-Richtung mit einem Gnomon

1.1.3. Anleitung zum Gebrauch einer drehbaren Sternkarte

Für ein erstes Aufsuchen von Sternen ist es vorteilhaft, wenn der Himmel durch Dämmerung oder Mondschein nicht ganz dunkel ist. Dann sind nur wenige helle Sterne zu sehen.
Das erste Zurechtfinden am Sternhimmel ist einfacher, wenn man schon weiß, welches Gebiet des Himmels zum Zeitpunkt der Beobachtung sichtbar ist. Das ist mit Hilfe einer drehbaren Sternkarte leicht möglich. Eine drehbare Sternkarte enthält die hellsten am betreffenden Beobachtungsort sichtbaren Fixsterne. Durch eine



13/1 Drehbare Sternkarte (Schülersternkarte des DZL)

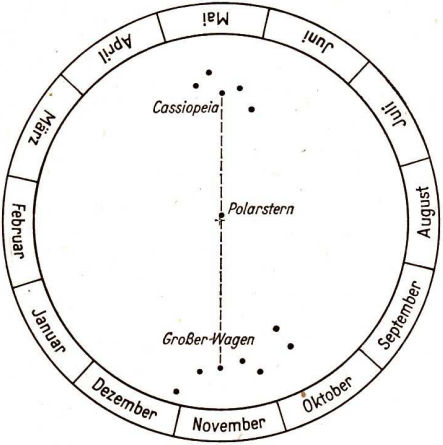
Maske werden auf der Karte die zu einem bestimmten Zeitpunkt sichtbaren Sterne freigegeben und die anderen, zu diesem Zeitpunkt unsichtbaren Sterne abgedeckt (Bild 13/1). Tag und Stunde der Beobachtung lassen sich nach einer Skala am Rande der Karte einstellen. Sterne verschiedener Helligkeit sind auf der Karte durch entsprechende Symbole gekennzeichnet.

Eine drehbare Sternkarte gilt streng nur für den Ort, für den sie berechnet ist. Man kann aber z. B. eine für Berlin konstruierte drehbare Sternkarte mit ausreichender Genauigkeit im ganzen Gebiet der DDR verwenden.

Wer Sterne durch Vergleich mit einer Sternkarte am Himmel aufsuchen will, muß die Sternkarte zuerst richtig orientieren, d.h. so halten, daß die Himmelsrichtung, in der die Sterne beobachtet werden sollen, auf der Karte „unten" ist, d.h. zum Beobachter weist.
Es empfiehlt sich, mit der Orientierung am Nordhimmel zu beginnen, weil dort die leicht erkennbaren Sternbilder des Großen Bären (bekannter Teil: Großer Wagen) und der Cassiopeia (Aussehen wie M oder W) während des ganzen Jahres zu sehen

sind (Zirkumpolarsternbilder; siehe Abschnitt 1.1.5.). Ihre Stellung am Himmel zu einer bestimmten Uhrzeit ändert sich im Laufe des Jahres (Bild 14/1).
Von einer bekannten Sterngruppe ausgehend können weitere Sterne leichter gefunden werden, wenn auf der Sternkarte und am Himmel eine Verbindung zwischen den bekannten und den zu suchenden Sternen durch einfache Linien (Gerade, gleichmäßig gekrümmte Linien, Dreiecke usw.) gedacht wird.

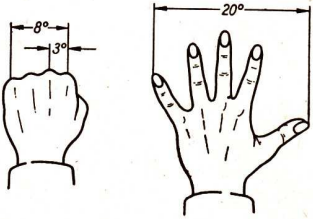
Wenden Sie diese Methode bei den Beobachtungen an!



14/1 Großer Wagen, Polarstern und Cassiopeia. Die Skizze zeigt die Stellung für etwa 21^h MEZ, wenn der Name des Monats, in dem beobachtet wird, am unteren Rand steht.

Irrtümer durch grob falsches Schätzen der Winkelabstände zwischen Sternen lassen sich vermeiden, wenn man sich einprägt, daß der scheinbare Durchmesser des Mondes rund $^1/_2{}^\circ$ beträgt und unter welchen Winkeln die Hand bei ausgestrecktem Arm erscheint. Die in Bild 14/2 eingetragenen Zahlenwerte gelten natürlich nicht genau für alle Beobachter.

Bestimmen Sie nach Bild 14/2 Ihre „persönlichen Werte" durch mehrmalige Messung und Mittlung!



14/2 Schätzung von Winkelabständen am Himmel mit Hilfe der Hand bei ausgestrecktem Arm

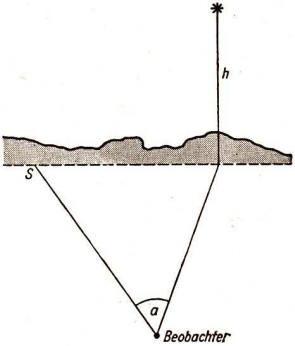
1.1.4. Das Horizontsystem

Der genaue Ort eines Sterns an der Himmelskugel kann durch die Angabe von zwei Winkelgrößen (Koordinaten) gekennzeichnet werden. In der Astronomie sind verschiedene Koordinatensysteme in Gebrauch. Sie werden nach der jeweils gewählten Grundebene bezeichnet. Im *Horizontsystem* ist die Horizontebene diese Grundebene. Als eine Koordinate wird die *Höhe h* über dem Horizont angegeben. Sie wird auf einem Vertikalkreis gemessen von 0° im mathematischen Horizont bis 90° im Zenit (bzw. −90° im Nadir).

In der Astronomie wird statt der Höhe h meist die *Zenitdistanz z* gebraucht. Es ist

$$z = 90° - h. \qquad (1)$$

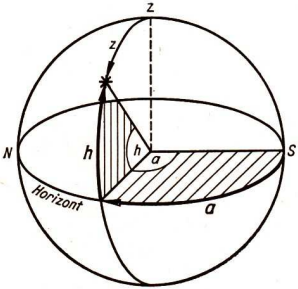
Als zweite Koordinate wird im Horizontsystem ein in der Horizontebene gemessener Winkel, das *Azimut a*, angegeben. Der Nullpunkt und der Richtungssinn der Azimutmessung sind durch Vereinbarung festgelegt. Wir zählen das Azimut a vom Südpunkt des Horizonts über Westen, Norden, Osten von 0° bis 360°[1].



15/1 Horizontsystem „von innen"

Bild 15/1 zeigt die Koordinaten Höhe und Azimut, wie sie einem Beobachter unmittelbar erscheinen. Häufig wird die Himmelskugel „von außen" gezeichnet. Bild 15/2 zeigt diese Darstellungsweise.

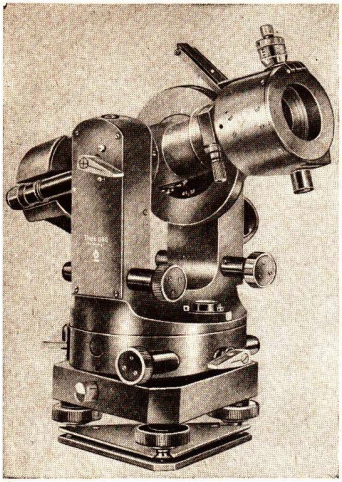
Beschreiben Sie, wie sich Höhe und Azimut der Sonne im Laufe eines Tages ändern!



Zur Messung der Koordinaten h (oder z) und a wird ein Meßinstrument mit einer vertikalen und einer horizontalen Drehachse gebraucht. Ein solches Meßinstrument ist der *Theodolit* (Bild 16/1). Er wird für Vermessungsarbeiten auf der Erde und für bestimmte astronomische Messungen verwendet.

[1] Im Satellitenbeobachtungsdienst und in der Geodäsie wird das Azimut vom Nordpunkt aus über Ost gezählt. Diese Zählweise findet auch in andere Wissenschaftsgebiete Eingang.

15/2 Horizontsystem „von außen"



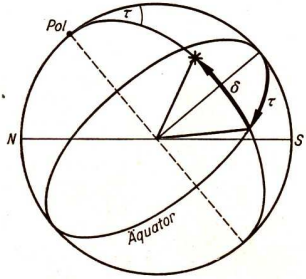
16/1 Theodolit

Unter Umständen wird nur eine der Koordinaten gebraucht. Zur Angabe des Aufgangspunkts oder des Untergangspunkts eines Sterns ist nur das Azimut nötig. Für den Durchgang durch den Meridian ist nur die Kenntnis der Höhe wichtig. Vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang beobachten wir infolge der Brechung und Streuung des Sonnenlichtes in der Atmosphäre die *Dämmerung*. Sie wird als „bürgerliche Dämmerung" bezeichnet, wenn die Tiefe der Sonne unter dem Horizont gleich 6° oder geringer ist ($0° > h_\odot \geqq -6°$). Die „astronomische Dämmerung" dauert wesentlich länger, nämlich bis zu einer Tiefe der Sonne unter dem Horizont von 18°. Erst bei diesem Stand der Sonne ist der Himmel so dunkel, daß in der Nähe des Zenits die schwächsten Sterne zu sehen sind.

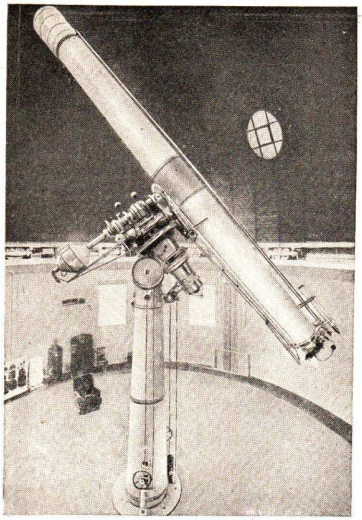
Das Horizontsystem findet bei einer Reihe wissenschaftlicher Arbeiten, wie z. B. in der Geophysik, der Geodäsie und bei der Bahnvermessung künstlicher Erdsatelliten, Anwendung. Es kann aber nicht als einziges astronomisches Koordinatensystem verwendet werden, denn es hat einen bedeutenden Nachteil: Beide Koordinaten ändern sich in Abhängigkeit von der Tageszeit. Für die Aufstellung eines Sternkatalogs z. B. muß nach Koordinaten gesucht werden, die frei von diesem Nachteil sind.

1.1.5. Das ruhende Äquatorsystem

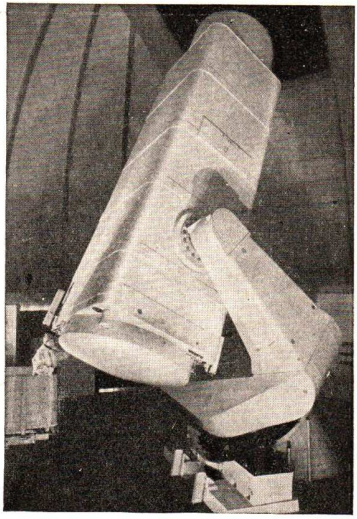
Da die scheinbaren täglichen Bewegungen der Sterne durch die Rotation der Erde hervorgerufen werden, ist es zweckmäßig, ein Koordinatensystem so zu wählen, daß die Richtung der Rotationsachse der Erde die gleiche Bedeutung bekommt wie die Richtung Zenit – Nadir im Horizontsystem. Die Hauptebene dieses Koordinatensystems ist die Äquatorebene, deshalb heißt es *Äquatorsystem*. Die Kreise durch den Pol, die den Äquator senkrecht schneiden, werden *Stundenkreise* genannt.



16/2 Ruhendes Äquatorsystem



17/1 Großer Refraktor der Sternwarte Potsdam-Babelsberg mit parallaktischer Montierung



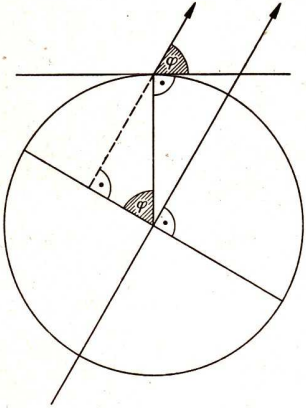
17/2 Spiegelteleskop des Karl-Schwarzschild-Observatoriums Tautenburg bei Jena mit parallaktischer Gabelmontierung. Der Spiegel hat einen Durchmesser von 2 m.

Als eine Koordinate wird der Abstand vom Äquator angegeben. Er wird auf einem Stundenkreis gemessen, und zwar von 0° im Äquator bis + 90° im Nordpol und − 90° im Südpol des Himmels. Diese Koordinate ist die *Deklination* δ (Bild 16/2). Sie verändert sich bei Fixsternen so langsam, daß sie für einige Jahre als konstant betrachtet werden kann, wenn keine hohe Genauigkeit gefordert wird.
Als zweite Koordinate wird der Winkel zwischen dem vom Pol aus südlichen Teil des Meridians und dem Stundenkreis durch den Stern gewählt. Dieser Winkel wird *Stundenwinkel* τ genannt. Er wird auf dem Äquator vom Meridian als Nullpunkt über Westen, Norden, Osten bis wieder nach Süden gemessen (Bild 16/2). Entsprechend der scheinbaren täglichen Bewegung wird der Stundenwinkel im allgemeinen in Zeitmaß angegeben. Beim Durchgang durch den Meridian in der oberen Kulmination hat ein Stern den Stundenwinkel $\tau = 0^h$, eine Stunde später ist $\tau = 1^h$ usw. Ein Stern mit $\tau = 22^h$ wird nach zwei Stunden die obere Kulmination erreichen.

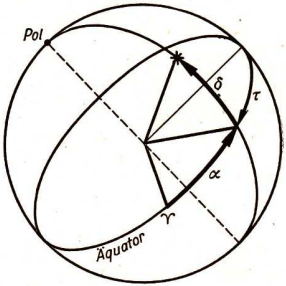
Das System mit den Koordinaten δ und τ wird als *ruhendes Äquatorsystem* bezeichnet, weil der für einen Beobachter ruhende Meridian den Ausgangspunkt der Stundenwinkelzählung bildet.

Vergleichen Sie die Koordinaten δ und τ mit den entsprechenden Koordinaten im Horizontsystem!

Die meisten Fernrohre in Sternwarten sind *parallaktisch* montiert. Sie können um eine Stundenachse bewegt werden, die parallel zur Erdachse gerichtet ist, und um eine Deklinationsachse, die auf der Stundenachse senkrecht steht (Bilder 17/1 und 17/2). Ein parallaktisch montiertes Fernrohr kann auf jeden Punkt des Himmels gerichtet werden. Dazu dienen Teilkreise (Kreise, die Teilstriche tragen), an denen direkt die Koordinaten δ und τ



18/1 Polhöhe und geographische Breite



18/2 Rotierendes Äquatorsystem

eingestellt werden können. Ein genau auf die Erdrotation abgestimmter Antrieb dreht das Fernrohr so um die Stundenachse, daß es der scheinbaren täglichen Bewegung der Sterne folgt.

Sterne in der Nähe des Himmelspols, die bei der scheinbaren täglichen Bewegung nie unter dem Horizont verschwinden, werden *Zirkumpolarsterne* genannt.
Bisher haben wir noch nicht festgestellt, welche Höhe der Himmelspol hat. Es gilt,

daß die *Polhöhe gleich der geographischen Breite* φ am jeweiligen Beobachtungsort ist (Bild 18/1; die Pfeile weisen in Richtung zum Himmelspol):

$$h_{\text{Pol}} = \varphi \tag{2}$$

Wie groß ist der Bereich der Zirkumpolarsterne a) am Pol, b) am Äquator?

Bei den Zirkumpolarsternen sind *beide* Durchgänge durch den Meridian beobachtbar. Bei diesen Durchgängen wird die größte und die kleinste Höhe erreicht. Wir unterscheiden diese Meridiandurchgänge deshalb als *obere* und *untere Kulmination.*

Die Sterne, die auf- und untergehen, die also unter dem Horizont durch ihre untere Kulmination gehen, werden *Zeitsterne* genannt, wenn sie von den Zirkumpolarsternen unterschieden werden sollen.

Das ruhende Äquatorsystem ist für die Koordinatenangabe in Sternkatalogen ungeeignet, weil der Stundenwinkel in Abhängigkeit von der Tageszeit veränderlich ist.

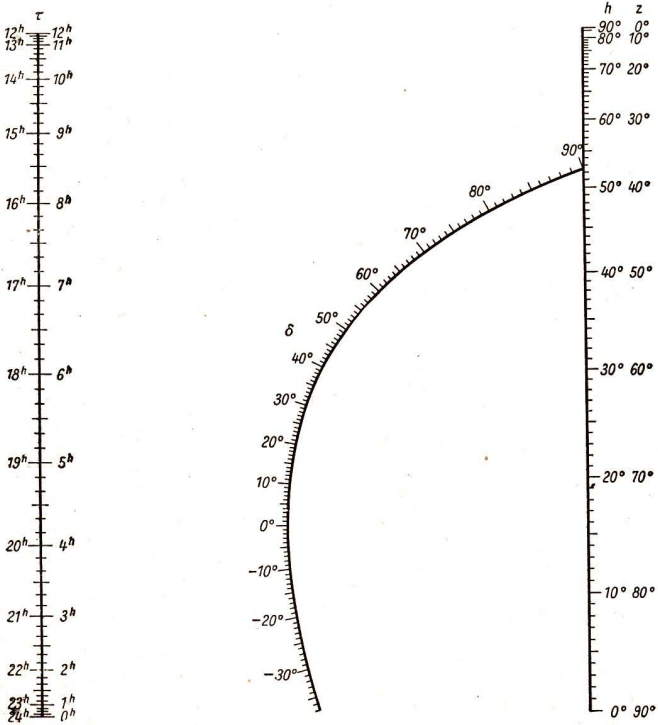
1.1.6. Das rotierende Äquatorsystem

Für die Zählung der geographischen Längen mußte ein Meridian durch internationale Vereinbarung als Nullmeridian angenommen werden. Es ist der Meridian, der durch die Mitte eines bestimmten Instruments der damaligen Sternwarte von Greenwich verläuft. Dieser Meridian nimmt natürlich an der Erdrotation teil.
Am Himmel läßt sich eine Koordinate definieren, die der geographischen Länge entspricht, wenn der Nullpunkt der Zählung an der scheinbaren täglichen Bewegung teilnimmt. Es war naheliegend, einen natürlich ausgezeichneten Nullpunkt zu wählen. So wurde der Stundenkreis durch den Punkt des Himmelsäquators genommen, in dem die Sonne zum Zeitpunkt der Frühlings-Tagundnachtgleiche steht. Dieser Punkt wird *Frühlingspunkt* genannt und mit dem Zeichen ♈ angegeben (Bild 18/2). Die der geographischen Länge entsprechende Koordinate wird *Rektaszension* α genannt. Sie wird auf dem Äquator vom Frühlingspunkt aus *entgegen* der scheinbaren täglichen Drehung in Zeitmaß gemessen.
Das Koordinatensystem mit Rektaszension α und Deklination δ wird das *rotierende Äquatorsystem* genannt. Es ist zur Angabe von Sternörtern in Sternkatalogen geeignet.
Für viele Aufgaben muß von den Koordinaten α und δ auf das Horizontsystem umgerechnet werden. Die Höhe h (oder die Zenitdistanz z) kann zu den Koordinaten δ und τ ohne Rechnung aus dem als Bild 20/1 gegebenen Nomogramm entnommen werden.
Das zugehörige Azimut läßt sich, wie hier ohne Beweis mitgeteilt wird, berechnen aus der Formel

$$\sin a = \frac{\cos\delta \sin\tau}{\cos h} \tag{3}$$

Sind die Koordinaten des rotierenden Äquatorsystems gegeben, so läßt sich aus der Rektaszension des Gestirns und dem Stundenwinkel des Frühlingspunktes der Stundenwinkel des Gestirns leicht errechnen.

Wenn eine grobe Angabe von Azimut und Höhe genügt, kann die drehbare Sternkarte für die Koordinatenumwandlung verwendet werden. Dazu muß sie auf die Zeit eingestellt werden, die für die Aufgabe benötigt wird. Die Sterne sind in der Sternkarte nach ihren Koordinaten α und δ eingetragen. Die Maske gibt die Lage des mathematischen Horizonts an.



20/1 Nomogramm zur Ermittlung der Höhe oder der Zenitdistanz

Die Höhe kann als Abstand vom Horizont zunächst in Zentimetern gemessen werden. Das Azimut muß entsprechend seiner Definition längs der Horizontlinie gemessen werden.

1.1.7. Zusammenfassung

Die Sternbilder sind wertvolle Hilfsmittel für die Orientierung am Sternhimmel und für überschlägige Angaben über den ungefähren Ort eines Objekts am Himmel. Für viele Zwecke, z. B. für das Zeichnen genauer Sternkarten, müssen die Sternörter durch Zahlenangaben genau erfaßt werden. Dazu braucht man die astronomischen Koordinatensysteme. Jedes Koordinatensystem hat spezielle Vorteile und Nachteile, deshalb ist die Verwendung mehrerer Systeme notwendig.
Im Horizontsystem ist die Horizontebene Grundebene. Die erste Koordinate in diesem System ist die Höhe h, sie wird auf dem Vertikalkreis des Gestirns vom Horizont aus ($h = 0°$) zum Zenit ($h = 90°$) bzw. zum Nadir ($h = -90°$) gemessen. Die zweite Koordinate ist das Azimut a, es wird als Winkel zwischen dem Meridian und dem Vertikalkreis des Gestirns von Süd ($a = 0°$) über West ($a = 90°$) gemessen (siehe aber Fußnote auf Seite 15).
Im ruhenden Äquatorsystem ist die Äquatorebene Grundebene. Die erste Koordinate in diesem System ist die Deklination δ, sie wird auf einem Stundenkreis vom Äquator aus ($\delta = 0°$) zum Himmelsnordpol ($\delta = 90°$) bzw. zum Himmelssüdpol ($\delta = -90°$) gemessen. Die zweite Koordinate ist der Stundenwinkel τ, er wird als Winkel zwischen dem Meridian und dem Stundenkreis des Gestirns von dessen oberer Kulmination ($\tau = 0^h$) aus im Sinne der scheinbaren täglichen Drehung der Himmelskugel gemessen.
Im rotierenden Äquatorsystem ist gleichfalls die Äquatorebene Grundebene. Die erste Koordinate in diesem System ist wie im ruhenden Äquatorsystem die Deklination δ. Die zweite Koordinate ist die Rektaszension α, sie wird als Winkel zwischen dem (scheinbar rotierenden) Stundenkreis des Frühlingspunktes ($\alpha = 0^h$) und dem Stundenkreis des Gestirns entgegen der scheinbaren täglichen Drehung der Himmelskugel gemessen.

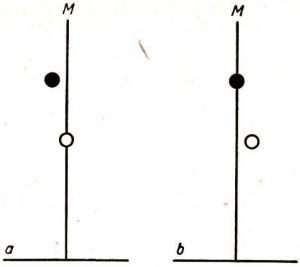
1.1.8. Fragen und Aufgaben

1. Weshalb enthalten Sternkarten, die für lange Zeit gültig sein sollen, nur Fixsterne und keine Planeten?
2. Geben Sie Vorteile und Nachteile der verschiedenen Koordinatensysteme an (Horizontsystem, ruhendes und rotierendes Äquatorsystem)!
3. Beschreiben Sie den Verlauf der scheinbaren täglichen Bewegungen der Sterne für einen Beobachter in niederer geographischer Breite und für einen Beobachter in hoher geographischer Breite!
4. Für welche Koordinaten ist der Nullpunkt der Zählung natürlich gegeben und für welche Koordinaten muß der Nullpunkt durch Vereinbarung festgelegt werden?

1.2. Scheinbare und wahre Bewegungen im Sonnensystem

1.2.1. Die scheinbare tägliche Bewegung der Sonne

Die scheinbare tägliche Bewegung der Sonne kann ohne Gefahr für das Auge durch Messung des Schattens eines senkrechten Stabes (Gnomon) beobachtet werden.

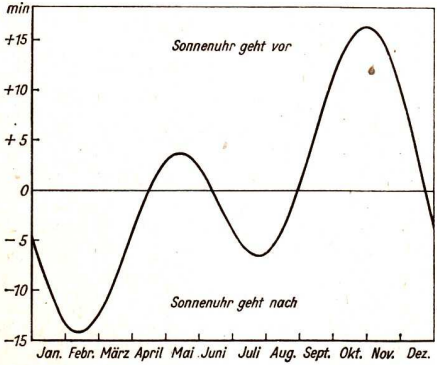


22/1 Wahrer und mittlerer Mittag; a) wahrer Mittag, b) mittlerer Mittag (Ende Oktober), *M* Meridian, ○ wahre Sonne, ● mittlere Sonne

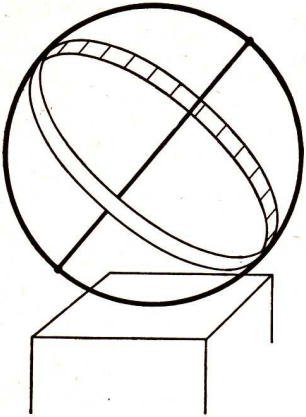
Schon in sehr alten Zeiten wurden die Änderungen der Länge und der Richtung des Schattens zur Zeitmessung verwendet. Heute brauchen wir in der Praxis viel genauere Zeitangaben, aber eine Tageseinteilung, die sich möglichst eng an die scheinbare tägliche Bewegung der Sonne anschließt, ist zweckmäßig geblieben.

Wir definieren die Sonnenzeit als den Stundenwinkel der Sonne plus 12 h. Diese 12 Stunden müssen wir addieren, weil der Tag nicht am Mittag beginnt, sondern zur Mitternacht. Das Zeitmaß ist somit eindeutig mit der scheinbaren täglichen Bewegung der Sonne verbunden. Wir nennen diese Zeit die *wahre Sonnenzeit.*

Die scheinbare Bewegung der Sonne hat Ungleichmäßigkeiten, deren Ursachen später erklärt werden. Damit ist die wahre Sonnenzeit ein ungleichmäßiges Zeitmaß. Um diesen Nachteil zu vermeiden und trotzdem die Zeitmessung möglichst eng an die scheinbare Bewegung der Sonne anzuschließen, nimmt man eine „*mittlere*" *Sonne* an, die mit gleichbleibender Geschwindigkeit im Äquator umlaufen soll, und zwar so, daß sie sich möglichst wenig von der wahren Sonne entfernt. Die *mittlere Sonnenzeit* ist nach der oben gegebenen Definition der Stundenwinkel der mittleren Sonne +12 h.



22/2 Jährlicher Verlauf der Zeitgleichung (schematisch)



23/1 Äquatorialsonnenuhr

Die Umrechnung von wahrer Sonnenzeit (w. Z.) auf mittlere Sonnenzeit (m. Z.) oder umgekehrt läßt sich sofort durchführen, wenn die sogenannte *Zeitgleichung* (Zgl.) bekannt ist: Zeitgleichung = wahre Zeit – mittlere Zeit.

$$\text{Zgl.} = \text{w. Z.} - \text{m. Z.} \qquad (4)$$

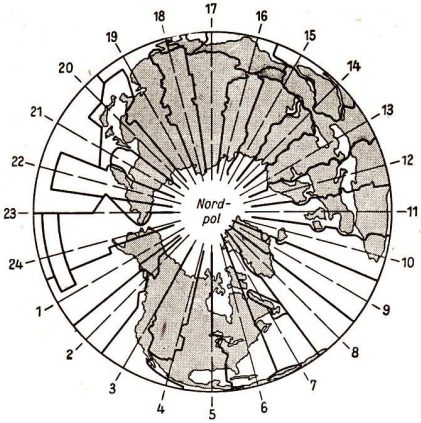
Je nach dem Vorzeichen der Zeitgleichung kann die wahre Sonne oder die mittlere Sonne zuerst durch den Meridian gehen (Bild 22/1).
Die Zeitgleichung ist in astronomischen Jahrbüchern für jeden Tag des Jahres angegeben; ihr jährlicher Verlauf ist in Bild 22/2 gezeigt.

Sonnenuhren zeigen die wahre Sonnenzeit an. Ihr Schattenstab ist parallel zur Erdachse orientiert. Das Zifferblatt der *Äquatorialsonnenuhr* (Bild 23/1) ist ein Kreisring um den Schattenstab als Mitte; die Stundenteilung ist gleichmäßig. Sonnenuhren, bei denen der Schatten auf ein Zifferblatt fällt, das nicht in der Äquatorebene liegt (z. B. auf einer Hauswand) haben eine ungleichmäßige Teilung.

Die Sonne geht nur an Orten, die auf dem gleichen Längenkreis liegen, gleichzeitig durch den Meridian. Allgemein erfolgt der Meridiandurchgang um so früher, je weiter ein Ort nach Osten liegt. Den 24 Stunden eines Tages entsprechen die 360° der Längenteilung.
Das gibt 1 Stunde Zeitdifferenz auf 15° Längenunterschied. Die Zeit, die direkt für einen Beobachtungsort gilt, nennen wir *Ortszeit.*
Verkehr und Nachrichtenwesen erfordern einheitliche Zeitangaben in einem größeren Gebiet. Deshalb hat man die Erde in Zeitzonen aufgeteilt, deren Zentralmeridiane je 15° Längenunterschied haben, so daß der Zeitunterschied von einer Zone zur nächsten gerade 1 Stunde beträgt. Für alle Orte in *einer* Zeitzone ist die Ortszeit des Zentralmeridians als *Zonenzeit* gültig. Unsere Zonenzeit ist die Mitteleuropäische Zeit (MEZ), der Zentralmeridian ist der Meridian mit einer östlichen Länge von 15°.

Wie liegt dieser Längenkreis zum Gebiet der DDR?

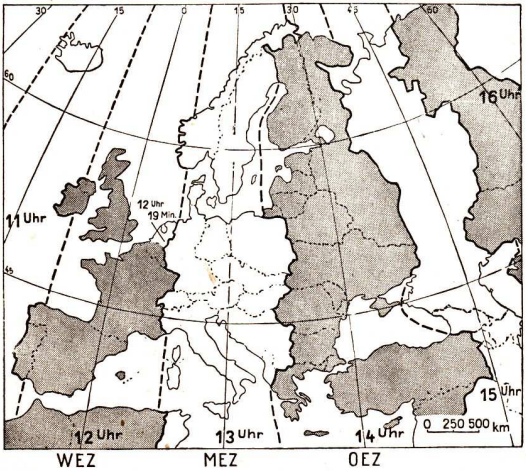
Länder mit großer Ausdehnung in Ost-West-Richtung wie z. B. die Sowjetunion haben mehrere Zeitzonen. Mit Rücksicht auf Ländergrenzen folgt die Begrenzung der Zeitzonen nicht streng den Längenkreisen (Bild 24/1).



Die Ortszeit für die Länge $\lambda = 0°$ (Greenwich), die gleichzeitig Westeuropäische Zeit (WEZ) ist, wird auch als *Weltzeit* (WZ) bezeichnet. Bei dem Entnehmen von Zahlenangaben aus astronomischen Jahrbüchern ist zu beachten, daß 0^h WZ = 1^h MEZ ist.
Wer täglich vom gleichen Standpunkt aus den Vorbeigang eines bestimmten Sterns an einer irdischen Marke beobachtet und dabei eine nach MEZ gehende Uhr abliest, bemerkt eine Verfrühung der Vorbeigänge um knapp 4 Minuten von einem Tag zum nächsten.

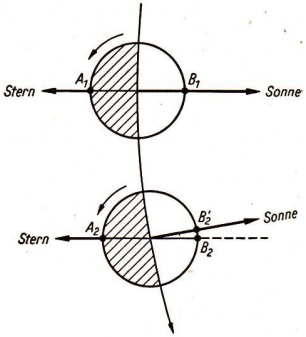
Prüfen Sie das durch Beobachtungen nach!

Ein *Sterntag* ist also rund 4 Minuten kürzer als ein *Sonnentag*. Dieser Unterschied ist anhand des Bildes 25/1 leicht zu erklären.



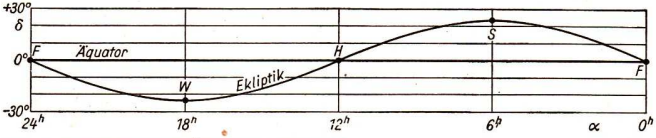
24/1 Zeitzonen.
a) (oben) Zeitzonen auf der Nordhalbkugel
b) (links) Zeitzonen in Europa, Asien und Afrika

25/1 Sterntag und Sonnentag.
Für einen Beobachter in A_2 steht nach einer vollen Umdrehung der Erde, nach einem Sterntag, wieder der gleiche Stern im Meridian wie in A_1. Die Erde hat sich während dieser Zeit aber auf ihrer Bahn um die Sonne weiterbewegt. Ein Beobachter, der in B_1 den Meridiandurchgang der Sonne festgestellt hatte, ist nach einem Sterntag in B_2. Dort sieht er die Sonne noch *vor* dem Meridian. Die Erde muß sich noch etwas weiterdrehen, ehe der Beobachter in B_2' den Meridiandurchgang der Sonne wahrnehmen kann.



1.2.2. Der scheinbare jährliche Umlauf der Sonne

Zur Zeit der Frühlings-Tagundnachtgleiche steht die Sonne im Äquator. Sie geht im Ostpunkt des Horizonts auf und im Westpunkt unter. Danach rücken die Auf- und Untergangspunkte nach Norden hin bis zur Sommersonnenwende. Die Deklination der Sonne beträgt zu dieser Zeit $\delta_\odot = 23{,}^\circ5$. Sie nimmt dann ab, bis zur Wintersonnenwende der südlichste Punkt der scheinbaren jährlichen Sonnenbahn mit der Deklination $\delta_\odot = -23{,}^\circ5$ erreicht wird. Die gleichzeitige Änderung der Rektaszension der Sonne während eines Jahres läßt sich dadurch feststellen, daß man beobachtet, welche Sterne um Mitternacht, also im Zeitpunkt der unteren Kulmination der Sonne, durch den Meridian gehen.

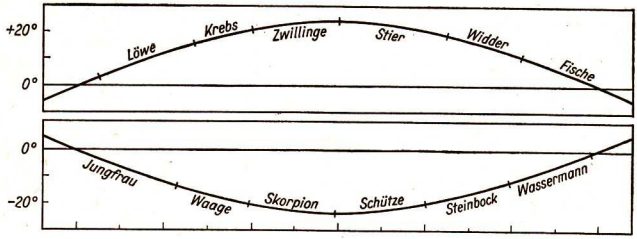


25/2 Beziehung zwischen Äquator und Ekliptik

Die scheinbare Jahresbahn der Sonne ist ein Kugelgroßkreis, die *Ekliptik*, ihre Neigung gegen den Äquator ($23{,}^\circ5$) heißt *Schiefe der Ekliptik* (Bild 25/2). Die Sternbilder längs der Ekliptik tragen zum großen Teil Tiernamen, deshalb bezeichnet man sie gemeinsam als *Tierkreis* (Bild 26/1).

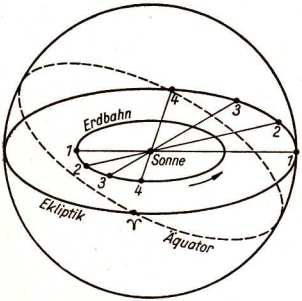
Suchen Sie auf der Sternkarte die Sternbilder des Tierkreises auf und prägen Sie sich ihre Reihenfolge ein! Achten Sie darauf, welche Tierkreisbilder nördlich und welche südlich vom Äquator stehen!

Der *Frühlingspunkt* ♈ ist der Schnittpunkt von Ekliptik und Äquator, in dem die Sonne zum Zeitpunkt der Frühlings-Tagundnachtgleiche steht.
Die *scheinbare* Jahresbahn der Sonne ist ein Abbild der *wahren* Bewegung der Erde um die Sonne (Bild 26/2). Der Kreis, in dem die Ebene der Erdbahn die Himmelskugel schneidet, ist die Ekliptik.

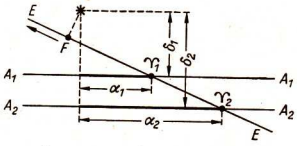


26/1 Der Tierkreis

Bei einem rotierenden Kreisel, auf den eine Kraft senkrecht zur Rotationsachse wirkt, z. B. durch einen Stoß, erfolgt ein – im Verhältnis zur Rotationsgeschwindigkeit langsamer – Umlauf der Rotationsachse auf einem Kegelmantel. Dieser Umlauf wird in der Physik als *Präzessionsbewegung* bezeichnet. Auch für die rotierende Erde gilt dieses physikalische Gesetz. Im Bild 26/3 ist ein kleines Stück der Ekliptik dargestellt; es wird von der Sonne in Richtung des Pfeils durchwandert. Während eines Jahres verschiebt sich die Rotationsachse der Erde infolge der Präzession, und dadurch verlagert sich der Äquator von A_1 nach A_2; der Frühlingspunkt legt dabei den Weg von ♈$_1$ nach ♈$_2$ zurück. Die jährliche Verschiebung des Frühlingspunktes infolge der Präzession beträgt etwa 50″.



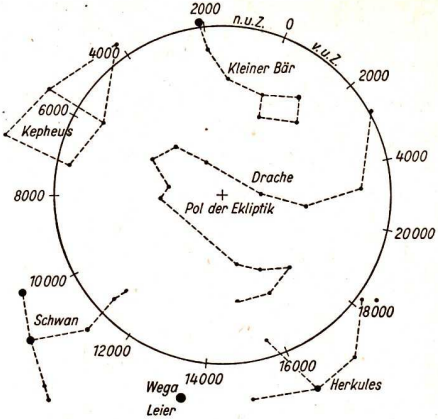
26/2 Erklärung der scheinbaren Bewegung der Sonne aus der Bewegung der Erde



26/3 Änderung der Koordinaten eines Sterns durch die Präzession
E Ekliptik, *A* Äquator

Die Verschiebung des Frühlingspunktes bewirkt eine langsame Änderung der Deklination und der Rektaszension der Sterne. Das muß bei Messungen größerer Genauigkeit stets berücksichtigt werden, zumal sich für längere Zeiten beträchtliche Veränderungen ergeben.

Bei der Erde wird die Präzession durch die Anziehung des Mondes und der Sonne auf den Äquatorwulst der Erde verursacht. Durch die Präzessionsbewegung der Erdachse beschreibt der Himmelspol eine Kreisbahn mit einem Radius von 23°,5 um den Pol der Ekliptik (Bild 27/1).



27/1 Bahn des Himmelspols um den Pol der Ekliptik infolge der Präzession

Ein Umlauf auf dieser Bahn dauert rund 26000 Jahre. Man nennt diese Periode ein *Platonisches Weltjahr*. Nur in kleineren Teilen dieser Periode liegt der Pol so nahe bei einem hellen Stern, daß dieser die Bezeichnung Polarstern verdient. In 12000 Jahren wird die Wega im Sternbild der Leier Polarstern sein.

Der Frühlingspunkt wandert während eines Platonischen Weltjahres einmal durch alle Sternbilder des Tierkreises. Nach einem halben Umlauf werden also viele Sternbilder, die für uns jetzt Wintersternbilder sind, am Sommerhimmel zu sehen sein.

Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch einen festen Punkt am Fixsternhimmel (z. B. Punkt F in Bild 26/3) wird *siderisches Jahr* genannt. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt vergeht ein *tropisches Jahr*. Infolge der Präzession ist das tropische Jahr um rund 20 Minuten kürzer als das siderische Jahr.

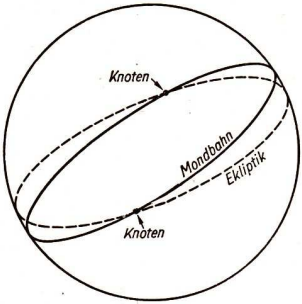
Die *Kalenderrechnung* muß sich möglichst eng an das tropische Jahr anschließen, damit der Ablauf der Jahreszeiten sich nicht im Kalender verschiebt. Die Länge des tropischen Jahres beträgt auf Sekunden abgerundet 365 d 5 h 48 min 46 s, also knapp $365\frac{1}{4}$ Tage. Der auftretende Tagesbruchteil erschwert die Kalenderrechnung. Im julianischen Kalender wurde das Jahr zu genau $365\frac{1}{4}$ Tagen angenommen. Jedes 4. Jahr war ein Schaltjahr zu 366 Tagen. Der dabei begangene Fehler summierte sich im Laufe der Zeit zu mehreren Tagen. Deshalb wurde bei der gregorianischen Kalenderreform im Jahre 1582 festgesetzt, daß volle Jahrhunderte nur dann Schaltjahre sein sollten, wenn die Jahreszahl durch 400 ohne Rest teilbar ist.

1.2.3. Die scheinbare Bewegung des Mondes

Die Mondbahn ist gegen die Ekliptik um etwa 5° geneigt. Das läßt sich leicht durch Eintragen der im Laufe eines Monats beobachteten Mondörter in eine Sternkarte zeigen. Die Schnittpunkte der Mondbahn mit der Ekliptik werden *Knoten* genannt (Bild 28/1).

Während eines Monats wird ein voller Umlauf zurückgelegt (Genaueres darüber enthält der Abschnitt 2.4.). Während eines Umlaufs ändert sich die Deklination des Mondes zwischen einem größten und einem kleinsten Wert; damit ändert sich auch seine Kulminationshöhe.

Wie ist die Deklinationsänderung des Mondes während seines monatlichen Umlaufs zu erklären? Welche kleinsten und welche größten Werte kann die Deklination annehmen?



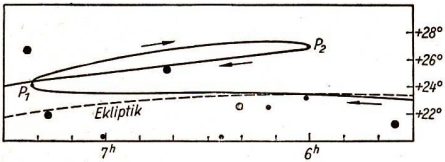
28/1 Scheinbare Mondbahn und Ekliptik

Die *Aufgangs-* und die *Untergangspunkte* verschieben sich bei Zunahme der Deklination nach Norden, bei Abnahme der Deklination nach Süden. Die *Aufgangs-* und die *Untergangszeiten* des Mondes verspäten sich *im Mittel* um rund 50 Minuten täglich.

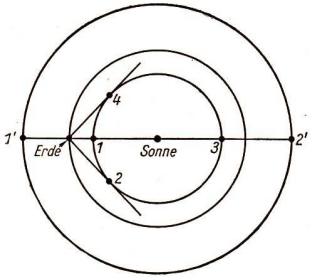
Begründen Sie die mittlere Dauer der täglichen Verspätungen!

1.2.4. Die scheinbare Bewegung der Planeten

Die Bahnen der meisten Planeten sind nur wenig gegen die Ekliptik geneigt. Wir beobachten deshalb die Planeten in den Sternbildern des Tierkreises. Bild 28/2 zeigt ein Stück einer Planetenbahn am Fixsternhimmel. Der Planet bewegt sich, wie der Pfeil angibt, anfangs *rechtläufig*. Dabei nimmt seine Rektaszension zu bis P_1. Dort kommt der Planet zum scheinbaren *Stillstand*. Er wird dann *rückläufig* bis zum zweiten scheinbaren Stillstand in P_2 und bewegt sich von da an wieder rechtläufig.



28/2 Scheinbare Bahn des Planeten Mars



29/1 Wichtigste Stellungen eines inneren und eines äußeren Planeten zur Sonne (Konstellationen)

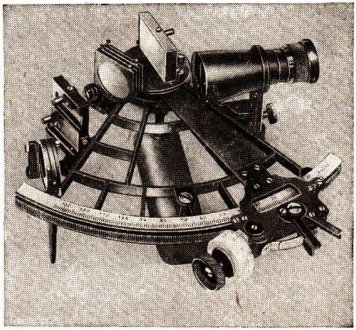
Die scheinbare Bewegung eines Planeten in bezug auf die Sonne ist für *innere* und *äußere* Planeten verschieden. Die inneren Planeten (Merkur und Venus) haben kleinere wahre Bahnen als die Erde; Planeten mit größeren Bahnen als die Erdbahn (Mars bis Pluto) werden äußere Planeten genannt.

In Bild 29/1 sind besondere Stellungen zweier Planeten in bezug auf die Sonne eingetragen. Ein innerer Planet kann in gleicher Richtung stehen wie die Sonne, wenn er sich zwischen Sonne und Erde oder auch jenseits der Sonne befindet. Wir unterscheiden diese beiden Stellungen als *untere* und *obere Konjunktion*. Er kann sich nur bis zu einem größten Winkelabstand, einer größten *Elongation*, von der Sonne entfernen. Für einen äußeren Planeten gibt es nur *eine* Konjunktion. Er kann aber auch der Sonne gegenüberstehen; diese Stellung wird *Opposition* genannt.

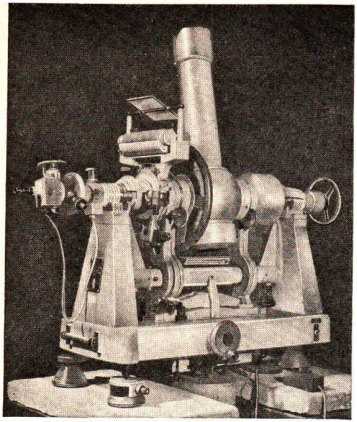
Überlegen Sie für die in Bild 29/1 angegebenen Stellungen, ob und wann (Abend, Mitternacht, Morgen) die Planeten sichtbar sind!

1.2.5. Die Bedeutung der Astronomie für die Praxis

Bei der Behandlung der Koordinatensysteme war gezeigt worden, daß die Stellung eines Sterns nach Höhe und Azimut von der Lage des Beobachtungsorts und von der Zeit abhängt. Dieser Zusammenhang läßt sich zur Bestimmung der geographischen Länge und Breite eines Ortes aus Sternbeobachtungen und zu astronomischen Zeitbestimmungen ausnutzen. Für eine Landesvermessung werden zwar Dreiecksketten auf der Erdoberfläche gemessen, aber für mindestens *einen* Ausgangspunkt müssen die geographischen Koordinaten durch astronomische Ortsbestimmungen ermittelt werden. Die astronomische Ortsbestimmung wird auch gebraucht in der Navigation, und zwar nicht nur für die Ozeanüberquerung durch Schiffe, sondern auch für Langstreckenflüge. Dazu sind Verfahren ausgearbeitet worden, bei denen



29/2 Spiegelsextant



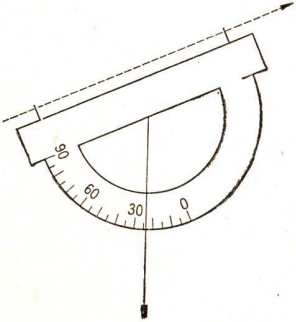
30/1 Passage-Instrument

die Ergebnisse rasch gefunden werden. Zu den Messungen dienen *Sextanten*, die so in der Hand gehalten werden, daß Schwankungen des Verkehrsmittels ausgeglichen werden (Bild 29/2).

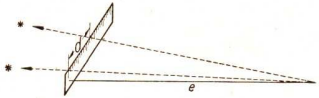
Für viele Teilgebiete der Astronomie, auch für Bereiche der Astrophysik, sind Ortsbestimmungen von höchster Genauigkeit (kleine Bruchteile von Bogensekunden) notwendig. Aus Veränderungen der gegenseitigen Abstände der Sterne an der Himmelskugel werden Schlüsse auf die Lage der Objekte und ihre Bewegungen im Weltall gezogen. Nicht weniger wichtig als die Ortsbestimmung ist die Feststellung der Zeit.

Die Zeitanlage des Rundfunks wird von Uhren gesteuert, deren Gang nach astronomischen Beobachtungen ständig kontrolliert wird. Bild 30/1 zeigt ein Instrument, das für die Beobachtung der genauen Zeit des Meridiandurchgangs von Sternen verwendet wird (*Passage-Instrument*).

Der Bau astronomischer Instrumente erfordert Höchstleistungen vor allem auf den Gebieten der Optik und der Feinmechanik. Die dabei gewonnenen Erfahrungen haben seit langem zur Entwicklung dieser Gebiete beigetragen. Die astronomischen Einrichtungen, die im VEB Carl Zeiss Jena gefertigt werden, haben durch ihre hohe Qualität Weltruf erlangt, sie werden in viele Länder exportiert.



30/2 Behelfsmäßiger Pendelquadrant

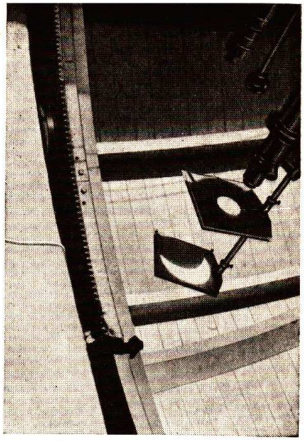


30/3 Lineal als Behelfsgerät für angenäherte Winkelmessungen.

Der zu messende Winkel α ergibt sich aus $\tan\alpha = \frac{d}{e}$, wobei d die Entfernung der beiden Visierpunkte auf dem Lineal und e die Entfernung des Lineals vom Auge des Messenden ist. Bei einer Entfernung $e = 57$ cm und kleinen Winkeln ist die Entfernung der beiden Visierpunkte d (in Zentimetern) zahlenmäßig etwa gleich dem Winkelabstand (in Graden).

1.2.6. Anleitung für die Himmelsbeobachtung

Schon Beobachtungen mit einfachsten Mitteln helfen zum Verständnis der Vorgänge am Sternhimmel. Für die Messung von Gestirnshöhen kann aus einem Winkelmesser sehr leicht ein *Pendelquadrant* hergestellt werden (Bild 30/2). Bei der Beobachtung hält ein Schüler das Gerät so, daß das zu beobachtende Gestirn genau in Richtung der Kante steht. Ein zweiter Schüler liest die Gradteilung bei dem Lotfaden ab und dazu die Uhrzeit. Zur behelfsmäßigen Messung von Winkelabständen kann das Visieren über die Teilung eines quer zur Blickrichtung gehaltenen Lineals benutzt werden (Bild 30/3).
Oft kann die Tatsache, daß der Mittelwert aus einer Reihe von Messungen im allgemeinen genauer als das Ergebnis einer Einzelmessung ist, zur Steigerung der Genauigkeit ausgenutzt werden.



31/1 Fernrohr mit Projektionsschirm für Sonnenbeobachtungen

Ein *Fernrohr* hat die Vorteile der Lichtstärke (Erkennen schwächerer Objekte) und der Vergrößerung (Trennung von Bildeinzelheiten). Schon mit kleinen Fernrohren sind viel mehr Sterne zu sehen als mit bloßem Auge. Für manche Schülerbeobachtungen ist ein Schulfernrohr erwünscht; ein kleineres Fernrohr, etwa ein Feldstecher, genügt aber auch.

Beobachtungsaufgaben

1. Aufsuchen von Sternbildern nach der Sternkarte.
2. Beobachtungen der scheinbaren täglichen Bewegung
   a) nach Bild 8/1,
   b) durch Aufnahmen wie Bild 9/1.
3. Bestimmung der Meridianrichtung
   a) am Tage nach Bild 12/1,
   b) am Abend mit Aufsuchen des Polarsterns.
4. Messung von Sternhöhen mit dem Pendelquadranten (Bild 30/2).
5. Messung von Winkelabständen nach Bild 30/3.
6. Eintragung der augenblicklichen Örter des Mondes und heller Planeten in eine Sternkarte.
7. Beobachtung und Zeichnung von Sonnenflecken nach der Projektionsmethode (Bild 31/1).
8. Beobachtung der Mondoberfläche mit einem Fernrohr.
9. Ordnen der helleren Sterne eines Sternbilds nach der Helligkeit (Schätzung der beobachteten Helligkeitsunterschiede).

10. Beobachtung von Doppelsternen mit einem Fernrohr.
11. Beobachtung eines Sternhaufens mit einem Fernrohr.
12. Eintragung des beobachteten Verlaufs der Milchstraße in eine Sternkarte.

1.2.7. Zusammenfassung

Die scheinbare tägliche Bewegung der Sonne ist die Grundlage der Tageseinteilung; durch sie ist die wahre Sonnenzeit definiert. Da die scheinbare tägliche Sonnenbewegung nicht gleichförmig abläuft, wird bei der Zeitmessung von einer angenommenen gleichförmig bewegten „mittleren" Sonne ausgegangen (mittlere Sonnenzeit). Die Differenz zwischen der wahren Sonnenzeit und der mittleren Sonnenzeit ist durch die Zeitgleichung gegeben.
Verkehr und Nachrichtenwesen erfordern einheitliche Zeitangaben in einem größeren Gebiet. Das hat zu einer Einteilung der Erde in Zeitzonen geführt; für jede Zone gilt als Zonenzeit die Ortszeit des Mittelmeridians. Die Ortszeit des Meridians von Greenwich ($\lambda = 0°$) wird auch Weltzeit (WZ) genannt.
Die scheinbare jährliche Bewegung der Sonne ist durch den wahren jährlichen Umlauf der Erde um die Sonne bedingt. Sie erfolgt längs der Ekliptik. Die Neigung der Ekliptik gegen den Äquator heißt Schiefe der Ekliptik, sie beträgt zur Zeit ungefähr 23,°5. Infolge der Präzessionsbewegung der Erdachse verlagern sich Äquator und Frühlingspunkt; die jährliche Verschiebung des Frühlingspunktes beträgt ungefähr 50″.
Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch einen festen Punkt der Ekliptik heißt siderisches Jahr, die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt tropisches Jahr. Das tropische Jahr ist die Grundlage der Kalenderrechnung, es beträgt, gerundet auf Sekunden, 365 d 5 h 48 min 46 s.

1.2.8. Fragen und Aufgaben

1. Weshalb ist die Sternzeit als Zeitmaß für das tägliche Leben ungeeignet, obwohl sie fast streng gleichförmig bleibt?
2. Welche astronomischen Beobachtungen werden bei Expeditionen in unerforschte Gebiete der Erde benötigt?
3. Bestimmen Sie die Differenz der Ortszeiten zwischen Berlin ($\lambda = 13° 22'$ ö. L.) und Moskau ($\lambda = 37° 46'$ ö. L.)!
4. Der Deutschlandsender gibt um 7^h MEZ das Zeitzeichen. Eine nach mittlerer Ortszeit gehende Uhr zeigt $6^h\ 52^{min}$ an. Bestimmen Sie die geographische Länge dieses Ortes!

2. Das Sonnensystem

2.1. Überblick über das Sonnensystem

2.1.1. Die Astronomische Einheit

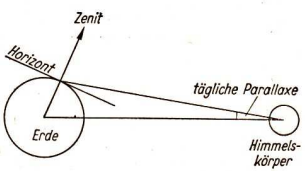
Die mittlere Entfernung der Erde von der Sonne, die gleich der großen Halbachse der Bahn unseres Planeten um die Sonne ist, wird *Astronomische Einheit* (AE) genannt. Sie beträgt nach den neuesten Messungen 149598000 km mit einem mittleren Fehler von 2000 km.
Die Bestimmung der Astronomischen Einheit läuft darauf hinaus, wenigstens *eine* Länge im Planetensystem möglichst genau zu ermitteln. Dies kann durch Anvisieren eines Himmelskörpers von zwei verschiedenen Standorten aus geschehen. Der Winkel, unter dem die Verbindungslinie der Beobachtungsorte, die Basis, vom betrachteten Himmelskörper aus erscheint, wird *Parallaxe* genannt, die bei einer festen Basis ein Maß für die Entfernung des Gestirns ist.

Nennen Sie ein Beispiel für die Entfernungsbestimmung mit Hilfe der Parallaxe aus der Geländevermessung!

Die *tägliche Parallaxe* eines Himmelskörpers im Sonnensystem ist, vom Gestirn aus gesehen, der Winkel zwischen Erdmittelpunkt und Beobachtungsort auf der Erdoberfläche (Bild 33/1).
Die tägliche Parallaxe erreicht ihren Maximalwert, die *Horizontalparallaxe*, wenn der Himmelskörper im Horizont steht. Sie ist durch

$$\sin \pi = \frac{R}{r} \qquad (5)$$

gegeben, wobei R den Erdradius, r die Entfernung des Himmelskörpers und π die Horizontalparallaxe bedeuten.
Die Horizontalparallaxe der Sonne, kurz *Sonnenparallaxe* genannt, ist der Winkel, unter dem aus der Entfernung der Sonne der Äquatorradius der Erde erscheint. Dem



33/1 Tägliche Parallaxe eines Himmelskörpers

oben angegebenen Wert der Astronomischen Einheit entspricht eine Sonnenparallaxe von 8,″7941.
Eine Bestimmung der Astronomischen Einheit durch *direkte* Messung der Sonnenparallaxe ist technisch nicht möglich. Dazu müßte von zwei weit auseinander liegenden Orten auf der Erdoberfläche ein bestimmter Punkt auf der Sonnenscheibe oder am Sonnenrand vermessen werden. Die Luftunruhe verhindert jedoch Messungen dieser Art mit hoher Genauigkeit. Daher müssen indirekte Methoden angewendet werden.

Sehr genaue Werte für die Astronomische Einheit wurden durch die Beobachtungen von Planetoiden (siehe Abschnitt 2.6.) gewonnen. Einige dieser Himmelskörper können der Erde sehr nahe kommen; da sie außerdem wegen ihrer Kleinheit meist punktförmig erscheinen, können sie sehr genau vermessen werden. Um die Entfernung eines Planetoiden von der Erde zu einem bestimmten Zeitpunkt zu ermitteln, photographiert man diesen Himmelskörper von zwei auf der Erde möglichst weit voneinander entfernten Orten. Der Planetoid wird sich relativ zu den umgebenden Fixsternen auf verschiedene Punkte der Himmelskugel projizieren. Aus dem Unterschied in den Koordinaten des Planetoiden auf beiden Aufnahmen und der Entfernung zwischen den Beobachtungsorten läßt sich seine Entfernung bestimmen. Aus dieser Entfernung kann, da die Umlaufszeiten der Erde und des beobachteten Planetoiden um die Sonne bekannt sind, mit Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes (siehe Seite 35) der Wert der Astronomischen Einheit errechnet werden.
In neuester Zeit wurde eine andere Methode zur Bestimmung der Einheitsentfernung angewendet, indem man ein Radarsignal in Richtung zum Planeten Venus schickte und die an seiner Oberfläche reflektierte Welle empfing. Da der Wert der Lichtgeschwindigkeit sehr genau bekannt ist, konnte aus der Zeitdifferenz zwischen Ausstrahlung und Empfang des Radarimpulses die Entfernung des Planeten Venus ermittelt werden. Diese Methode hat zu dem bisher genauesten Wert der Astronomischen Einheit geführt.
Durch die genaue Vermessung der Bahnen von künstlichen Planetoiden erhofft man, eine weitere Genauigkeitssteigerung beim Bestimmen der Astronomischen Einheit zu erreichen.

2.1.2. Überblick über die Körper des Sonnensystems

Das *Sonnensystem* wird von Himmelskörpern gebildet, die in ihrer Beschaffenheit verschiedenartig sind. Der weitaus größte und massereichste Körper, der Zentralkörper des Systems, ist die *Sonne*. Weitere Gruppen im System bilden die *Planeten*,

Tabelle 1: Körper des Sonnensystems

Gruppe	Zahl	Gesamtmasse (in Erdmassen)	Durchmesser (in km)
Sonne	1	332 000	1 392 000
Planeten	9	447,9	4 840 ··· 142 800
Monde	31	0,12	10 ··· 5000
Planetoiden	40 000 ··· 50 000	0,01 ··· 0,1	1 ··· 750
Kometen	10 Millionen	0,1	1 ··· 100 (Kern)
Interplanetare Materie	–	0,0000001?	–

ihre *Monde*, die *Planetoiden*, die *Kometen* und die *interplanetare Materie*, zu der die *Meteoriten* und die *Zodiakallichtmaterie* zählen.
Die Tabelle 1 enthält einige Angaben über die einzelnen Gruppen der natürlichen Körper des Sonnensystems.
Nach dem *Gravitationsgesetz* wirkt zwischen zwei Körpern mit den Massen $\mathfrak{M}_1$ und $\mathfrak{M}_2$, die in einer Entfernung r voneinander stehen, eine Kraft F, die durch

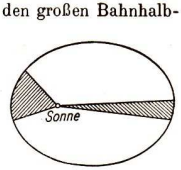
$$F = \frac{k\,\mathfrak{M}_1\,\mathfrak{M}_2}{r^2} \tag{6}$$

gegeben ist. Hierbei ist k die *Gravitationskonstante*, deren Wert $k = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{kg}^{-1}\ \mathrm{m}^3\,\mathrm{s}^{-2}$ beträgt. Wegen der großen Masse der Sonne sind die zwischen ihr und den anderen Körpern des Systems bestehenden Kräfte am größten, während die zwischen den einzelnen Körpern untereinander wirkenden Kräfte demgegenüber nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Eine Ausnahme davon bilden die Kräfte zwischen den Planeten und ihren Monden, da in diesen Systemen die Entfernungen klein sind gegenüber den Entfernungen Planet – Sonne.

Die durch die große Sonnenmasse bedingte Anziehungskraft hält das Planetensystem zusammen.
Im einzelnen gelten für die Körper, welche die Sonne umlaufen, die drei von Kepler entdeckten Gesetze der Planetenbewegung.
Das *1. Keplersche Gesetz* macht eine Aussage über die Bahnform: Die Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt sich der Sonnenmittelpunkt befindet.
Das *2. Keplersche Gesetz* kennzeichnet die Bahnbewegung: Der Leitstrahl Sonne–Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Bild 35/1).
Das *3. Keplersche Gesetz* nennt eine Beziehung zwischen den Umlaufszeiten und den mittleren Entfernungen der Planeten von der Sonne, die gleich den großen Bahnhalbachsen der Ellipsen sind: Die dritten Potenzen der großen Halbachsen a der Bahnen zweier Planeten verhalten sich zueinander wie die Quadrate ihrer Umlaufszeiten U,

$$a_1^3 : a_2^3 = U_1^2 : U_2^2 . \tag{7}$$



35/1 Zum zweiten Keplerschen Gesetz

Die Ellipsen, auf denen sich die Planeten nach dem 1. Keplerschen Gesetz bewegen, weichen in der Mehrzahl von Kreisen nicht stark ab. Das 2. Keplersche Gesetz besagt, daß sich ein Planet in Sonnennähe schneller bewegt als in Sonnenferne. Aus dem 3. Keplerschen Gesetz geht hervor, daß ein Umlauf eines Planeten um die Sonne um so länger dauert, je weiter der Planet im Mittel von der Sonne entfernt ist.
Kepler gewann seine Gesetze aus der Beobachtung, ohne das erst später von Newton gefundene Gravitationsgesetz zu kennen.

Die angegebene Formulierung der Keplerschen Gesetze ist nicht vollständig genau. In Wirklichkeit bewegt sich ein Planet nicht um den Sonnenmittelpunkt, sondern um den

gemeinsamen Schwerpunkt des Systems Sonne – Planet, der allerdings wegen der großen Masse der Sonne noch im Sonneninneren liegt.
Auch kann die Bahn eines Körpers, der unter den Einfluß der Sonnenanziehung gerät, außer einer Ellipse (oder einem Kreis) auch ein anderer Kegelschnitt sein, wobei jeweils ein Brennpunkt des Kegelschnitts mit dem Schwerpunkt des Systems Sonne – Körper zusammenfallen muß. Da aber Parabeln und Hyperbeln keine geschlossenen Kurven sind, gehören Körper, die auf solchen Bahnen an der Sonne vorbei laufen, nicht zum Sonnensystem.

Die Bahn eines Planeten und sein Ort auf ihr sind eindeutig durch verschiedene *Bahnelemente* bestimmt. Zwei Elemente machen Aussagen über die Größe und Form der Bahn. Es sind:

die *große Bahnhalbachse a*
und die *Bahnexzentrizität e.*

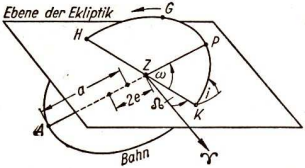
Die große Bahnhalbachse a, die kleine Bahnhalbachse b und die Exzentrizität e sind durch die Beziehung

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \tag{8}$$

miteinander verknüpft.
Der der Sonne nächste Punkt der Bahn heißt *Perihel*, der sonnenfernste Punkt *Aphel.*

Skizzieren Sie die Bahn eines Planeten und drücken Sie die Entfernung des Perihels und des Aphels von der Sonne durch die große Halbachse und die Exzentrizität der Bahn aus!

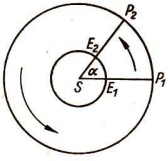
Drei weitere Bahnelemente kennzeichnen die Lage der Bahn im Raum. Die *Bahnneigung i* ist der Winkel, den die Bahnebene des Planeten mit einer Bezugsebene bildet, wobei als Bezugsebene die Bahnebene der Erde, die *Ebene der Ekliptik*, verwendet wird. Die Schnitt-



36/1 Bestimmungstücke einer Planetenbahn.
Z Zentrum (Sonne), G Gestirn (Planet), HK Knotenlinie, P Perihel, A Aphel, a große Halbachse, e lineare Exzentrizität, i Bahnneigung, ☊ Länge des aufsteigenden Knotens, ω Argument des Perihels

linie zwischen der Bahnebene des Planeten und der Ekliptik heißt *Knotenlinie.* Der Punkt auf der Knotenlinie, in dem der Planet von Süden nach Norden die Ekliptik überschreitet, wird *aufsteigender Knoten* genannt und mit ☊ bezeichnet. Entsprechend ist der absteigende Knoten ♈ der Bahnpunkt, in dem der Planet von Norden nach Süden über die Ekliptik wechselt.

Nach der Bahnneigung ist die *Länge des aufsteigenden Knotens*, die mit dem gleichen Symbol wie der aufsteigende Knoten selbst bezeichnet wird, das zweite Element für die Kennzeichnung der Lage der Bahn im Raum. Die Länge des aufsteigenden Knotens ist von der Sonne aus gesehen der Winkel zwischen dem Frühlingspunkt und dem aufsteigenden Knoten. Durch diese beiden Elemente, Bahnneigung und Länge des aufsteigenden Knotens, ist die Lage der Bahnebene bestimmt. Ein weiteres Bahnelement, das *Argument des Perihels* ω, macht eine Aussage über die Lage der Bahn innerhalb dieser Ebene. Dieses Element ist von der Sonne aus gesehen der Winkel zwischen aufsteigendem Knoten und Perihel. Eine Übersicht über die Bahnelemente gibt das Bild 36/1.



37/1 Zur Beziehung zwischen der siderischen und der synodischen Umlaufszeit eines Planeten.
SE_1P_1 ist eine Oppositionsstellung eines äußeren Planeten zur Sonne, SE_2P_2 die nächstfolgende. In der Zeit zwischen diesen Oppositionen hat P den Bogen P_1P_2, E aber einen vollen Umlauf und den Bogen E_1E_2 zurückgelegt. Wird der zu den Bogen P_1P_2 und E_1E_2 gehörende Zentriwinkel mit α bezeichnet, so gilt, wenn U die siderische Umlaufszeit des Planeten, S dessen synodische Umlaufszeit und I die Umlaufszeit der Erde ist, für den Planeten $\alpha : 360° = S : U$, für die Erde $(360° + \alpha) : 360° = S : I$. Daraus läßt sich die im Text angegebene Gleichung (10) gewinnen. Für einen inneren Planeten – Gleichung (9) – müssen E und P die Plätze vertauschen.

Die Tabelle 5 im Anhang enthält für die neun großen Planeten einige Bahnelemente sowie die *siderischen* und die *synodischen Umlaufszeiten*. Die siderischen Umlaufszeiten stehen nach dem 3. Keplerschen Gesetz in Beziehung zu den großen Bahnhalbachsen.
Die *siderische Umlaufszeit U* ist die Zeitspanne, nach der ein Planet von der *Sonne* aus gesehen wieder die gleiche Stellung unter den Fixsternen einnimmt.
Nach der *synodischen Umlaufszeit S* erreicht er dagegen von der *Erde* aus gesehen wieder die gleiche Stellung relativ zur Sonne.

Zwischen der siderischen Umlaufszeit U eines Planeten und seiner synodischen Umlaufszeit S gilt die Gleichung

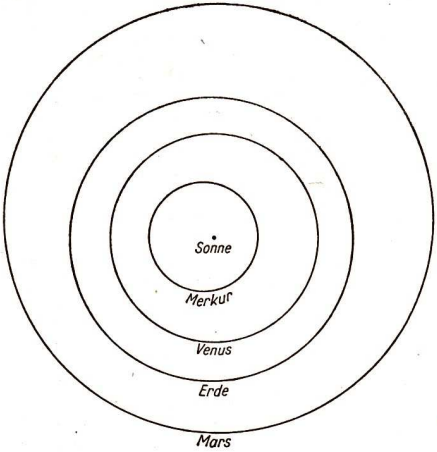
$$S = \frac{I\,U}{I - U} \tag{9}$$

für die Planeten innerhalb der Erdbahn und

$$S = \frac{U\,I}{U - I} \tag{10}$$

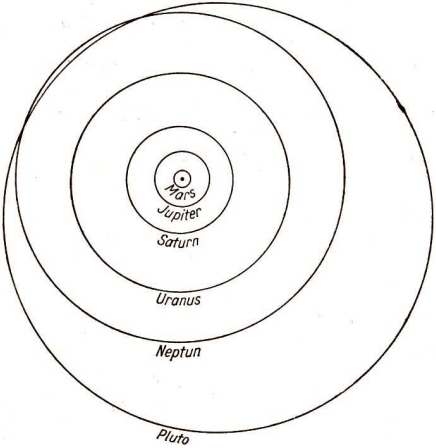
für die Planeten außerhalb der Erdbahn. In diesen Gleichungen ist I die (siderische) Umlaufszeit der Erde um die Sonne (Bild 37/1).

Bei den großen Halbachsen der Planetenbahnen ist eine Gesetzmäßigkeit angedeutet, die im Jahre 1766 von Titius gefunden und später von Bode bekannt gemacht



38/1 Bahnen der sonnennahen Planeten (Merkur bis Mars)

38/2 Bahnen der sonnenfernen Planeten (Mars bis Pluto)



wurde. Danach lassen sich die mittleren Entfernungen der Planeten von der Sonne (in AE) angenähert durch die Formel

$$a = 0{,}4 + 0{,}3 \cdot 2^n \qquad (11)$$

darstellen (Tabelle 2).

Die Übereinstimmung ist bis zum Planeten Uranus gut. Die Lücke zwischen der Mars- und der Jupiterbahn wird durch die Planetoiden ausgefüllt.

Der Tabelle 5 im Anhang ist zu entnehmen, daß die Bahnexzentrizitäten der Planeten kleine Werte haben, sieht man von Merkur und Pluto ab (siehe auch Bild 38/1 und 38/2). Ebenso sind die Neigungen der Planetenbahnen gegen die Ekliptik klein, wobei wiederum Merkur und Pluto die größten Abweichungen zeigen.

Die Bahnen der Planetoiden und Kometen weisen dagegen zum Teil große Bahnneigungen auf. Ferner sind ihre Bahnen in den seltensten Fällen kreisähnlich. Die mittlere Bahnexzentrizität bei den Planetoiden beträgt 0,15, die größte bei einem Planetoiden beobachtete Exzentrizität 0,83 (Ikarus).

Die Kometenbahnen sind im Durchschnitt noch langgestreckter als die Bahnen der Planetoiden. Bei vielen Kometen liegt die Bahnexzentrizität nur wenig unter 1. Daher haben die Kometen häufig sehr

Tabelle 2: Titius-Bode-Reihe

Planet	n	a (beobachtet)	a (berechnet)	Planet	n	a (beobachtet)	a (berechnet)
Merkur	$-\infty$	0,39	0,4	Jupiter	4	5,20	5,2
Venus	0	0,72	0,7	Saturn	5	9,55	10,0
Erde	1	1,00	1,0	Uranus	6	19,20	19,6
Mars	2	1,52	1,6	Neptun	7	30,09	38,8
Planetoiden	3	2,9	2,8	Pluto	8	39,5	77,2

große Umlaufszeiten und erreichen in der Sonnenferne zum Teil sehr große Entfernungen von der Sonne.
Die Ausdehnung unseres Sonnensystems ist durch die langperiodischen Kometen bestimmt. Man kann seinen Durchmesser zu etwa 80000 AE annehmen.

2.1.3. Zusammenfassung

Das Sonnensystem wird von Körpern verschiedenartiger Beschaffenheit gebildet. Der größte und massereichste Körper ist die Sonne; weitere natürliche Objektgruppen sind die Planeten, ihre Monde, die Planetoiden, die Kometen und die interplanetare Materie.
Das Sonnensystem wird durch Gravitationskräfte zusammengehalten; seine Körper bewegen sich unter ihrem Einfluß gesetzmäßig. Für die Bewegung der Planeten gelten (in erster Näherung) die drei Keplerschen Gesetze.

2.1.4. Fragen und Aufgaben

1. Warum ist die *direkte* Bestimmung der Sonnenparallaxe den meisten anderen Methoden in der Genauigkeit unterlegen?
2. Weisen Sie nach, daß sich die Planeten im Perihel schneller bewegen als im Aphel!
3. Wie können mit Hilfe der Keplerschen Gesetze aus den siderischen Umlaufszeiten die mittleren Entfernungen der Planeten von der Sonne berechnet werden?
4. Berechnen Sie für die Planeten Venus und Jupiter aus den siderischen Umlaufszeiten die synodischen Umlaufszeiten, und überprüfen Sie die erhaltenen Werte durch Nachschlagen in einer Tabelle!

2.2. Die Sonne

2.2.1. Physische Beschaffenheit

Die Sonne, der Zentralkörper des Sonnensystems, ist eine selbstleuchtende Gaskugel, die uns als helle, scharf begrenzte Scheibe erscheint (siehe Bildbeilage, Tafel I).
Der scheinbare Durchmesser der Sonne schwankt wegen der elliptischen Erdbahn zwischen 32′36″ und 31′31″. Aus der Entfernung der Erde von der Sonne und deren

scheinbarem Durchmesser ergibt sich der lineare Sonnendurchmesser zu $1{,}392 \cdot 10^6$ km. Dieser Wert entspricht etwa dem 109fachen des mittleren Erddurchmessers.
Die Masse der Sonne beträgt $1{,}985 \cdot 10^{30}$ kg, das sind etwa 332000 Erdmassen. Aus dem linearen Durchmesser und der Masse folgt die mittlere Dichte der Sonne zu $1{,}41\ g \cdot cm^{-3}$, sie ist also nur wenig größer als die Dichte des Wassers.
Die Sonne führt eine Rotation aus. Die senkrecht auf der Rotationsachse stehende Äquatorebene der Sonne ist gegen die Erdbahnebene um 7°15′ geneigt. Die Sonne rotiert nicht wie ein starrer Körper, vielmehr nimmt die Rotationsdauer vom Äquator nach den beiden Polen hin stetig zu. Am Äquator beträgt die siderische, d.h. auf den Fixsternhimmel bezogene Rotationsdauer 25,03 Tage, in einem Winkelabstand von 16° vom Äquator aber bereits 25,38 Tage[2].

Außerdem ist die Winkelgeschwindigkeit in tieferen Sonnenschichten geringer als in höheren, weshalb man unterschiedliche Rotationsperioden erhält, wenn man verschieden tief liegende „Marken" zu ihrer Bestimmung benutzt.

Über das Innere der Sonne kann man nur aus theoretischen Erwägungen heraus einige Aussagen machen. Im Zentrum herrschen Temperaturen von etwa 15 Millionen Grad, die nach außen hin abnehmen. Die äußeren Schichten der Sonne, die sogenannte Sonnenatmosphäre, sind direkt beobachtbar, da von dort das Licht unmittelbar in den Weltraum abgestrahlt wird. Die unterste Schicht der Sonnenatmosphäre stellt die *Photosphäre* dar. Aus ihr stammt der überwiegende Anteil der beobachteten Strahlung. Die Photosphäre ist nur 400 bis 500 km dick. Sie weist eine körnige Struktur auf, die sogenannte *Granulation*. Die kleinen hellen Gebiete, die Granulen, haben scheinbare Durchmesser von 1″ bis 2″.

Berechnen Sie die wahren, linearen Durchmesser dieser Gebiete!

Die Temperatur nimmt in der Photosphäre von innen nach außen von 7000 auf 4000 °K ab.

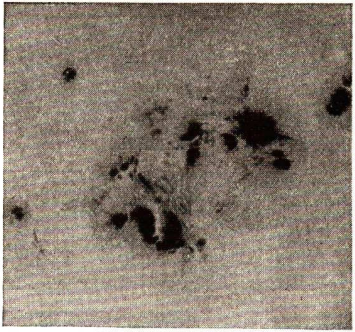
Als Folge davon tritt die Randverdunklung auf, d.i. ein Helligkeitsabfall vor der Mitte zum Scheibenrand hin, da man in der Mitte in tiefere, heißere Schichten hineinblicken kann als am Rande.

Nach außen schließt sich daran die *Chromosphäre* an. Sie hat ungefähr eine Höhe von 10000 km. Die Dichte ist jedoch in ihr erheblich geringer als in der Photosphäre. Deshalb strahlt die Chromosphäre auch viel weniger Licht aus als die darunterliegende Schicht. Daher kann man sie ohne besondere Hilfsmittel nur während einer Sonnenfinsternis beobachten, wenn der Mond die alles überstrahlende Photosphäre abdeckt. Die unteren Chromosphärenschichten haben wie die Photosphäre eine Temperatur von 4000 °K. In ihren oberen Teilen nimmt dann die Temperatur sehr rasch zu. In der *Sonnenkorona*, jener schwach leuchtenden, weit ausgedehnten und einen stetigen Übergang in den interplanetaren Raum bildenden äußersten Schicht der Sonnenatmosphäre, erreicht sie schließlich Werte zwischen 10^5 und 10^6 Grad. Diese Angaben sind aus der Geschwindigkeit der Koronateilchen errechnet worden.

[2] Die Rotationsdauer kann durch Beobachtung von Sonnenflecken (siehe Abschnitt 2.2.2.) ermittelt werden.

2.2.2. Sonnenaktivität und Sonnenflecke

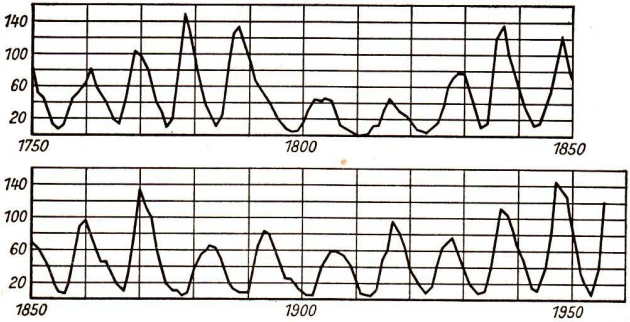
Die Sonnenatmosphäre befindet sich nur im großen gesehen in einem Gleichgewichtszustand. In begrenzten Gebieten treten aber dauernd Störungen dieses Gleichgewichtes auf, die man unter dem Begriffe der *Sonnenaktivität* zusammenfaßt.
Die bekannteste Erscheinung der Sonnenaktivität sind die *Sonnenflecke.* Sie treten einzeln oder in Gruppen auf; ihre Durchmesser schwanken zwischen 1000 km und 200000 km (Bild 41/1).



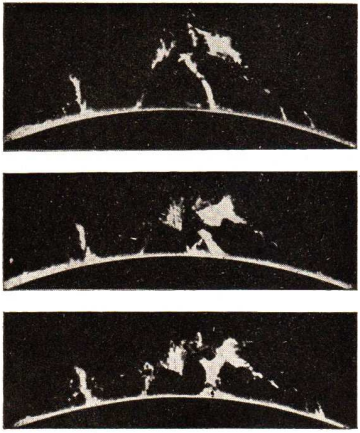
41/1 Große Sonnenfleckengruppe (17. Mai 1951)

Bei den größeren Flecken kann man deutlich einen dunklen Kern, die *Umbra*, erkennen, der von der weniger dunklen *Penumbra* mit radial streifiger Struktur umgeben ist.

Die Lebensdauer der Flecke, von ihrer Größe abhängig, liegt zwischen einem Tag und mehreren Monaten. Die Zahl der sichtbaren Flecke wechselt daher ständig, Mittelwerte über einen längeren Zeitraum hinweg zeigen dagegen eine ausgeprägte 11jährige Periode, die die anderen Erscheinungsformen der Sonnenaktivität ebenfalls mehr oder weniger deutlich erkennen lassen (Bild 41/2).



41/2 Graphische Darstellung des Verlaufs der Sonnenfleckenrelativzahlen von 1750 bis 1956 (nach M. Waldmeier)



42/1 Veränderung einer Sonnenprotuberanz (nach Lyot).
Die Anordnung von unten nach oben entspricht der zeitlichen Aufeinanderfolge in Abständen von 40 min.

Die Sonnenflecke treten hauptsächlich in zwei zum Sonnenäquator parallelen Zonen zwischen 8° und 35° nördlicher bzw. südlicher Breite auf. Die ersten Flecke eines neuen Fleckenzyklus erscheinen jeweils in höheren Breiten.

In Wirklichkeit sind die Flecke nicht vollständig dunkel. Sie strahlen nur weniger Energie aus, da in ihnen die Temperatur etwa 1000 Grad niedriger ist als in der umgebenden Photosphäre. Die Sonnenflecke stellen gewaltige Wirbel dar, in denen die Sonnensubstanz auf spiralförmigen Bahnen aus tieferen Schichten auf- und auswärts strömt.
Die anderen Erscheinungsformen der Sonnenaktivität sind mit den Sonnenflecken mehr oder weniger eng verbunden. Als *Sonnenfackeln* bezeichnet man größere Gebiete der Sonnenoberfläche, die heller als ihre Umgebung erscheinen. Sie sind auf eine Überhitzung und damit vermehrte Ausstrahlung der höheren Schichten der Atmosphäre zurückzuführen. Sie gehen der Bildung von Flecken häufig voran und bleiben nach deren Verschwinden zurück. Die Sonnenflecke sind immer von Fackeln umgeben, das Umgekehrte ist jedoch nicht der Fall. Kurzzeitige Erhellungen in begrenzten Gebieten werden *Eruptionen* genannt. Am Sonnenrand zeigen sie sich als flache Ausbeulungen der Chromosphäre und treten besonders häufig zwischen den beiden Hauptflecken einer Fleckengruppe auf. Sehr große Eruptionen werden oft von Auswürfen chromosphärischer Substanz, den *Protuberanzen*, begleitet. Dabei werden große Gaswolken bis einige 100000 km weit in die Korona hinaufgeschleudert (Bild 42/1).
Das Aussehen der Korona verändert sich systematisch während eines Sonnenfleckenzyklus. Zur Zeit des Fleckenmaximums besitzt sie lange Strahlen nach fast allen Richtungen, im Minimum dagegen erscheint sie abgeflacht. Daher sind die Strahlen dann nur in der Nähe des Äquators und parallel zu ihm vorhanden.
Für alle diese gesetzmäßigen Vorgänge, die man unter dem Begriff der Sonnenaktivität zusammenfaßt, fehlt gegenwärtig noch eine befriedigende physikalische Theorie.

2.2.3. Die Strahlung der Sonne

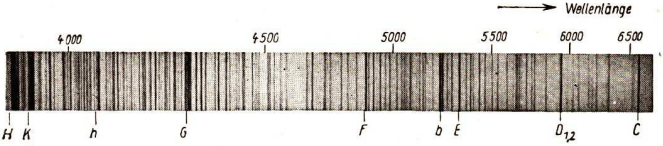
Die Sonne strahlt ständig Energie in den Raum aus. Den Energiebetrag, der in der mittleren Entfernung Erde – Sonne je Zeiteinheit auf die Flächeneinheit senkrecht

zur Strahlungsrichtung fällt, bezeichnet man als *Solarkonstante.* Zu ihrer Messung dienen Pyrheliometer oder Aktinometer.

Diese bestehen aus einer geschwärzten Empfängerfläche, die die auftreffende Strahlung absorbiert und in Wärme umwandelt. Die entstehende Wärmemenge wird mit Hilfe des thermoelektrischen Effekts (Thermoelement) oder auf Grund der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur (Widerstandsthermometer) gemessen. Die Meßwerte müssen wegen des absorbierenden Einflusses der Erdatmosphäre korrigiert werden.

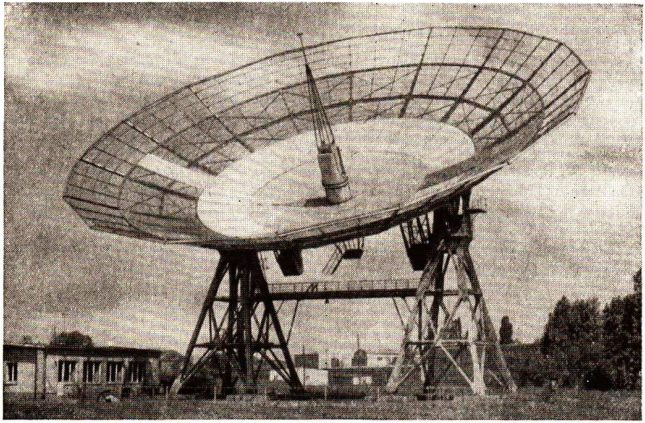
Der Wert der Solarkonstante beträgt $1{,}374\ \mathrm{kW \cdot m^{-2}}$. Das entspricht einer Gesamtstrahlung der Sonne von $3{,}861 \cdot 10^{23}$ kW. Diese Größe wird auch als *Leuchtkraft* der Sonne bezeichnet.

Überprüfen Sie den Zusammenhang zwischen der Solarkonstante und der Gesamtstrahlung der Sonne rechnerisch!



43/1 Sonnenspektrum im sichtbaren Bereich mit den Fraunhoferschen Bezeichnungen der markantesten Linien

Das *Spektrum* der Sonne ist im sichtbaren Spektralbereich sowie im nahen Ultraviolett und Infrarot, insgesamt also zwischen 300 nm und 2000 nm, recht gut bekannt. Es ist ein kontinuierliches Spektrum, überlagert von dunklen Absorptionslinien, den Fraunhoferlinien (Bild 43/1). Im langwelligen Spektralbereich (>600 nm) entspricht die Energieverteilung einer Temperatur von etwa 6000 °K, im kürzerwelligen Gebiet treten dann merkliche Abweichungen davon auf.
Durch Raketenaufstiege konnte das Sonnenspektrum bis zu einer Wellenlänge von 0,1 nm herab vermessen werden.
Heute sind mehr als 20000 Absorptionslinien im Sonnenspektrum bekannt, die zum größten Teil identifiziert, d.h. bestimmten Elementen zugeordnet werden konnten. Sie entstehen in der Sonnenatmosphäre.
Aus der Größe der Absorption ist es möglich, die Zahl der absorbierenden Atome und damit die chemische Zusammensetzung der Sonne zu berechnen.
Die Sonnenatmosphäre setzt sich in der Hauptsache aus Wasserstoff und Helium zusammen, die Häufigkeit der anderen chemischen Elemente ist verhältnismäßig gering. Bis heute wurden über 60 Elemente sicher nachgewiesen. Alle Elemente, die auf der Sonne festgestellt wurden, sind gegenwärtig auch auf der Erde bekannt. Die Spektralanalyse hat die Einheitlichkeit der Materie und die Gültigkeit grundlegender physikalischer Gesetze im Sonnensystem eindrucksvoll nachgewiesen.



44/1 Radioteleskop im Heinrich-Hertz-Institut der Deutschen Akademie der Wissenschaften, Berlin-Adlershof

Die Sonne strahlt außerdem noch eine Radiofrequenzstrahlung aus. Den Untersuchungen auf der Erde ist ein Wellenlängenbereich von 1 cm bis 20 m zugänglich. Zum Empfang der Strahlung benutzt man sogenannte Radioteleskope. Diese bestehen aus einem großen parabolischen Reflektor aus Blech oder Drahtgeflecht, der die ankommende Strahlung im Brennpunkt sammelt. Als Empfangsantennen benutzt man Dipole (Abb. 44/1).
Neben der elektromagnetischen Strahlung sendet die Sonne eine Korpuskularstrahlung aus. Ständig strömen Protonen und Elektronen in Wolken oder gebündelten Strömen mit Geschwindigkeiten von etwa 100 bis 2000 km $\cdot$ s^{-1} von der Sonne in den interplanetaren Raum. Treffen diese elektrisch geladenen Teilchen auf die Erde, so verursachen sie Störungen ihres Magnetfeldes. Außerdem bewirken die solaren Korpuskularströme auch das Entstehen der Polarlichter.

2.2.4. Der Energiehaushalt der Sonne

Die Sonne strahlt in jeder Sekunde eine große Energiemenge aus. Geologische Untersuchungen ergaben, daß sich die Energieausstrahlung der Sonne in den letzten drei Milliarden Jahren nicht wesentlich verändert hat.

Wenn die Sonne aus reiner Kohle bestünde, würde der Energievorrat nach rund 5000 Jahren erschöpft sein. Auch durch Kontraktion kann sie ihren Energiebedarf nicht decken. Selbst

wenn sie sich von unendlicher Ausdehnung auf ihr heutiges Volumen zusammengezogen hätte, genügte die dabei freigewordene Energie nur für einige Millionen Jahre. So bleiben Kernreaktionen als einzig mögliche Energiequelle übrig.

Unter den Bedingungen, wie sie im Sonneninnern herrschen, wird die Energie vorwiegend nach der Proton-Proton-Reaktion freigesetzt. Dabei wird aus vier Wasserstoffkernen ein Heliumkern aufgebaut. Die gesamte Energie, die je aufgebauten Heliumkern freigesetzt wird, beträgt $4{,}2 \cdot 10^{-12}$ J. Die Energieausstrahlung bewirkt gegenwärtig einen Masseverlust der Sonne von 4,3 Millionen Tonnen je Sekunde.

2.2.5. Sonnenenergie in der Natur

Die zur Erde gelangende Sonnenstrahlung bildet die Grundlage alles Lebens auf unserem Planeten. In der Photosynthese bauen die Pflanzen mit Hilfe der absorbierten Sonnenenergie aus relativ energiearmen anorganischen Stoffen die energiereichen organischen Stoffe auf und schaffen auf diese Weise die Voraussetzung des tierischen Lebens. Auch die für den Menschen so wichtigen Energieträger Kohle und Erdöl sind pflanzlichen Ursprungs.

Die anderen natürlichen, vom Menschen genutzten Energiequellen, außer der in neuester Zeit erschlossenen Kernenergie, also z. B. auch die Wind- und Wasserkraft, haben ihre Ursache in der Sonneneinstrahlung.

2.2.6. Technische Anwendungen der Sonnenenergie

Die direkte technische Anwendung der Sonnenenergie ist gegenwärtig noch wenig entwickelt. Anlagen zur unmittelbaren Nutzbarmachung laufen naturgemäß fast ausschließlich in südlicheren Breiten und an Orten, die eine große Zahl von Sonnentagen im Jahr haben. Eine Möglichkeit der technischen Anwendung, die in den mittelasiatischen Gebieten der Sowjetunion bereits praktisch erprobt wird, besteht darin, die Sonnenstrahlung durch große Parabolspiegel zu sammeln und damit Wasser in Dampf zu verwandeln oder Metalle zu schmelzen. Weitere Möglichkeiten bieten Halbleiterbatterien zur Gewinnung elektrischer Energie (z.B. bei künstlichen Himmelskörpern).

Auch unsere Gewächshäuser dienen der unmittelbaren Ausnutzung der Sonnenenergie. Sie beruhen auf der Eigenschaft des Glases, nur sichtbares Licht, nicht aber infrarote Strahlung durchzulassen. Auf diese Weise wird die langwellige, von den erwärmten Körpern ausgesandte Strahlung in den Gewächshäusern zurückgehalten, so daß es zu einer Aufheizung kommt.

2.2.7. Zusammenfassung

Die Sonne, der Zentralkörper des Sonnensystems, ist ein Stern mit einer Oberflächentemperatur von etwa 6000 °K und einer Gesamtstrahlung von $3{,}861 \cdot 10^{23}$ kW.
Sie führt eine nichtstarre Rotation aus.
In ihrer Atmosphäre, das sind die Gebiete der Sonne, aus denen direkt Strahlung zum Beobachter gelangt, unterscheidet man drei Schichten: die Photosphäre, die Chromosphäre, die

Korona. Die veränderlichen Erscheinungen der Atmosphäre zeigen in ihrer Häufigkeit einen Zyklus von 11 Jahren.
Das Sonnenspektrum besteht aus dunklen Linien auf einem kontinuierlichen Untergrund. Außerdem sendet die Sonne eine Radiofrequenz- und eine Korpuskularstrahlung aus.
Die notwendige Energie wird tief im Sonneninnern durch Kernprozesse freigesetzt, bei denen aus Wasserstoff Helium aufgebaut wird. Der zur Erde gelangende Energieanteil ist eine der Grundlagen des irdischen Lebens und stellt in Form von Kohle usw. die wichtigste Energiequelle der Industrie dar.

2.2.8. Fragen und Aufgaben

1. Erläutern Sie die Rotationsbewegung der Sonne!
2. Beschreiben Sie das Sonnenspektrum!
3. Wie ist die Randverdunklung zu erklären?
4. Welche elektrische Leistung könnte von einer Sonnenbatterie mit einer Fläche von 400 m mal 400 m erreicht werden, wenn wegen der Absorption von Strahlungsenergie in der Atmosphäre und der Eigenschaft der Halbleiterzellen nur 15% der Strahlungsenergie in elektrische Energie umgewandelt werden?

2.3. Die Erde

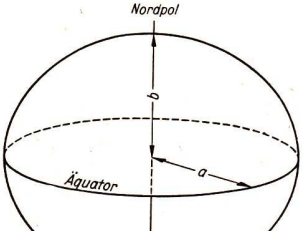
2.3.1. Charakteristik des Planeten Erde

Die Erde hat, wie jeder größere Himmelskörper, in erster Näherung *kugelförmige* Gestalt. Der mittlere Erdradius beträgt $R_\delta = 6{,}371 \cdot 10^6$ m. Infolge der bei der Rotation auftretenden Fliehkräfte ist die Erde abgeplattet und hat somit in zweiter Näherung die Gestalt eines *Rotationsellipsoids* mit der großen Halbachse a als Äquatorradius und der kleinen Halbachse b als Polradius (Bild 46/1). Es ist:

$$a = 6{,}378 \cdot 10^6 \text{ m},$$
$$b = 6{,}357 \cdot 10^6 \text{ m}.$$

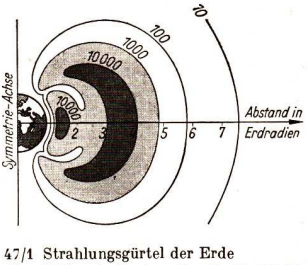
Die Größe der Abplattung $\frac{a-b}{a}$ ist außer von dem Radius und der Rotationsperiode auch von der Masseverteilung im Erdkörper, also dem inneren Aufbau, abhängig. Sie beträgt $\frac{1}{298{,}3}$.

Bei noch höheren Genauigkeitsansprüchen stellt sich heraus, daß der Erdkörper im Großen wie im Kleinen von der Gestalt eines Rotationsellipsoids abweicht. Für astronomische Betrachtungen spielen diese Abweichungen praktisch keine Rolle.



46/1 Rotationsellipsoid als zweite Näherung der Erdgestalt
a) große Halbachse, b) kleine Halbachse

Die Masse der Erde beträgt $\mathfrak{M}_♁ = 5{,}979 \cdot 10^{24}$ kg. Hieraus errechnet sich mit den bekannten Dimensionen eine mittlere Dichte des Erdkörpers von $\varrho_♁ = 5{,}520\,\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$.
In der Erdmasse ist die Masse der Weltmeere (Hydrosphäre) $\mathfrak{M}_W = 1{,}434 \cdot 10^{21}$ kg und die Masse der Lufthülle (Atmosphäre) $\mathfrak{M}_L = 5{,}098 \cdot 10^{18}$ kg enthalten.
Die *Erdatmosphäre* besteht in ihrem unteren Bereich aus einem im wesentlichen einheitlichen Gemisch von Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), Argon (Ar) und Kohlendioxid (CO_2), dem in der unteren Schicht Wasserdampf (H_2O), Spuren anderer Gase und Staubpartikel (Aerosol) beigemengt sind.



47/1 Strahlungsgürtel der Erde
Die Zahlen bedeuten die Partikeldichte (Anzahl je $\mathrm{cm^2 \cdot s}$)

Dieser Bereich gliedert sich in die Troposphäre (Wetterschicht), die bis durchschnittlich 11 km Höhe reicht, in die bis 50 km Höhe sich erstreckende Stratosphäre, in der die warme Ozonschicht eingebettet ist, und in die kalte Mesosphäre, die in 90 km Höhe endet. Im Höhenbereich von 90 km bis 550 km liegt die Ionosphäre, darüber hinaus bis etwa 10000 km erstreckt sich die Exosphäre, in der sich der allmähliche Übergang in den interplanetaren Raum vollzieht. Hier befinden wir uns schon mitten in dem durch das Magnetfeld der Erde gegliederten Bereich des sogenannten *Strahlungsgürtels*, der aus 3 Zonen erhöhter Partikeldichte in zunehmendem Abstand von der Erde besteht (Bild 47/1).
Die Erde hat eine Rotationsperiode relativ zum Fixsternhimmel von $P_♁ = 86164{,}10$ s die um rund $^1/_{100}$ s länger ist als der auf den Frühlingspunkt bezogene mittlere Sterntag $d_* = 86164{,}09$ s.

Erklären Sie diesen (geringen) Zeitunterschied!

2.3.2. Die Erde im Sonnensystem

Die Erde – genauer: der Schwerpunkt des Systems Erde – Mond – bewegt sich in einer elliptischen Bahn um die Sonne. Die große Halbachse dieser Bahn ist $a = 1{,}4960 \cdot 10^8$ km, die Exzentrizität $e = 0{,}01673$ ($\approx {}^1/_{60}$).
Die Umlaufszeit der Erde um die Sonne, bezogen auf einen festen Punkt der Fixsternsphäre, beträgt $U_♁ = 365{,}25636\,\mathrm{d} = 3{,}15693 \cdot 10^7$ s. Diese Zeitspanne heißt *siderisches Jahr* (vgl. Abschnitt 1.2.2).

Wird der Erdumlauf auf den Frühlingspunkt bezogen, so ergibt sich das *tropische Jahr* (vgl. Abschnitt 1.2.2.). Es ist mit 365,24222 d um 20 Minuten 24 Sekunden kürzer als das siderische Jahr.

Die Rotationsachse der Erde ist gegen die Normale zur Erdbahnebene geneigt (Schiefe der Ekliptik). Dieser Winkel beträgt $\varepsilon = 23°\,26{,}'75$ (vgl. Abschnitt 1.2.2.).

2.3.3. Die astronomische Bedeutung der im Internationalen Geophysikalischen Jahr begonnenen Beobachtungen und Messungen

Nach den in den beiden Polarjahren 1882/83 und 1932/33 gemachten Erfahrungen über die erfolgreiche internationale Zusammenarbeit wurde für 1957/58 das Internationale Geophysikalische Jahr vereinbart. Von den zahlreichen gemeinsam bearbeiteten Problemen sind für die Astronomie die folgenden Problemkreise von besonderer Bedeutung: Untersuchungen von Polarlicht und Nachthimmelsleuchten, Erforschung der Ionosphäre und der Meteore, Beobachtung der Sonnenaktivität und der kosmischen Strahlung.
Durch Einsatz von künstlichen Satelliten (siehe Abschnitt 2.7.) konnten vor allem Vorgänge im interplanetaren Raum in der Umgebung der Erde, wie z. B. die Strahlungsgürtel, die Häufigkeit mikrometeoritischer Partikel und der solare Wind untersucht werden. Wegen der Erfolge im IGJ setzte man diese Arbeiten unter der Bezeichnung Internationale Geophysikalische Kooperation fort. Gegenwärtig wird im Jahr der ruhigen Sonne (Sonnenfleckenminimum) die internationale Arbeit auf bestimmten Gebieten der Geophysik aktiviert.

2.3.4. Zusammenfassung

Die Erde ist ein Himmelskörper, der in erster Näherung Kugelform, in zweiter Näherung die Form eines schwach abgeplatteten Rotationsellipsoids mit den Halbachsen $a = 6{,}378 \cdot 10^6$ m und $b = 6{,}357 \cdot 10^6$ m hat. Sie ist von einer Wasserhülle (Hydrosphäre) und einer Lufthülle (Atmosphäre) umgeben. Ihre Masse beträgt $5{,}979 \cdot 10^{24}$ kg. Die Erde führt eine Rotation mit einer Periode von 86164,10 s aus. Die Erde – genauer: der Schwerpunkt des Systems Erde – Mond – bewegt sich um die Sonne in einer elliptischen Bahn, deren große Halbachse $a = 1{,}4960 \cdot 10^8$ km und deren Exzentrizität etwa $^1/_{60}$ beträgt. Ein Umlauf relativ zu einem festen Punkt auf der Fixsternsphäre, ein siderisches Jahr, beträgt 365,25636 d.
Wesentliche Erkenntnisse über den physikalischen Zustand der Erde und ihrer Atmosphäre verdanken wir der wissenschaftlichen Zusammenarbeit vieler Gelehrter und Forschungsinstitutionen verschiedener Staaten im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres (1957/58, fortgesetzt 1959).

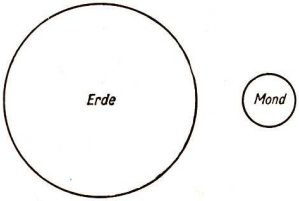
2.3.5. Fragen und Aufgaben

1. Überprüfen Sie durch Rechnung den angegebenen Wert für die mittlere Dichte der Erde!
2. Erläutern Sie den Aufbau der Erdatmosphäre!
3. Berechnen Sie aus den Werten für die große Halbachse der Erdbahn und deren Exzentrizität
   a) die kleine Halbachse der Bahnellipse,
   b) die Entfernung der Erde von der Sonne im Perihel und im Aphel!

2.4. Der Erdmond

2.4.1. Der Mond als Himmelskörper

Der Mond ist der Begleiter der Erde oder exakter: das System Erde – Mond ist ein Doppelplanet. Der Radius des nahezu kugelförmigen Mondkörpers beträgt $R_{☾} = 1{,}738 \cdot 10^6$ m; seine Abplattung ergibt sich zu 1 : 1670 (Bild 49/1).



49/1 Größenverhältnis Erde – Mond

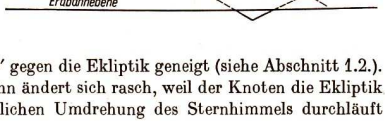
Welche Längendifferenz besteht zwischen der großen und der kleinen Achse des Mondkörpers?

Die Masse des Mondes beträgt $^1/_{81{,}53}$ der Erdmasse, d.h. $\mathfrak{M}_{☾} = 7{,}347 \cdot 10^{22}$ kg. Somit ergibt sich seine mittlere Dichte zu $\varrho_{☾} = 3{,}341\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$, das ist nur 60% der Erddichte.

2.4.2. Rotation und Umlauf

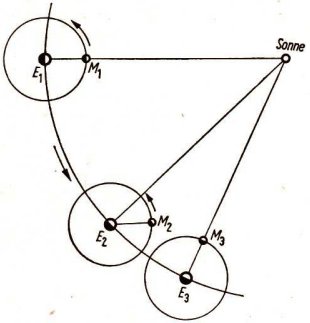
Die Rotationsperiode des Mondes ist $P_{☾} = 27{,}32166\,\mathrm{d} = 2{,}360591 \cdot 10^6$ s und entspricht seiner siderischen Umlaufszeit um die Erde. Seine Rotationsachse bildet mit der Normalen zur Ekliptik einen Winkel von $\varepsilon = 1°32'$.
Die Umlaufbahn des Mondes um die Erde ist eine Ellipse mit der großen Halbachse $a = 3{,}844 \cdot 10^5$ km und der Exzentrizität $e = 0{,}0549$.

49/2 Erdbahn und Mondbahn



Die Mondbahnebene ist um $i = 5°9'$ gegen die Ekliptik geneigt (siehe Abschnitt 1.2.). Die Lage des Knotens der Mondbahn ändert sich rasch, weil der Knoten die Ekliptik in 18,60 Jahren im Sinne der täglichen Umdrehung des Sternhimmels durchläuft (Bild 49/2).
Der Schwerpunkt des Systems Erde – Mond liegt innerhalb des Erdkörpers, und zwar bei mittlerer Entfernung des Mondes etwa 1700 km unterhalb des Ortes, in dessen Zenit der Mond sich befindet. Um diesen Punkt bewegen sich Mond und Erde mit einer Periode, die gleich der Rotationsdauer bzw. dem siderischen Umlauf des Mondes, dem *siderischen Monat*, ist.

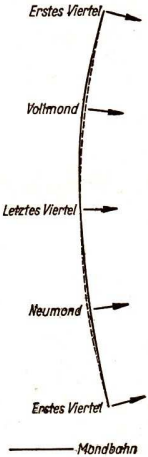
Eine praktisch wichtige Periode ergibt sich, wenn der Mondumlauf auf die Stellung der Sonne bezogen, wenn also die Zeit zwischen gleichen Mondphasen (etwa von Neumond zu Neumond) gerechnet wird; diese Umlaufszeit heißt *synodischer Monat*. Seine Länge beträgt 29,53059 d. Von ihm ist das Zeitmaß „Monat" abgeleitet (Bild 50/1).



50/1 Siderischer und synodischer Monat
Im Punkt M_1 ist der Mond in der Phase des Neumonds, also in Konjunktion zur Sonne. Während eines vollständigen Umlaufs des Mondes um die Erde legt diese den Weg E_1E_2 zurück; befindet sie sich in E_2, so hat der Mond den Punkt M_2 erreicht und befindet sich noch vor seiner Konjunktion mit der Sonne. Um in diese Stellung M_3 zu gelangen, muß er sich noch weiterbewegen, wobei sich die Erde ebenfalls noch ein Stück weiterbewegt und den Punkt E_3 erreicht.

Wegen der starken Bahnexzentrizität bewegt sich der Mond merklich ungleichförmig auf seiner Bahn. Seine Rotation verläuft aber gleichförmig. Hieraus folgt, daß der Mond der Erde nicht immer genau die gleiche Halbkugel zuwendet, sondern scheinbar um seine Achse hin- und herpendelt. Deshalb sind etwa 59% der Mondoberfläche der Beobachtung von der Erde aus zugänglich. Durch die sowjetische Raumsonde Lunik III sind noch weitere 27% photographiert worden (siehe Bildbeilage, Tafel III). Der Rest von 14% ist heute noch unbekanntes Gelände.

In bezug auf die Sonne beschreibt der Mond eine Bahn im Raum, die sich nur wenig von der Erdbahn unterscheidet. Durch die Nähe der Erde wird seine Bahn um die Sonne beeinflußt, doch so, daß der Mond stets, auch wenn er innerhalb der Bahn des gemeinsamen Schwerpunkts von Erde und Mond liegt, die Sonne in konkaver Kurve umläuft (Bild 50/2).

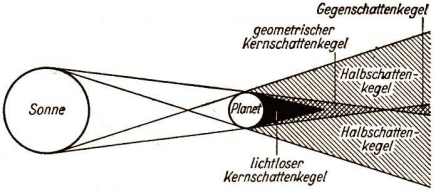


50/2 Teil der Mondbahn in bezug auf die Sonne
Die Pfeile geben die Richtung zum Sonnenzentrum an.

2.4.3. Finsternisse

Um die Typen der Finsternisse zu verstehen, muß man sich zunächst deutlich machen, welcher Art die Schattenphänomene

eines kugelförmigen Weltkörpers im Strahlungsfeld der Sonne sind (Bild 51/1). Man unterscheidet den Kernschattenkegel, der vom Planeten weg konvergiert, den Gegenschattenkegel und den Halbschattenkegel, die dagegen divergieren. Im Raum um den Planeten hat man also Gebiete mit folgenden Erscheinungen: Im Kernschatten ist die Sonne unsichtbar, also vollständig verfinstert. Im Gegenkegel liegt die unbeleuchtete Hemisphäre des betreffenden Weltkörpers als schwarze Kreisscheibe vor der Sonne, die ringförmig verfinstert erscheint. Im Halbschatten ist je nach Lage ein mehr oder weniger großer Teil der Sonne verdeckt, man nimmt eine partielle Finsternis wahr. Im übrigen Raum strahlt die Sonne unverfinstert.



51/1 Schattenphänomene im Strahlungsfeld der Sonne um einen Planeten mit Atmosphäre

Im Unterschied hierzu ist eine Mondfinsternis eine objektive Verdunklung des Mondes durch die Erde, die überall dort praktisch gleichzeitig gesehen werden kann, wo der Mond sichtbar ist.

Da die Erde aber eine Atmosphäre besitzt, wird ein Teil der Sonnenstrahlen infolge der Brechung durch die Luft in den Kernschatten hineingelenkt und dabei gleichzeitig durch stärkere Streuung des kurzwelligen Lichtes geschwächt und rot gefärbt. Der Mond erscheint deshalb selbst bei totaler Finsternis nicht vollständig verdunkelt, sondern in einem gedämpft rötlichen Licht.

Sonnen- und Mondfinsternisse wiederholen sich nach 6585 d 8 h in nahezu gleichartiger Weise.

Nach unserer heutigen Zählung entspricht dies 18 Jahren und 10 oder 11 Tagen und 8 Stunden, je nachdem 5 oder 4 Schaltjahre in diesem Zeitraum liegen.

Aus der gegenseitigen Lage von Erdbahn und Mondbahn folgt, daß Finsternisse nur dann auftreten können, wenn sich der Mond in der Neu- bzw. Vollphase in der Nähe der Knoten befindet. Die für das Entstehen der Finsternisse günstigen Stellungen von Sonne, Mond und Erde wiederholen sich periodisch.

2.4.4. Physische Beschaffenheit der Mondoberfläche

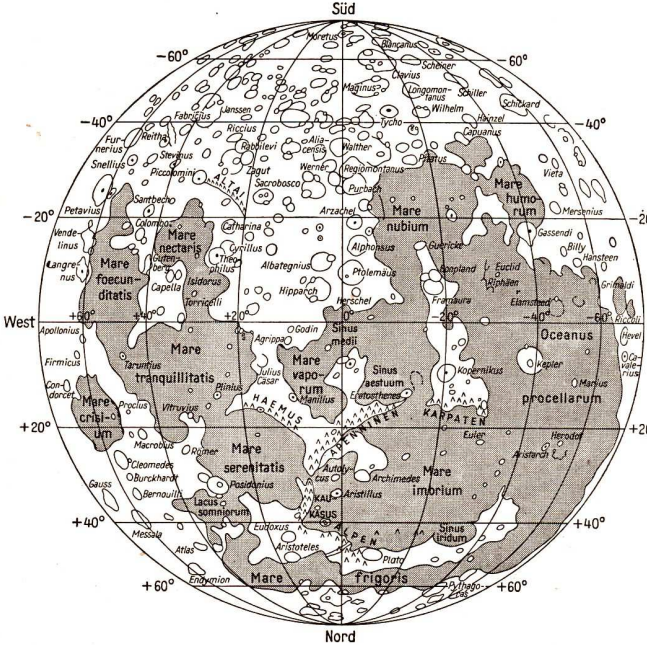
Schon mit bloßem Auge erkennt man auf dem Monde hellere und dunklere Gebiete (Bild 52/1, siehe auch Bildbeilage, Tafel II). Der Mondboden besteht also nicht durchgehend aus dem gleichen Material. Die Hochländer sind im allgemeinen heller als die Einbruchsniederungen. Für die letzteren hat sich die Bezeichnung Mare, d.h. Meer, eingebürgert. Es sind jene Gebiete, in die das Wasser zusammenströmen würde, wenn

auf dem Mond solches vorhanden wäre. Von den als Mare bezeichneten Tiefebenen der verschiedensten Größen gibt es einen allmählichen Übergang zu den Wallebenen und Ringgebirgen, die als für den Mond typische Formen der Gebirgsbildungen anzusehen sind. Die Wallebenen und oft auch große Ringgebirge sind so flach, daß man wegen der Krümmung des Mondbodens von der einen Seite aus die gegenüberliegenden Randgebirge nicht sehen könnte; sie liegen unterhalb des Horizontes. Das größte Ringgebirge, Clavius, hat einen Durchmesser von 238 km, die Randwälle sind dagegen nur etwa 2 km hoch. Allgemein gilt, daß das Verhältnis Tiefe zu Durchmesser mit abnehmendem Durchmesser wächst (Bild 53/1).

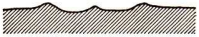
Wegen der Luftunruhe kann man selbst in starken Fernrohren auf der Mondoberfläche Einzelheiten von weniger als etwa 1 km Durchmesser kaum noch erkennen. Bis zu dieser Größe wächst die Anzahl der Rundvertiefungen auf dem Monde. Die kleinsten nennt man Krater und Kratergruben.

Außer diesen Rundformen erkennt man auch Gebirgszüge auf der Mondoberfläche, denen man die Namen irdischer Gebirge gegeben hat. So gibt es die Karpaten, Apen-

52/1 Oberflächenformationen des Mondes



ninen, Alpen usw. Die Mondgebirge sind jedoch keine Faltungen, sondern erwecken den Eindruck zusammengeschobener Schollen. Längs der Ränder der Mare ziehen sich kilometerlange Risse verschiedener Breite hin, oft verästelt und geschlängelt. Man nennt die schmalen Rillen, die breiten Gräben. Das Alpenquertal ist ein solcher fast geradliniger Graben. Bemerkenswert sind auch einige Steilhänge wie z. B. die sog. Lange Wand im Mare nubium, die über 100 km lang in nordsüdlicher Richtung verläuft. Die merkwürdigsten und noch nicht völlig aufgeklärten Gebilde sind die hellen Strahlensysteme, die von Ringgebirgen ausgehend sich über hunderte von Kilometern des Mondbodens verfolgen lassen oder netzartig die Umgebung auffälliger Ringgebirge ausfüllen.



53/1 Profil des Ringgebirges Kopernikus

Die Helligkeit des Mondes wechselt ziemlich stark, hauptsächlich wegen des Wechsels der Beleuchtungsphase und wegen der nicht diffusen Reflexion des Lichtes an seiner Oberfläche.

Den Mond umgibt keine nachweisbare Atmosphäre, wie auch keine nachweisbaren Mengen Wassers auf seiner Oberfläche wahrzunehmen sind. Beides, die Gashülle und die Hydrosphäre, kann der Mond mit seiner geringen Anziehungskraft, berücksichtigt man die Molekülbewegung bei der Erwärmung durch die Sonne, nicht festhalten. Durch Messung ist im subsolaren Punkt, der bei Vollmond etwa in der Mitte der Mondscheibe liegt, eine Bodentemperatur von + 120 °C festgestellt worden. Während der Mondnacht sinkt die Temperatur auf etwa – 180 °C.

Wie lange dauern Tag und Nacht auf dem Monde?

2.4.5. Zusammenfassung

Der Mond bildet mit der Erde einen Doppelplaneten. Er hat nahezu Kugelform, mit einem mittleren Halbmesser von 1,738 · 10^6 m. Die Oberflächenformen des Mondes weichen von denen der Erde erheblich ab. Wegen seiner geringen Masse konnten weder Wasser noch Gas für längere Zeit an seiner Oberfläche existieren. Seine Rotation ist an den Umlauf um die Erde gebunden, die Periode beträgt 27,32166 d.

Der Mond umläuft den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems Erde – Mond (dieser Punkt liegt im Erdinneren); je nach dem Bezugspunkt unterscheidet man verschiedene Umlaufszeiten. Die wichtigsten sind der siderische Monat, der der (siderischen) Rotationsperiode gleich ist, und der synodische Monat, die Zeit zwischen zwei gleichen Phasen, mit einer Dauer von 29,53059 d. Die Mannigfaltigkeit der Sonnen- und Mondfinsternisse wird durch die Exzentrizität der Erd- und der Mondbahn sowie durch die Neigung zwischen beiden Bahnebenen und die verschiedene Lage der Beobachter auf der Erde bedingt.

2.4.6. Fragen und Aufgaben

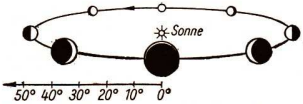
1. Wird der Mond stärker von der Sonne als von der Erde angezogen?
2. Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit des Mondes in seiner Umlaufbahn um die Erde?

3. Geben Sie die wesentlichsten Unterschiede der Oberflächenformationen von Erde und Mond an!
4. Welche Tatsachen beweisen, daß der Mond keine nachweisbare Atmosphäre hat?

2.5. Die großen Planeten

2.5.1. Merkur und Venus

Merkur und Venus bewegen sich innerhalb der Erdbahn um die Sonne und zeigen deshalb einige gemeinsame Erscheinungen. So sieht man beide Planeten nur in einem bestimmten Abstandsbereich von der Sonne. Bei Merkur beträgt der größte Winkelabstand im Mittel 28°, bei Venus 48°. Bei hinreichender Vergrößerung zeigen beide Planeten im Fernrohr Lichtgestalten wie der Mond; der scheinbare Durchmesser des Planeten wechselt besonders bei Venus stark (Bild 54/1).



54/1 Lichtphasen und scheinbarer Durchmesser der Venus

Welches Verhältnis besteht zwischen dem größten und dem kleinsten scheinbaren Durchmesser bei Venus?

In der Helligkeit unterscheiden sich die Planeten Merkur und Venus merklich. Venus ist viel heller; sie kann zur Zeit ihrer größten Helligkeit sogar am Tageshimmel mit bloßem Auge gesehen werden, wenn man ihren Ort genau kennt. Dieser Helligkeitsunterschied ist nur zum geringsten Teil eine Folge der verschiedenen Größe der Planeten, in der Hauptsache wird er bedingt durch das ungleich große Rückstrahlvermögen (Albedo) der Oberflächenschichten (0,06 bei Merkur und 0,76 bei Venus).
Merkur zeigt eine atmosphärelose Oberfläche, deren Temperatur auf der Sonnenseite bei +400 °C liegt. Da er wahrscheinlich eine gebundene Rotation ausführt (wie der Erdmond), liegt die Temperatur auf seiner Nachtseite bei −200 °C. Wasser ist auf der sonnenbestrahlten Seite nicht vorhanden.
Venus dagegen hat eine Atmosphäre mit etwas niedrigerem Atmosphärendruck als auf der Erde. Infolge der geringeren Entfernung von der Sonne liegt die Temperatur an der Oberfläche um mindestens 80 Grad höher als auf der Erde. Die Atmosphäre ist praktisch undurchsichtig, mit Staub und offensichtlich dichten Wolkenschichten erfüllt. Die Rotationsdauer ist nicht genau bekannt, wahrscheinlich liegt sie bei etwa 225 Tagen. Ihre Feststellung war wegen des Fehlens deutlicher Strukturen auf der Außenseite noch nicht endgültig möglich. Die Anwesenheit größerer Wassermengen ist wahrscheinlich, konnte aber noch nicht exakt nachgewiesen werden. Fraglich ist das Vorkommen größerer Sauerstoffmengen. Als Grundsubstanz der Atmosphäre gilt Stickstoff; Kohlendioxid ist etwa doppelt so häufig wie in der Erdlufthülle.
Merkur und Venus haben keine Monde.

2.5.2. Mars

Mars ist der erdähnlichste Planet, obwohl er erheblich kleiner als die Erde und auch seine Atmosphäre weniger dicht ist. Er rotiert in 24 h 37 min, seine Rotationsachse ist gegen die Normale zur Bahnebene um 25,°2 geneigt, so daß ausgeprägte Jahreszeiten auftreten. Wegen der etwa 2 Jahre dauernden Umlaufszeit des Mars um die Sonne sind die Marsjahreszeiten annähernd doppelt so lang wie die irdischen.
Seine Entfernung von der Erde kann zwischen 55,6 und 400 Millionen km schwanken. Deshalb mißt sein scheinbarer Durchmesser zwischen 25,″2 und 3,″5, und seine Helligkeit variiert dementsprechend stark. Von den äußeren Planeten zeigt Mars die größte Phase. Sie erreicht einen Winkel von 47,°5.

Wie ist diese Erscheinung zu erklären? Weshalb zeigen die entfernteren äußeren Planeten keine so große Phase?

Die auffälligsten Gebilde, die man schon bei verhältnismäßig geringer Vergrößerung auf seiner Oberfläche erkennen kann, sind die Polkappen (siehe Bildbeilage, Tafel IV). Als hellere Gebiete stehen sie in deutlichem Kontrast zu den dunklen Konturen der Marsoberfläche.

Im jahreszeitlichen Wechsel erreicht die eine der Polkappen ihre größte Ausdehnung (Winter), während die andere in der Regel verschwindet (Sommer). Nach einem halben Umlauf haben sich die Verhältnisse umgekehrt.

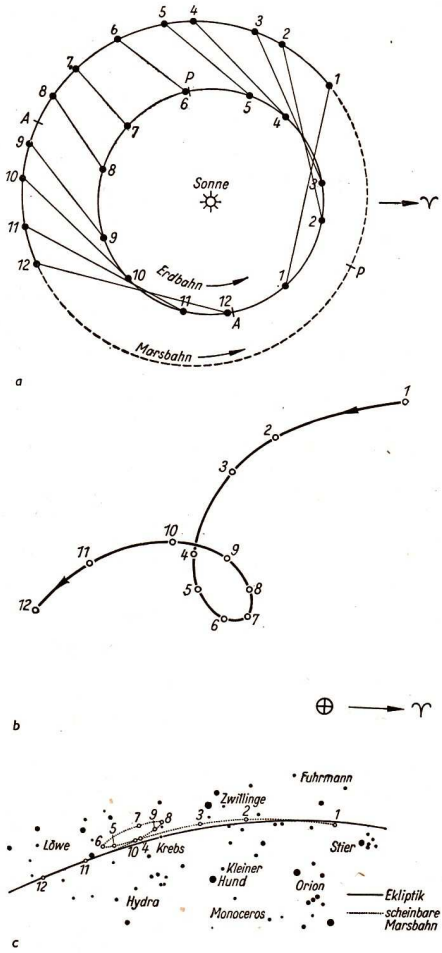
Bei den helleren Gebieten handelt es sich möglicherweise um Schnee- oder Reiflächen, über denen sich auch noch Nebel- oder Wolkenfelder ausdehnen können.
Das andersartige Verhalten der Marspolkappen gegenüber den irdischen Eisgebieten der Arktis und Antarktis läßt erkennen, daß auf dem Mars erheblich weniger Wasser vorhanden sein muß. Die Marsoberfläche dürfte also eher einer Wüste oder allenfalls einer Steppe gleichen.

Daß an der Oberfläche des Mars keine größeren offenen Wasserflächen vorhanden sind, folgt auch aus dem Fehlen des Sonnenreflexes. Das Spiegelbild der Sonne, das jede Wasserfläche zurückwirft, müßte auf dem Mars als sternartige Erhellung zu sehen sein. Eine solche Erscheinung ist aber nie beobachtet worden.

Auch über anderen Gebieten des Mars werden gelegentliche Farb- und Helligkeitsänderungen beobachtet. So beschreiben einige Marsbeobachter die dunklen Gebiete als grünlichgrau; die Farbe geht im Herbst in ein bräunliches Grau über. Helle Flächen in niedrigen Breiten werden als Nebel- bzw. Wolkenfelder gedeutet, allgemeine Eintrübungen und unscharfe Konturen als Auswirkung ausgedehnter Staubstürme. Die Farbe der Gesteine bzw. des Sandes gibt der Marsoberfläche und damit dem Planeten die rötlichgelbe Färbung. Durch die wenig dichte Marsatmosphäre kann man die Oberfläche des Planeten gut erkennen. Die Atmosphäre besteht zum größten Teil aus Stickstoff (N_2), dann folgen Ar, CO_2 und zuletzt O_2. Die Oberflächentemperatur des Mars liegt im Durchschnitt 30 Grad tiefer als auf der Erde.

Von den irdischen Formen des Lebens dürften auf dem Mars nur die primitivsten Arten lebensfähig sein. Wahrscheinlich aber haben Lebewesen auf dem Mars, wenn sie vorhanden sind, gänzlich anders geartete Formen als auf der Erde.

Die „Marskanäle" haben sich als Täuschung herausgestellt. Infolge der stets



56/1 Zur Bahn des Mars am Sternhimmel (Opposition Februar 1963)
Das Teilbild a) zeigt die Umlaufbewegung von Erde und Mars um die Sonne für die Zeit vom 4. 8. 1962 bis zum 2. 7. 1963, vom Nordpol der Ekliptik aus gesehen. Die mit gleichen Zahlen versehenen Bahnorte entsprechen gleichen Zeitpunkten. Die Richtung zum Frühlingspunkt ist durch einen Pfeil mit dem Symbol ♈ angegeben. Im Teilbild b) sind die Vektoren der gegenseitigen Entfernung der Planeten nach Größe und Richtung angegeben, damit ist die Bahn des Mars relativ zur Erde bestimmt. Das Teilbild c) gibt die Bahn des Mars am Fixsternhimmel zwischen den Sternen des Tierkreises an. Aus a) ist zu ersehen, daß die Opposition kurz vor Erreichen des Bahnpunktes *7* stattfindet, aus c) geht hervor, daß Mars zwischen den Punkten *6* und *8* seine Rückläufigkeitsschleife zieht.

vorhandenen Luftunruhe kann man auch im günstigsten Falle von der Erde aus keine Einzelheiten erkennen, die kleiner als 100 km sind.
Mars wird in der Nähe seiner Äquatorebene von zwei Kleinstmonden im selben Sinne umlaufen, wie er rotiert. Die Einzelheiten sind aus der Tabelle 3 zu ersehen.

Tabelle 3: Die Monde des Mars

Bezeichnung	a (in km)	e	U (in d)	i (in Grad)
Phobos	$9{,}38 \cdot 10^3$	0,017	0,319	1,8
Deimos	$2{,}35 \cdot 10^4$	0,003	1,262	1,4

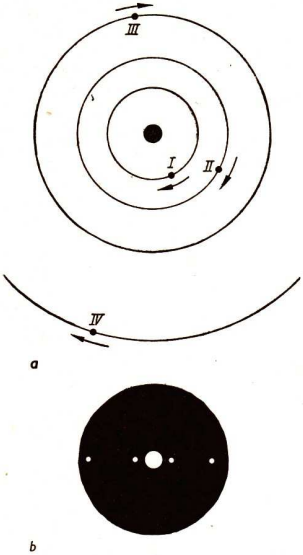
a große Halbachse der Bahn
e Exzentrizität der Bahn
U siderische Umlaufszeit
i Neigung der Bahnebene gegen den Äquator des Planeten

Mars kommt etwa alle 2 Jahre in Opposition zur Sonne, damit zugleich in geringe Entfernung von der Erde und somit in günstige Sichtbarkeit (Bild 56/1).

2.5.3. Jupiter und Saturn

Jupiter und Saturn sind die beiden Riesenplaneten, die nach heutiger Auffassung nahe der oberen Grenze des planetaren Zustands liegen. Sie haben zusammen 99% der Gesamtmasse der planetarischen Körper unseres Sonnensystems. Durch ihre gewaltige Masse und infolge ihrer großen Entfernung von der Sonne konnten beide auch Wasserstoff in ihrer Atmosphäre behalten. So kann auch die geringe mittlere Dichte nicht überraschen, die bei Jupiter das 1,3-, bei Saturn das 0,7fache des Wassers ist. Die Masse der beiden Riesenplaneten ist stärker zum Mittelpunkt hin konzentriert als bei der Erde. Daraus und aus der relativ hohen Rotationsgeschwindigkeit (Rotationsdauer: Jupiter 9 h 50 min, Saturn 10 h 14 min) erklärt sich die starke Abplattung beider Planeten (Jupiter 1 : 16, Saturn 1 : 10).
Wegen der großen und wechselnden Entfernung dieser Planeten von der Erde schwankt der scheinbare Durchmesser Jupiters zwischen 31″ und 50″, der Durchmesser Saturns zwischen 15″ und 21″. Beide Planeten zeigen zum Äquator parallel verlaufende Streifen, die bei Jupiter ausgeprägter sind (siehe Bildbeilage, Tafel IV und V). An der Bewegung besonders markanter Flecke erkennt man die Rotation und konnte ihre Dauer bestimmen. Größe und Gestalt der Flecke unterliegen fortwährenden Änderungen. Die Flecke besitzen außerdem noch geringe Eigenbewegungen. Die beobachtbare Oberfläche ist also nicht fest, sondern eine mehrschichtige Wolkendecke in der Atmosphäre der Riesenplaneten. Der Hauptbestandteil dieser Atmosphäre ist Wasserstoff; die Kondensationen sind keine Wassertröpfchen oder Eiskristalle, sondern Tröpfchen anderer Wasserstoffverbindungen, nämlich Ammoniak und Methan.

Da die kleinsten gerade noch erkennbaren Gebilde auf Jupiter Ausmaße von 1400 km besitzen (bei Saturn sind es rund 3000 km), ist zu folgern, daß in den Atmosphären gewaltige,



58/1 Jupiter mit seinen 4 Großmonden
(19. 12. 1963, 22^h MEZ)
a) Blick von Süden auf den Planeten und das System der Monde,
b) Anblick im umkehrenden (astronomischen) Fernrohr.
Der Anblick entspricht einem Betrachten des oberen Teilbildes vom unteren Bildrand aus.

turbulente Umwälzungen ablaufen, die alle irdischen Gewitterstürme weit übertreffen. Die dabei auftretenden elektrischen Entladungen konnten durch Radioteleskope nachgewiesen werden. Die Sonnenstrahlung, die schon in der Entfernung des Jupiter je Flächeneinheit nur noch $^1/_{27}$ der Energie liefert, die in Erdentfernung wirksam wird, kann diese atmosphärischen Vorgänge nicht in Gang halten. Der Anstoß zu den atmosphärischen Umwälzungen muß aus den tieferen Schichten dieser Riesenplaneten stammen, die wir uns zum größten Teil gasförmig vorzustellen haben. Doch unter dem hohen Druck im Innern der Riesenplaneten verhält sich die stark komprimierte gasförmige Substanz wesentlich anders als die verdünnten Gase, mit denen wir es im täglichen Leben zu tun haben.

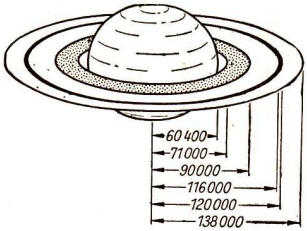
Ein Blick durch ein Fernrohr von mindestens 10facher Vergrößerung zeigt uns bis zu vier ungefähr in der Äquatorebene befindliche Sternchen in wechselnder Stellung: die schon von GALILEI entdeckten Großmonde des Jupiter (Bild 58/1).

Warum bewegen sich die im oberen Teilbild von 58/1 dargestellten Monde im Uhrzeigersinn um den Planeten? Vergleichen Sie die Bewegung der Monde mit dem Sinn der Umlaufbewegung Jupiters um die Sonne!

Außer den vier bereits im Feldstecher sichtbaren Monden hat Jupiter noch 8 Monde.

58/2 Saturn mit Ring und System der inneren Monde
Die Skizze stellt einen Schnitt in Richtung der Rotationsachse dar. Die beiden äußeren Monde Japetus und Phoebe fallen aus dem System heraus und stehen etwa 2,4- bzw. 8,7mal soweit entfernt wie der Mond Hyperion.

Von diesen bewegt sich der erst im Jahre 1892 entdeckte 5. Mond noch innerhalb der Bahn des ersten. Diese 5 Monde bewegen sich nahezu in der Äquatorebene des Planeten, sie bilden die Gruppe der eigentlichen Monde. Von den übrigen 7 Monden bilden der 6., 7. und 10. die zweite Gruppe, der 8., 9., 11. und 12. die dritte Gruppe, deren Mitglieder den Planeten in umgekehrtem Bewegungssinn umlaufen. Die Monde der 2. und 3. Gruppe sind wahrscheinlich aus dem System der Planetoiden „zugewandert".



59/1 Das Ringsystem des Saturn

Saturn hat 9 Monde. Die 7 im Bild 58/2 dargestellten gelten als echte Monde.

Der 8. Mond (Japetus) zeigt eine starke Bahnneigung und der 9. (Phoebe) außerdem noch umgekehrten Umlaufsinn. Wahrscheinlich sind diese Himmelskörper auch „zugewandert".

Um den Saturnkörper liegt in der Äquatorebene ein äußerst dünner, flacher, kreisförmiger Ring, der sich bei stärkerer Vergrößerung als System mehrerer Ringe erweist (Bild 59/1). Wir müssen annehmen, daß das ganze Ringsystem – bei einer Dicke von höchstens 20 km – aus einzelnen, wahrscheinlich meteoritenhaft bruchstückartigen Körpern sehr unterschiedlicher Größe besteht, die in nahezu kreisförmigen Bahnen den Planeten umlaufen.
Da die Rotationsachse des Saturn rund 27° gegen die Normale zur Ekliptik geneigt ist, können wir während eines Umlaufs des Saturn um die Sonne (rund 30 Jahre) den Ring bald von Norden, bald von Süden geöffnet sehen. In Abständen von etwa 15 Jahren blicken wir auf die Kante des Ringes, der dann nur noch in den größten Instrumenten als feiner Strich zu erkennen ist.

2.5.4. Uranus, Neptun und Pluto

Von den 3 äußersten Planeten besitzen Uranus und Neptun eine dichte Atmosphäre mit wahrscheinlich geschlossener Wolkendecke ähnlicher Art wie Jupiter und Saturn. Über die physikalischen Verhältnisse von Pluto ist noch nichts bekannt.
Uranus wurde im Jahre 1781 von W. Herschel entdeckt. Sein scheinbarer Durchmesser von im Mittel 3,″4 gestattet kaum die Wahrnehmung von Einzelheiten. Seine Dichte ist 1,6 $g \cdot cm^{-3}$, er dreht sich in 10,8 h um seine Achse. Sein Rückstrahlvermögen beträgt 0,66; seine Oberflächentemperatur liegt bei –200 °C. Uranus wird in seiner Äquatorebene von 5 Monden umlaufen, die nahezu kreisförmige Bahnen haben. Die Neigung des Äquators gegen die Ekliptik beträgt 98°.
Neptun wurde 1846 entdeckt, und zwar nahe dem Ort, der von Adams und Leverrier auf Grund seiner Anziehungswirkung auf Uranus berechnet worden war (siehe Abschnitt 3.). Sein scheinbarer Durchmesser beträgt bei mittlerer Entfernung nur 1,″8. Seine mittlere Dichte ist mit 2,3 $g \cdot cm^{-3}$ größer als die der anderen jupiterähnlichen Großplaneten. Sein hohes Rückstrahlvermögen von 0,62 zeigt an, daß

auch er von einer Wolkenhülle umgeben ist. Seine Rotationsdauer beträgt 15,7 h. Von seinen beiden Monden ist der innere und größere wohl ein echter Mond, der äußere aber wahrscheinlich eingefangen.
Unser Wissen von Pluto geht über das, was in der Tabelle 5 des Anhangs zu finden ist, kaum hinaus.

2.5.5. Zusammenfassung

Sieht man vom äußersten Großplaneten Pluto ab, so bewegen sich die übrigen nahezu in einer Ebene und mit verschiedenen Entfernungen um die Sonne. Der Umlaufsinn verläuft, vom Nordpol der Ekliptik betrachtet, entgegen dem Uhrzeiger.
Die Bahnen der Planeten sind kreisähnliche Ellipsen; die stärkste Exzentrizität finden wir bei Pluto, dann folgen Merkur und Mars. Dem inneren Aufbau nach hat man zwei Haupttypen zu unterscheiden: die erdähnlichen Planeten, zu denen außer der Erde Venus, Mars, Merkur (und wahrscheinlich auch Pluto) gehören, und die vier jupiterähnlichen Riesenplaneten Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun.

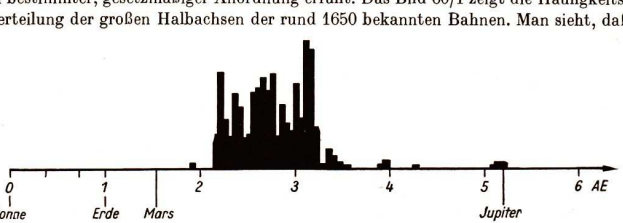
2.5.6. Fragen und Aufgaben

1. Welche Planeten haben eine Atmosphäre; wodurch wird das bewirkt?
2. Beobachten Sie einen äußeren Planeten während etwa eines halben Jahres, das so zu wählen ist, daß die Opposition in die Mitte fällt, und tragen Sie den scheinbaren Ort in eine geeignete Sternkarte ein! Erklären Sie das Ergebnis aus den Bewegungen von Erde und Planet im Sonnensystem!
3. Berechnen Sie die größte und die kleinste Entfernung des Planeten Mars von der Erde mit Benutzung der Übersichtstabelle der Bahnelemente der Planeten!
4. Wie groß sind die kleinsten noch trennbaren Oberflächengebilde des Mars bei 200facher Vergrößerung in geringster Entfernung von der Erde, wenn das Auge ein Trennvermögen von 1′ aufweist?

2.6. Die Kleinkörper des Sonnensystems

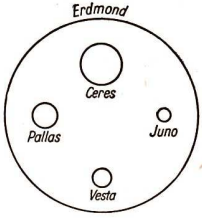
2.6.1. Das System der Planetoiden

Die *Planetoiden* bilden ein System, das die Abstandslücke zwischen Mars und Jupiter in bestimmter, gesetzmäßiger Anordnung erfüllt. Das Bild 60/1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der großen Halbachsen der rund 1650 bekannten Bahnen. Man sieht, daß



60/1 Häufigkeitsverteilung der Planetoidenbahnen im Bereich zwischen Mars und Jupiter

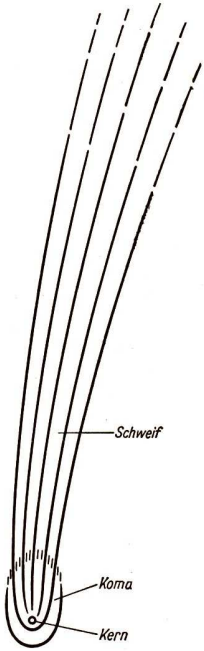
ein Kreisring von über einer Astronomischen Einheit Breite mehr oder weniger dicht besetzt ist, daß aber auch außerhalb dieser Zone noch Gruppen von Planetoiden vorkommen.
Wie alle außerhalb der Erdbahn umlaufenden Planeten, so zeigen auch die Planetoiden während der Opposition ihre größte scheinbare Helligkeit. Ihre geometrische Größe erstreckt sich über einen weiten Bereich. Die vier zuerst entdeckten Planetoiden sind Ceres, Pallas, Juno und Vesta. Ihre Durchmesser konnten noch optisch gemessen werden (Bild 61/1). Die meisten Planetoiden sind aber wesentlich kleiner, die kleinsten noch beobachtbaren dürften Durchmesser von wenigen Kilometern haben. Die Gesamtzahl der Planetoiden bis zu dieser Größe ist auf Grund der Entdeckungswahrscheinlichkeit auf 44000 geschätzt worden. Die daraus abgeleitete Gesamtmasse beträgt etwa ein Zehntel der Masse unseres Mondes.



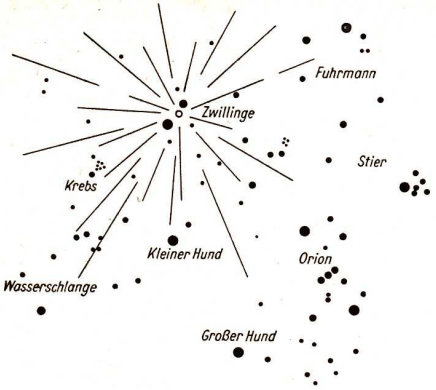
61/1 Größenvergleich der größten Planetoiden mit dem Erdmond

2.6.2. Kometen, Meteoriten und Meteore

Die *Kometen* erfüllen wahrscheinlich den ganzen von der Sonne als Wirkungsbereich (s. Abschnitt 2.7.3) beherrschten Raum. Ihre Anzahl ist zu 10^{11} geschätzt worden. Demgegenüber ist die Anzahl der beobachteten Kometen, die bei 10^3 liegt, sehr klein. Dies liegt daran, daß wir nur diejenigen Kometen beobachten können, die in den sonnennahen Bereich (Entfernung weniger als 5 AE von der Sonne) gelangen.
Der eigentliche Körper des Kometen wird *Kern* genannt. Er zeigt im Gegensatz zu den Planeten und Planetoiden einen relativ lockeren Aufbau und besteht zu etwa 5 bis 20% aus meteoritischen Körpern verschiedener Größe, vom Staubkorn bis zu faustgroßen Brocken. Diese gesteinsartigen und metallischen Körper sind in Eis eingebettet, das überwiegend aus H_2O, daneben in geringeren Mengen auch aus CO_2, NH_3, CH_4 und anderen Stoffen besteht. Bei Annäherung an den inneren Bereich des Planetensystems bildet sich unter der Einwirkung der Sonnenstrahlung eine Dampfatmosphäre (die Koma) der genannten Moleküle. Mit dem ausströmenden Gas werden gleichzeitig kleine



61/2 Aufbau eines Kometen (schematisch)



62/1 Radiant eines Meteorstroms (Geminiden, 12. Dezember)

feste Körper mit herausgehoben. Wegen der geringen Masse kann der Kern die ausgetretene Gas- und Staubatmosphäre nicht an sich halten, zumal der Strahlungsdruck sowie der durch die korpuskularen Ströme von der Sonne erzeugte „solare Wind" die aus dem Kometenkern ausgetretene Substanz in sonnenabgewandter Strömung davontreibt (Bild 61/2).

Die Moleküle werden zum Leuchten angeregt, die Staubteilchen reflektieren die Sonnenstrahlung. So entsteht das bekannte Bild eines aus *Koma* und *Schweif* (der Kern ist stets unsichtbar, da zu klein) bestehenden Kometen (siehe Bildbeilage, Tafel V).

Meteoriten sind feste Körper verschiedener Größe (Staubkorn bis Findling), die auf bestimmten Bahnen die Sonne umlaufen. Durchquert ein solcher Körper zufällig die Erdatmosphäre, so wird seine Geschwindigkeit abgebremst und gleichzeitig seine kinetische Energie in Wärme umgewandelt, so daß der Körper von außen nach innen verdampft. Dabei erzeugt er die bekannten, flüchtigen, strichförmigen Leuchterscheinungen, die man als *Meteore* bezeichnet. Die schwachen Meteore nennt man auch *Sternschnuppen*, die hellsten *Feuerkugeln* (siehe Bildbeilage, Tafel VI). Ist der Körper abgebremst, ohne vollständig verdampft zu sein, so fällt ein Restkörper zur Erde herab. Locker aufgebaute Körper zerreißen unter der Einwirkung der Kräfte in der Luft oder verpuffen bei der Auflösung in einem Aufblitzen. Die größten Körper treffen noch am Boden mit hoher Geschwindigkeit (mehrere Kilometer je Sekunde) auf und erzeugen dort Verwüstungen oft beträchtlichen Ausmaßes.

Stofflich unterscheidet man zwei Hauptgruppen von Körpern: die Stein- und die Eisenmeteoriten. Zwischen diesen gibt es zahlreiche Übergänge. Ihrer Herkunft nach kann man

Tabelle 4: Meteorströme

Strom	Radiant		Maximum	Komet
Lyriden	273°	+ 35°	22. April	1861 I
Aquariden	338	− 1	5. Mai	Halley
Perseiden	43	+ 56	11. August	1862 III
Geminiden	113	+ 30	12. Dezember	–

sie in drei Gruppen einteilen: in die kometarischen, die planetarischen und die interstellaren Meteoriten. Die kometarischen sind Auflösungsprodukte ehemaliger Kometenkerne, die sich noch fast in derselben Bahn bewegen. Sie treten, da ihre Zugstraße an einer bestimmten Stelle die Erdbahn schneidet, immer zur gleichen Jahreszeit auf und scheinen an der Sphäre von einem Punkt herzukommen (Radiant oder Ausstrahlungspunkt; Bild 62/1).
Tabelle 4 gibt einige dieser bekannten Meteorströme an, deren Bezeichnungen von dem Sternbild abgeleitet sind, aus dem sie zu kommen scheinen.
Die planetarischen Meteoriten stammen wahrscheinlich aus dem System der Planetoiden. Die kleinste Gruppe scheint die der interstellaren Meteoriten zu sein, die aus dem Raum außerhalb des Sonnensystems stammen.

2.6.3. Staub und Gas im interplanetaren Raum

Daß der interplanetare Raum von Staubpartikeln erfüllt ist, die wegen ihrer Herkunft aus dem Bereich der Planetoiden ebenfalls die Hauptebene des Planetensystems bevorzugen, kann man im Hochgebirge in jeder sternklaren Nacht erkennen; längs der Ekliptik zieht sich ein schwachleuchtendes Band, das im Gegenort der Sonne schwach, zu beiden Seiten der Sonne jedoch erheblich verbreitert ist. Man nennt diese Erscheinung nach ihrer Lage am Himmel das Zodiakal- oder Tierkreislicht.

Im Flachland kann man das Tierkreislicht im allgemeinen nur im Frühjahr am westlichen Abendhimmel und im Herbst am östlichen Morgenhimmel nach Ende bzw. vor Beginn der Dämmerung sehen, wenn man einen vor irdischen Lichtquellen geschützten Beobachtungsort aufsucht.

Das Leuchten entsteht durch Streuung des Lichtes der unterhalb des Horizontes befindlichen Sonne an den Staubpartikeln. Außer den Staubmassen befinden sich im interplanetaren Raum auch Protonen, Elektronen, Atome und Moleküle. Die chemische Analyse der Meteoriten hat ergeben, daß sie sich aus chemischen Elementen zusammensetzen, die auch auf der Erde vorkommen. Das häufigste Element, der Wasserstoff, überwiegt auch im interplanetaren Gas.

2.6.4. Zusammenfassung

Außer den Großplaneten befinden sich noch viele kleinere Körper im interplanetaren Raum. Es sind dies die Planetoiden, die zwischen Mars und Jupiter ein eigenes System bilden, die Kometenkerne, die den Raum bis zur 10000fachen Entfernung des Saturn von der Sonne einnehmen, und die Meteoriten, die teils aus dem System der Planetoiden, teils aus den Resten der ausgedampften Kometenkerne stammen.
Die kleinsten Staubteilchen des interplanetaren Raumes erzeugen in der Strahlung der Sonne das Tierkreislicht, und das von der Sonne abströmende Gas erfüllt den Raum zwischen den Planeten.

2.6.5. Fragen und Aufgaben

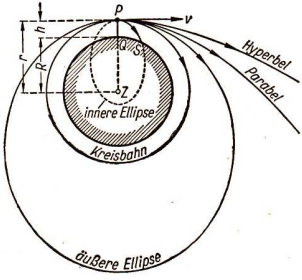
1. In welcher Himmelsgegend und zu welcher Tagesstunde wird man Planetoiden am besten beobachten können?

2. Aus welchen Gründen löst sich der Kern eines Kometen im Laufe der Zeit auf?
3. Erklären Sie anhand einer Skizze, weshalb parallele räumliche Bahnen einen scheinbaren Ausstrahlungspunkt (Radiant) an der Sphäre erkennen lassen!
4. Können Meteore eines Stromes beobachtet werden, wenn sich der Radiant unterhalb des Horizontes befindet?

2.7. Künstliche Erdsatelliten und Raumsonden

2.7.1. Allgemeine Betrachtungen

Die astronomischen Grundlagen der Astronautik liefern das Rüstzeug zur Beantwortung der Frage, unter welchen Umständen bestimmte Möglichkeiten der Bewegung durch den Weltraum für einen vorgegebenen Körper vorhanden sind. Wir betrachten im Bild 64/1 einen ebenen Schnitt durch die kugelförmig angenommene Erde und fragen nach den Bahnformen, die ein im Punkte P befindlicher Körper ausführen kann, wenn er sich in einer Richtung mit der Geschwindigkeit v bewegt, die senkrecht auf der Richtung zum Gravitationszentrum PZ steht. Von den möglichen Bahnen sind hier 6 typische Fälle herausgegriffen.



64/1 Horizontalstartbahnen um einen kugelförmigen Weltkörper (Erde)

Ist die Geschwindigkeit $v = 0$, so durchläuft der Körper die radiale Fallbahn PZ, die allerdings im vorliegenden Beispiel durch das Auftreffen des Körpers im Punkte Q beendet wird. Bei geringer Horizontalgeschwindigkeit bewegt sich der Körper auf einer sogenannten inneren Ellipse, wobei der Startpunkt P das Apogäum darstellt, er fällt auf die Erdoberfläche zu und trifft sie im Punkt S. Mit wachsender Geschwindigkeit rückt der Auftreffpunkt S immer weiter von Q ab. Erreicht die horizontale Abfluggeschwindigkeit des Körpers einen Wert, bei dem die Zentrifugalkraft auf der gekrümmten Flugbahn der zum Erdmittelpunkt gerichteten Gravitationskraft das Gleichgewicht hält, so bewegt sich der Körper auf einer *Kreisbahn* um den Erdmittelpunkt. Diese Geschwindigkeit v_K heißt deshalb Kreisbahngeschwindigkeit oder erste astronautische Geschwindigkeitsstufe. Es gilt, wie hier ohne Beweis mitgeteilt wird,

$$v_K = \sqrt{\frac{k\,M}{r}}\,. \tag{12}$$

Darin bedeutet r die Entfernung vom Erdmittelpunkt, k die Gravitationskonstante und M die Masse der Erde.

Die Tabelle 5 gibt einige Werte für die Kreisbahngeschwindigkeit in verschiedenen Höhen über der Erdoberfläche an.

Tabelle 5: Kreisbahngeschwindigkeiten

Höhe (in km)	Geschwindigkeit (in km · s^{-1})	Höhe (in km)	Geschwindigkeit (in km · s^{-1})
200	7,79	4000	6,20
500	7,62	6371	5,59
1000	7,35	12742	4,57
2000	6,90		

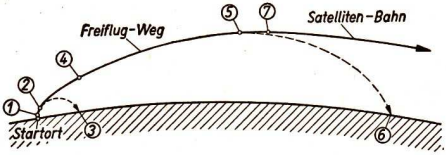
Bei höherer Geschwindigkeit durchläuft der Körper eine der äußeren Ellipsen, bei der *P* das Perigäum ist. Wird die Geschwindigkeit auf das $\sqrt{2}$fache der Kreisbahngeschwindigkeit gesteigert, so öffnet sich die Bahnkurve zu einer *Parabel*, auf der sich der Körper von der Erde über jede Grenze entfernen kann (zweite astronautische Geschwindigkeitsstufe). Bei noch höheren Geschwindigkeiten wird die Bahnkurve zu einem *Hyperbelast.*

Ist der Winkel zwischen der Richtung der Geschwindigkeit und der Verbindungsgeraden zwischen dem Zentrum und dem Körper von 90° verschieden, so gibt es keine Kreisbahn, sondern nur Ellipsen und Hyperbeln, die durch eine Parabel getrennt sind.

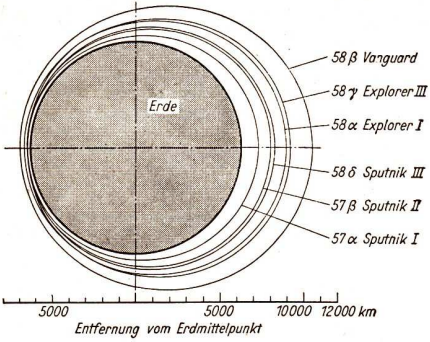
Um einen Körper größerer Masse in den Startpunkt zu befördern und auf die entsprechende Geschwindigkeit zu beschleunigen, bedarf es sehr großer Energiebeträge, die gegenwärtig nur mittels leistungsfähiger, meist mehrstufiger Raketen erreicht werden können. Aus technischen Gründen wird der Körper aber nicht zunächst auf die Starthöhe gebracht und erst danach tangential beschleunigt, sondern längs einer bestimmten Kurve, der Aufstiegsbahn (siehe Bild 65/1), bewegt.

2.7.2. Künstliche Erdsatelliten

Eine schematische Darstellung der Aufstiegsbahn einer dreistufigen Rakete für einen künstlichen Satelliten zeigt Bild 65/1. Die im Punkt *7* erreichte Geschwindigkeit des Flugkörpers nach Größe und Richtung entscheidet im allgemeinen über die Bahn



65/1 Startbahn einer kosmischen Rakete (dreistufig)
1 Ende des Senkrechtaufstiegs, *2* erste Stufe Brennschluß, zweite Stufe zündet; *3* Aufschlag der leeren ersten Stufe auf dem Erdboden; *4* zweite Stufe Brennschluß; *4* bis *5* antriebsloser Flug der Rakete; *5* zweite Stufe löst sich, dritte Stufe zündet; *6* Aufschlag der leeren zweiten Stufe auf dem Erdboden; *7* dritte Stufe Brennschluß, Raumflugkörper löst sich



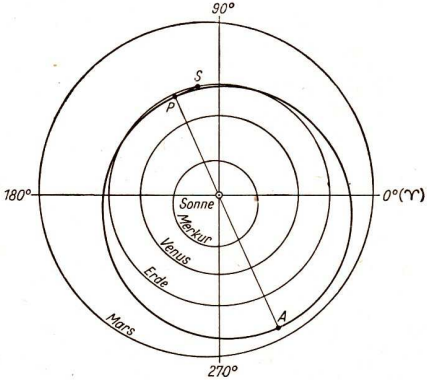
66/1 Die ersten sechs künstlichen Erdsatelliten

der ersten Runden. In der Folgezeit macht sich dann die Bremswirkung der zwar äußerst dünnen, aber bei den hohen Geschwindigkeiten doch spürbaren Ionosphäre bemerkbar. In den dichteren Schichten der Hochatmosphäre wird kurz vor dem Absturz schließlich die gesamte Energie des Flugkörpers in Wärme und Luftströmung umgesetzt, so daß der Körper zum größten Teil verglüht und meist auch von den Luftkräften zerrissen wird.

Da die Dichte der Ionosphäre mit zunehmender Höhe rasch abnimmt, entscheidet die Perigäumshöhe wesentlich über die Lebensdauer des Satelliten.

So sind von den ersten 6 künstlichen Satelliten (Bild 66/1) die tiefsten, nämlich Sputnik I, II und III und Explorer III, längst in der Erdatmosphäre verglüht, wogegen für Explorer I eine Lebensdauer von 5 Jahren, für Vanguard I sogar von über 100 Jahren errechnet wurde.

Beobachten Sie (nach Angaben einer Sternwarte) den Flug eines künstlichen Erdsatelliten!



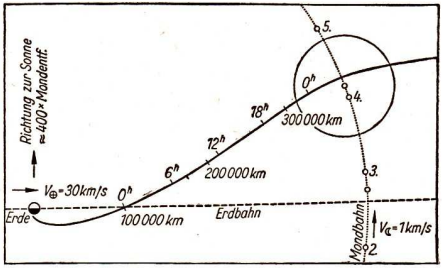
Zur Bahn eines künstlichen Raumflugkörpers (Lunik I)
66/2 Bahn des Raumflugkörpers im Vergleich mit der Bahn der sonnennahen Planeten
S Startpunkt, *P* Perihel, *A* Aphel
67/1 Erster Bahnabschnitt bis zum Durchgang durch den Wirkungsbereich des Mondes
67/2 Scheinbare Bahn des Raumflugkörpers am Sternhimmel

2.7.3. Raumsonden

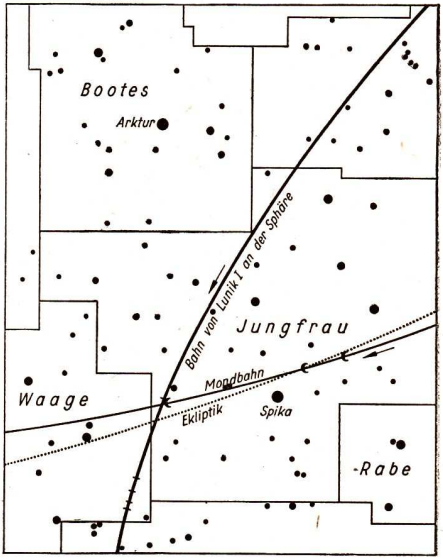
Körper, die eine Brücke von einem Weltkörper zum anderen schlagen sollen, heißen Raumsonden. Um das Besondere ihrer Bahnformen zu verstehen, müssen wir uns klar machen, daß hier drei Körper in Wechselwirkung treten: die beiden in Frage stehenden Weltkörper und die gestartete Raumsonde.

Bei der Bewegung des dritten Körpers spielen die Wirkungsbereiche der beiden anderen Körper eine wesentliche Rolle. Sie sind etwa kugelförmig, der zugehörige Körper steht im Mittelpunkt, und berühren sich im kräftefreien Punkt zwischen den beiden Körpern. Man kann die Bedeutung der Wirkungsbereiche so charakterisieren, daß ein Körper sich in dem Wirkungsbereich eines anderen Weltkörpers so bewegt, als gäbe es sonst keinen weiteren Weltkörper.

Als Beispiel betrachten wir die Bewegung der sowjetischen Raumsonde Lunik I (Bild 66/2, 67/1, 67/2). Der Start erfolgte auf der Nachtseite der Erde (am 2. Januar 1959), die Aufstiegsbahn in Richtung



67/1



67/2

Mond war eine parabelnahe Hyperbel. In der vorletzten Stunde des 3. Januar trat Lunik I in den Wirkungsbereich des Mondes und durchlief ihn in einer entgegengesetzt gekrümmten, langgestreckten Hyperbel. Beim Verlassen des Wirkungsbereiches des Mondes hatte sich, als Folge des nahen Vorbeiflugs, die Bewegungsrichtung merklich geändert. Lunik I blieb noch bis etwa zum 8. Januar im Wirkungsbereich der Erde und trat dann in den Bereich der Sonne, um seine Bahn um die Sonne zu beginnen, in deren Verlauf er etwa Ende August 1959 nahe an die Marsbahn herangelangte.

2.7.4. Die naturwissenschaftliche Bedeutung der astronautischen Experimente und Forschungen

Die Sowjetunion war, bedingt durch den entwickelten Stand der sozialistischen Wirtschaft und das hohe Ausbildungsniveau der Wissenschaftler und Techniker, als erstes Land in der Lage, künstliche Erdsatelliten und Raumsonden in den Kosmos zu entsenden. Außer der UdSSR und den USA haben zunächst keine anderen Länder Raumfahrtexperimente praktisch durchgeführt.
Die bis Mitte des Jahres 1963 erfolgreich gestarteten Raumkörper haben die Zahl 150 bereits überschritten (siehe Tabelle 6 im Anhang). Groß ist die Anzahl der mit ihnen ausgeführten Messungen, beträchtlich auch die Menge der neugewonnenen Informationen. Über 20 verschiedene Typen von Flugkörpern (mit ebensovielen verschiedenen Bezeichnungen) sind eingesetzt worden (siehe Bildbeilage, Tafel VII und VIII sowie Tabelle 6 im Anhang). Die in Angriff genommenen Aufgaben betreffen geophysikalische, astronomische, biologische und technische Probleme. Mit den geophysikalischen Messungen für das Internationale Geophysikalische Jahr (IGJ) begann die praktische Astronautik im Bereiche nahe der Erdoberfläche. Fast gleichzeitig wurden die bereits vorher schon in ballistischen Raketen begonnenen biologischen Experimente mit klarer Zielsetzung für die späteren Weltraumflüge des Menschen in den Gesamtplan einbezogen.
Für die Astronomie bringen die astronautischen Unternehmungen eine große Anzahl neuer und genauerer Informationen. Jeder künstliche Himmelskörper, gleichgültig ob Erdsatellit oder Raumsonde, bringt durch seine Bewegung im Raum unter Umständen die Möglichkeit zu einer genaueren Bestimmung der Eigenschaften der kosmischen Gravitationsfelder. So wird durch Präzisionsbestimmungen der Satellitenbahnen von Bodenstationen aus die Erdgestalt neu vermessen und gleichzeitig die Masseverteilung im Erdinnern erschlossen.

Da die künstlichen Erdsatelliten und Raumsonden im Unterschied zu den natürlichen Körpern des Sonnensystems (Mond, Planeten, Kometen) vielfach sehr kurze Umlaufszeiten haben bzw. ihren Ort an der Sphäre rasch ändern, müssen die Ortungsergebnisse aus verschiedenen Teilen der Erde zur sofortigen Auswertung an eine zentrale Auswertestelle geleitet werden. Ein leistungsfähiges internationales Netz von Beobachtungsstationen ist während des Internationalen Geophysikalischen Jahres geschaffen worden. Ihm gehören auch mehrere Stationen in unserer Republik an.

Führt der Satellit noch Meßgeräte an Bord und ist vorgesehen, daß die Meßwerte durch Funk zu den Bodenstationen gegeben werden, so können Beobachtungen sehr

verschiedener Art durchgeführt werden wie z. B. Bestimmung der Zustandsgrößen der Hochatmosphäre sowie ihrer zeitlichen Änderung; Bestimmung der Intensität, Partikelhäufigkeit und Richtungsverteilung der primären kosmischen Strahlung; Messung des Erdmagnetfeldes; Bestimmung der Häufigkeit der Partikel des kosmischen Staubes und der Mikrometeoriten, der Elementarteilchen innerhalb und außerhalb des Strahlungsgürtels usw.
Durch weiter in den Raum eindringende Körper können ähnliche Messungen auch am Mond und an den Nachbarplaneten durchgeführt werden. So wurde ein großer Teil der uns von der Erde aus unsichtbaren Rückseite des Mondes von Lunik III photographiert und zur Erde durch Bildfunk übertragen und mit Hilfe der Venussonde Mariner 2 die in unmittelbarer Nähe dieses Planeten gewonnenen Messungen der Temperatur, des Magnetfeldes usw. zur Erde gesendet.

Der Vorteil derartiger Untersuchungen liegt vor allem darin, daß bei Beobachtungen von Raumflugkörpern aus der gesamte Wellenlängenbereich der Strahlung zur Verfügung steht und infolge Fehlens der atmosphärischen Bildunruhe das optische Auflösungsvermögen der astronomischen Instrumente erstmalig voll ausgenutzt werden kann. Derartige Beobachtungen sind unabhängig vom Wetter und können jederzeit durchgeführt werden, wenn man dafür sorgt, daß von den drei größten Lichtquellen, der Sonne, der Erde und dem Mond, keine Strahlung in das Instrument gelangt.

Mit Hilfe künstlicher Himmelskörper kann der Mensch nun auch selber physikalische Experimente im interplanetaren Raum ausführen. Ein Anfang in dieser Richtung war z. B. die Natriumwolke von Lunik I, die allerdings in der Hauptsache einen Bahnpunkt markieren sollte. Weitere Experimente sind geplant, so z. B. die Herstellung eines künstlichen Kometen.
Den bisherigen Höhepunkt der astronautischen Unternehmungen stellt das Vordringen des Menschen bis an die Schwelle des extraterrestrischen Raumes dar. Am 12. April 1961 startete als erster bemannter Raumflugkörper das sowjetische Raumschiff Wostok I mit Major J. A. Gagarin an Bord, es landete nach einer Erdumkreisung wohlbehalten am vorausbestimmten Ort.
Bis zum Redaktionsschluß dieses Buches haben bereits zehn Kosmonauten – als erste Frau die Sowjetbürgerin V. W. Tereschkowa – die Erde umrundet.
In Zukunft dürfte für die astronomische Forschung die Raumstation, ein mit wissenschaftlichen Beobachtungsinstrumenten ausgestatteter Satellit, eine Epoche neuer und heute noch nicht abzusehender Fortschritte in der Erkenntnis des Weltalls bringen.

2.7.5. Zusammenfassung

Ein künstlicher Himmelskörper bewegt sich je nach Abfluggeschwindigkeit und Abflugrichtung von der Erde auf einer kreisförmigen, elliptischen, parabolischen oder hyperbolischen Bahn in bezug auf den Erdmittelpunkt. Beschreibt der Körper eine geschlossene Kurve um den Erdmittelpunkt, so sprechen wir von einem künstlichen Erdsatelliten; verläßt er auf einer offenen Bahn den Wirkungsbereich der Erde und vollführt er im Wirkungsbereich der Sonne eine planetarische Bahn, so nennen wir ihn einen künstlichen Planetoiden oder Asteroiden.

Zum Start eines künstlichen Himmelskörpers mit nennenswerter Nutzlast sind sehr große Energiebeträge notwendig.
Flugkörper mit automatisch arbeitenden oder von einer Bodenstation gesteuerten Anlagen, die zu Forschungszwecken in bestimmte Bereiche des kosmischen Raumes gestartet werden, tragen auch die allgemeine Bezeichnung Raumsonden.
Mit Hilfe unbemannter Raumsonden sind, beginnend im Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 mit dem Start des ersten künstlichen Erdsatelliten, des sowjetischen Sputnik I, wichtige Aufschlüsse über die Natur des erdnahen Raumes und der benachbarten Himmelskörper (Mond, Venus) erzielt worden.
Nach sorgfältigen Vorbereitungen wurde am 12. 4. 1961 der erste bemannte Raumflugkörper, das sowjetische Raumschiff Wostok I, gesteuert von Major J. A. Gagarin, auf eine Umlaufbahn um die Erde gebracht.

2.7.6. Fragen und Aufgaben

1. Ein künstlicher Erdsatellit, der in einer Höhe von 35790 km auf einer Kreisbahn die Erde umläuft, benötigt zu einer Umrundung die Dauer einer Erdrotation. Welche Erscheinungen wären von der Erde und vom Satelliten aus zu beobachten, wenn sich ein solcher Satellit über dem Äquator
   a) mit der Erdrotation, b) entgegen der Erdrotation
   bewegen würde?
2. Berechnen Sie die Bahngeschwindigkeit des in der Aufgabe 1 gekennzeichneten Satelliten!
3. Erläutern Sie, welche Kräfte auf einen künstlichen Erdsatelliten von der Zündung der Rakete an bis zum Verglühen des Körpers in der Erdatmosphäre bzw. bis zu seiner Landung auf der Erdoberfläche wirken!

3. Aus der geschichtlichen Entwicklung der Auffassungen über das Sonnensystem

3.1. Die Anfänge der Astronomie

Astronomische Kenntnisse finden wir schon in der Frühzeit der alten Kulturen. Die Erscheinungen von Sonne und Mond, der tägliche Umschwung des Sternhimmels und die hellen Planeten sind so auffällig, daß zumindest eine oberflächliche Vorstellung davon schon bei den urzeitlichen Menschen – Sammlern und Jägern – vorhanden war. Ein tieferer Einblick in die Zusammenhänge der Erscheinungen am Sternhimmel blieb den Menschen auf dieser Stufe der gesellschaftlichen Entwicklung noch verborgen, und das gab mystischen und abergläubischen Deutungen Raum.
Die rationelle Bewirtschaftung der Äcker und Gärten, das Halten der Viehherden erforderten eine möglichst genaue Kenntnis des Zeitablaufs, eines an den Gestirnen orientierten Kalenders. Dafür war ein tieferes Verstehen der Natur der Himmelskörper, eine Unterscheidung zwischen scheinbaren und wahren Bewegungen noch nicht notwendig. Man ging vom Augenschein aus: Im Mittelpunkt steht die scheibenförmig gedachte Erde, die Gestirne erheben sich täglich einmal über den östlichen und versinken wieder am westlichen Horizont.
Von allen Gestirnen ist die Sonne das wichtigste, sie regelt den Rhythmus aller Lebensvorgänge. Der Tag wird damit zur grundlegenden Zeiteinheit. Die Natur reagiert aber noch in einer weit längeren Periode auf den Lauf der Sonne. Die Beziehungen zwischen dieser längeren Periode, dem Jahr, und dem Tag sind aber nicht ohne weiteres überschaubar. Um sie aufzudecken, waren langfristige, systematische Beobachtungen notwendig, die erst auf einer höheren Stufe der gesellschaftlichen Arbeitsteilung – in der Sklavenhalterordnung – möglich geworden sind.
So kamen die Ägypter erst im letzten Jahrtausend vor Beginn unserer Zeitrechnung zu der Erkenntnis, daß ihr angenommenes Jahr von 365 vollen Tagen um einen Vierteltag verlängert werden müsse, eine Erkenntnis, die JULIUS CAESAR seiner Reform des römischen Kalenders zugrunde legte.
In Babylonien benutzte man das zweite große Gestirn, den Mond, für eine Unterteilung des Jahres. Hier gründete man die Zeitrechnung auf den Monat, dessen Beginn durch die Beobachtung der erstmals wieder am westlichen Abendhimmel sichtbar werdenden Sichel des zunehmenden Mondes bestimmt wurde. 12 Mondmonate von abwechselnd 29 und 30 Tagen sind aber erst 354 Tage, während ein Sonnenumlauf $365^1/_4$ Tage währt.

Bis ins 5. Jahrhundert v. u. Z., in Rom bis zu JULIUS CAESAR, half man sich mit einer Bedarfsschaltung, d.h. man schob einen 13. Monat ein, wenn der Jahresanfang nach 2 bis 3 zwölfmonatigen Jahren sich merklich gegen den Sonnenstand bzw. gegen den Rhythmus der Vegetationszeiten verschoben hatte. Im 5. Jahrhundert v. u. Z. gelang es in Babylonien und etwa gleichzeitig in Griechenland, einen brauchbaren ständigen Schaltzyklus zu finden: Man verteilte über je 19 Sonnenjahre 7 Jahre mit 13 und 12 Jahre mit 12 Mondmonaten von 29 bzw. 30 Tagen Länge.

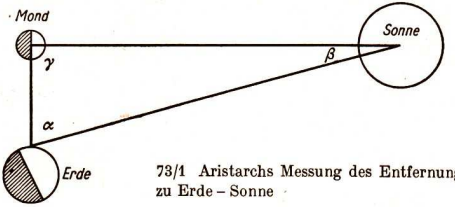
Auch in seinen früheren noch unvollkommenen Formen ermöglichte der Kalender die Aufzeichnung anderer auffallender astronomischer Erscheinungen: der größten Elongation der inneren Planeten und der Opposition der äußeren Planeten sowie der Sonnen- und Mondfinsternisse.
Aus solchen über Jahrhunderte fortgeführten Aufzeichnungen fand man schon früh die synodischen Umlaufszeiten der Planeten, die eine schon recht genaue Vorhersage der Stellungen der Planeten am Himmel ermöglichten. Aus den Finsternisbeobachtungen leiteten die Babylonier und die Chinesen wahrscheinlich schon im 2. Jahrtausend v. u. Z. die Finsternisperiode von etwa 18 Jahren und 10 bzw. 11 Tagen ab (siehe Abschnitt 2.4.).

3.2. Die Astronomie im Altertum

Mit der fortschreitenden gesellschaftlichen Entwicklung, mit der Verbesserung der Landwirtschaft, mit dem Aufblühen des Handels und vor allem der Seefahrt gewinnt die Astronomie im antiken Griechenland an praktischer Bedeutung; die Kenntnisse werden umfangreicher und genauer.
Dem griechischen Philosophen und Mathematiker PYTHAGORAS (6. Jh. v. u. Z.) wird die Einsicht zugeschrieben, daß die Erde eine frei im Raum schwebende, rundum bewohnte Kugel ist. Nach seinen Vorstellungen soll sie die Achse des Fixsternhimmels tragen, innerhalb dessen die ebenfalls kugelförmigen Gestirne Mond, Sonne und Planeten kreisen. Diese Auffassung widersprach zwar den damaligen Beobachtungen über den Sonnen- und den Mondlauf nicht, für die Planeten mit ihren zeitweiligen scheinbaren Stillständen und rückläufigen Bewegungen reichte sie aber nicht aus. Auch spätere Versuche, die Bewegungen der Planeten durch ein kompliziertes System von Sphären zu erklären, blieben ohne Erfolg.
Im Gegensatz zu diesen Vorstellungen kam ARISTARCH von Samos (3. Jh. v. u. Z.) zu der Überzeugung, daß die Sonne im Mittelpunkt des Weltsystems stehen müsse, umkreist von der Erde und den am Himmel sichtbaren Planeten.
Ihm standen aber weder hinreichend genaue Beobachtungen noch die mathematischen Hilfsmittel zur Verfügung, um seine aller Überlieferung und dem Augenschein widersprechende Theorie überzeugend beweisen zu können.

Eine andere Leistung ARISTARCHS hat ihre Geltung dagegen behauptet: Er war der erste Mensch, der messend in den Weltraum eindrang. Aus dem Winkelabstand des Mondes im ersten Viertel von der Sonne bestimmte er das Verhältnis der Entfernungen beider Gestirne

von der Erde (Bild 73/1). Er fand den Winkel α zu 87° und, da der Winkel γ bei Halbmond 90° sein muß, den Winkel β zu 3° und berechnete daraus durch ein Näherungsverfahren – die Trigonometrie war noch nicht bekannt –, daß die Sonne 19mal so weit entfernt sein müsse wie der Mond. Das Verfahren ist im Prinzip richtig, doch fand er wegen der Schwierigkeit, ohne Fernrohr bei Tage die genaue Mondgestalt festzustellen, den Winkel α zu klein.



73/1 Aristarchs Messung des Entfernungsverhältnisses Erde – Mond zu Erde – Sonne

Ebenfalls im 3. Jh. v. u. Z. errechnete ERATOSTHENES aus Beobachtungen des höchsten Sonnenstandes in Alexandria und dem 7° südlicher gelegenen Syene (Assuan) die Größe des Erdumfangs zu 250000 Stadien. Das sind etwa 46000 km, eine für damalige Bedingungen recht gute Näherung.
Im 2. Jahrhundert gelang es dem wohl bedeutendsten Astronomen des Altertums, dem meist auf Rhodos lebenden HIPPARCH, die Entfernung des Mondes aus Mondfinsternisbeobachtungen zu 59 Erdradien zu bestimmen (der wahre mittlere Wert ist 60,3).

Dagegen glückte es zunächst nicht, eine befriedigende Theorie für die verwickelte scheinbare Bewegung der Planeten zu finden. Abgesehen vom Festhalten an der zentralen Stellung der Erde glaubte man, daß nur eine gleichförmige Bewegung der Gestirne auf Kreisbahnen der Vollkommenheit des Weltbaus gemäß sei.
Das wurde erst in einer für die Bedürfnisse der Praxis und die Beobachtungsgenauigkeit der damaligen Zeit befriedigenden Weise von dem im 2. Jh. in Alexandria (Ägypten) lebenden griechischen Astronomen PTOLEMÄUS erreicht. Die Lösung, die er in seinem astronomisch-mathematischen Lehrbuch (Megiste Syntaxis, später arabisiert: Almagest) gab, ist trotz der falschen Grundannahme (zentrale Stellung der Erde) sehr beachtenswert.

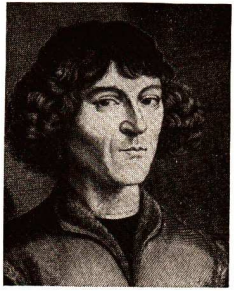
Für die Sonne behielt PTOLEMÄUS die Theorie HIPPARCHS bei (Bewegung um die Erde auf einem exzentrischen Kreis mit gleichbleibender Geschwindigkeit). Den Planeten schrieb er Bahnen auf Kreisen (Epizykel) zu, deren Mittelpunkte sich in exzentrischen Kreisen (Deferenter) um die Erde bewegen. Durch entsprechende Wahl der Radien und Neigungen dieser Kreise gelang ihm eine überraschend gute Darstellung der scheinbaren Planetenbewegungen; das Wesen dieser Bewegung blieb ihm jedoch verschlossen.

Die bedenklichen Umstände, daß sich die viel größere Sonne um die kleinere Erde drehen und die ferne Fixsternsphäre mit allen zwischen ihr und der Erde befindlichen Gestirnen in einem unvorstellbar rasenden Umschwung täglich einmal um die Erde

rotieren sollte, wurden im Altertum und im Mittelalter nicht als Widersprüche empfunden, zumal die diesbezüglichen physikalischen Gesetze noch unbekannt waren. Was dem ptolemäischen System fast anderthalb Jahrtausende hindurch Anerkennung verschaffte, war einmal die dem Augenschein entsprechende Annahme, daß die Erde im Mittelpunkt der Welt ruhe, und zum anderen die Möglichkeit, aus der Theorie die tatsächlich beobachteten Erscheinungen mit einer den damaligen praktischen Erfordernissen genügenden Genauigkeit zu berechnen. Die Übereinstimmung der Grundvorstellung mit dem biblischen Weltbild hat später bei den Kämpfen um das kopernikanische Weltsystem eine wesentliche Rolle gespielt.

3.3. Das heliozentrische Weltsystem

Die Entwicklung des Handels, vor allem der Schiffahrt ausgangs des Mittelalters erforderte eine immer größere Genauigkeit der astronomischen Messungen und Berechnungen. Das ptolemäische System konnte diese Genauigkeit nicht mehr garantieren, und es ergaben sich daraus Zweifel an den Grundannahmen dieses Systems.
Unter den Astronomen seiner Zeit ragt der polnische Gelehrte Nikolaus Kopernikus (1473 bis 1543) als Bahnbrecher des Neuen weit über seine Zeitgenossen hinaus.
Schon bei seinen ersten astronomischen Studien suchte Kopernikus zunächst in den ihm zugänglichen Schriften des Altertums nach Hinweisen für ein neues, einfacheres Weltsystem, fand aber nur dürftige Andeutungen. Aber bereits diese geringfügigen Hinweise genügten ihm, um zu untersuchen, wie sich die Erscheinungen im Sonnensystem einem irdischen Beobachter darstellen müßten, wenn die Erde zusammen mit den anderen Planeten um die Sonne kreiste. Er fand, daß sich damit nicht nur die zeitweise Rückläufigkeit, sondern auch die wechselnde Helligkeit der Planeten zwanglos erklären ließe. Bereits 1507 war er zu der festen Überzeugung gelangt, daß sich die Erde täglich einmal um ihre gegen die Bahn geneigte Achse dreht, daß sie weiterhin in einem Jahre einmal die Sonne umkreist und daß die übrigen Planeten teils innerhalb der Erdbahn (Merkur, Venus), teils außerhalb mit verschiedener Geschwindigkeit, aber in gleicher Richtung um die Sonne als den gemeinsamen Mittelpunkt laufen.
Kopernikus verwandte mehr als 3 Jahrzehnte seines Lebens darauf, durch sorgfältige Überlegungen, Beobachtungen und Berechnungen seine Theorie bis in alle Einzelheiten durchzuarbeiten. So entstand das Werk „Von den Umlaufbewegungen der Himmelskörper" (De revolutionibus orbium coelestium), das erst in seinem Todesjahr erschien und ein geschlossenes, widerspruchsloses System darbot.



Nikolaus Kopernikus

Allerdings konnte KOPERNIKUS trotz aller Bemühungen noch keine zwingenden Beweise für die Richtigkeit seines Systems beibringen. Dafür reichten die damaligen Erkenntnisse der Naturwissenschaften und die unvollkommene Beobachtungstechnik (vor Erfindung des Fernrohrs!) nicht aus. Die Beweise erbrachte erst eine spätere Zeit.

Die Ideen KOPERNIKUS' bildeten nicht nur den Ausgang für die Entwicklung der Astronomie nach neuen Grundsätzen, sondern leiteten allgemein eine Umwälzung in der Naturerkenntnis ein.

FRIEDRICH ENGELS führt hierzu aus: „Was auf religiösem Gebiet die Bullenverbrennung Luthers, war auf naturwissenschaftlichem des Kopernikus großes Werk, worin er, schüchtern zwar, nach 36jährigem Zögern und sozusagen auf dem Totenbett, dem kirchlichen Aberglauben den Fehdehandschuh hinwarf. Von da an war die Naturforschung von der Religion wesentlich emanzipiert, obwohl die vollständige Auseinandersetzung aller Details sich noch bis heute hingezogen und in manchen Köpfen noch lange nicht fertig ist. Aber von da an ging auch die Entwicklung der Wissenschaft mit Riesenschritten..."[3].

Zunächst unternahm die katholische Kirche nichts gegen die neue Lehre. Die im Jahre 1582 durch Papst GREGOR eingeführte Kalenderreform stützte sich sogar auf Berechnungen, denen das neue System zugrunde lag. Erst ein halbes Jahrhundert nach dem Tode KOPERNIKUS' setzte von den christlichen Kirchen die Verfolgung ein. Die katholische Kirche wollte ihre durch die Reformation erschütterte Vormachtstellung mit allen Mitteln wieder festigen und sah in der heliozentrischen Lehre eine gefährliche Bedrohung ihrer Dogmen, aber auch die protestantischen Eiferer suchten die Autorität der Bibel, auf die sie sich vor allem stützten, gegen alle freieren Bestrebungen des erstarkenden Bürgertums zu verteidigen.

Nachdem die katholische Kirche im Jahre 1600 den ehemaligen Mönch GIORDANO BRUNO wegen seiner Lehre von der Vielheit der Welten als Ketzer zum Feuertod verurteilt hatte, wagte sie sich auch an den größten italienischen Gelehrten jener Zeit, GALILEO GALILEI (1564 bis 1642), heran.

Galileo Galilei

GALILEI war ein leidenschaftlicher Verfechter der kopernikanischen Lehre. Solange er in Padua, im Schutze der unabhängigen Republik Venedig blieb, war er vor der wachsenden Feindschaft seiner klerikalen Gegner sicher, aber als er 1610 nach Florenz ging, begann das Kesseltreiben gegen ihn. Als er außerdem im gleichen Jahr durch seine ersten Beobachtungen mit dem neu erfundenen Fernrohr die Jupitermonde und die Phasen der Venus entdeckte und als Belege für die Richtigkeit der kopernikanischen Lehre auswertete, denunzierten seine Gegner ihn beim Vatikan als Ketzer. Eine daraufhin eingesetzte Kommission gab ein Gutachten ab, aus dem hier nur ein Satz zitiert sei: „Behaupten, die Sonne stehe unbeweglich im Zentrum der Welt, ist absurd, philosophisch falsch und förmlich ketzerisch, weil ausdrücklich der Heiligen Schrift zuwider". Auf

[3] F. Engels: Dialektik der Natur. Dietz Verlag, Berlin 1961. Seite 260.

Grund dieses Gutachtens wurden alle Schriften, in denen die neue Lehre vertreten wurde, „verboten, verdammt und suspendiert". 1632 veröffentlichte GALILEI seinen berühmten „Dialog" (Discorsi), in dem er einen Anhänger des geozentrischen Systems mit zwei Verfechtern der kopernikanischen Lehre disputieren läßt und, ohne es ausdrücklich zu betonen, durch die besseren Argumente der letzteren die neue Lehre verficht.
Das Buch wurde im gleichen Jahr verboten und sein Autor 1633 vor das Inquisitionstribunal nach Rom zitiert. Unter Androhung schwerster Strafen wurde ihm völliges Stillschweigen über das Verfahren geboten, das damit endete, daß er kniend die „Abschwörungsformel" sprechen mußte. Weder seine Erblindung 1637 noch sein Tod am 8. Januar 1642 beendeten den Haß der Kirche.

Johannes Kepler

Freilich blieben alle Unterdrückungsmaßnahmen gegen GALILEI ohne wirklichen Erfolg, ebenso das Verbot des Buches von KOPERNIKUS, das 1616 ausgesprochen und formell bis 1821 aufrechterhalten wurde.
Fast zur selben Zeit, als in Italien die katholische Kirche versuchte, die Wahrheit zu ersticken, führte der große deutsche Astronom JOHANNES KEPLER (1571 bis 1630) die neue Lehre zum Siege. Durch die drei von ihm entdeckten Planetengesetze beseitigte er die noch vorhandenen theoretischen Mängel des kopernikanischen Systems und zeigte die wahre Struktur des Sonnensystems. Dieser Fortschritt wurde vor allem durch das reiche Beobachtungsmaterial des dänischen Astronomen TYCHO BRAHE (1546 bis 1601) ermöglicht, der 1576 auf der Insel Hven im Sund (bei Kopenhagen) eine Sternwarte gegründet und sie mit Instrumenten ausgestattet hatte, die an Genauigkeit alle früheren weit übertrafen, obgleich er sich ohne das erst um 1609 erfundene Fernrohr behelfen mußte.

Tycho Brahe

Nach dem Tode TYCHOS erhielt KEPLER dessen Aufzeichnungen über die Marsbeobachtungen, aus denen er in jahrelanger mühevoller Arbeit seine ersten beiden Planetengesetze ableitete, die er 1609 in seiner „Neuen Astronomie" (Astronomia nova) veröffentlichte. 1618 fand er sein 3. Gesetz, das die Beziehung zwischen den Entfernungen und den Umlaufszeiten darstellt, und veröffentlichte es 1619 in seiner „Weltharmonie" (Harmonice mundi).

Die Auffindung der Kraft, die die Planeten bewegt, blieb KEPLER noch versagt. Das gelang erst 1666 dem damals 23jährigen Engländer ISAAC NEWTON, einem der größten Naturforscher. Das entdeckte

Gravitationsgesetz veröffentlichte er zusammen mit anderen grundlegenden physikalischen Erkenntnissen im Jahre 1687. Dieses Gesetz erklärte nicht nur die Bewegung der Planeten um die Sonne, sondern auch die „Störungen", die sie durch gegenseitige Anziehung erleiden. Es liefert die theoretischen Grundlagen nicht nur für die exakte Berechnung der Planetenbewegungen, sondern ermöglichte auch die Auffindung von vorher nicht beobachteten Gestirnen (Neptun, Pluto, Siriusbegleiter).

Die auf dem Gravitationsgesetz beruhende Theorie der Mond- und Planetenbewegung wurde im 18. und 19. Jahrhundert vor allem durch französische Mathematiker und gegen Ende des 19. Jahrhunderts durch S. Newcomb vollendet.

3.4. Die Erweiterung der astronomischen Kenntnisse bis zur heutigen Zeit

Kepler hatte mit seinen jahrzehntelangen Berechnungen alle Informationen herausgeholt, die in den Beobachtungen Tychos enthalten waren. Mit diesen Beobachtungen war aber die Grenze der Leistungsfähigkeit eines guten Auges erreicht. Zu dieser Zeit war die Entwicklung der materiellen Produktion soweit vorangeschritten, daß – vor allem entsprechend den Bedürfnissen der Navigation – neue Instrumente für die optische Beobachtung geschaffen werden konnten. So brachte die Erfindung des Fernrohrs um 1609 eine ungeahnte Steigerung der Beobachtungsleistungen. Schon 1610 fand Galilei mit einem nach dem Prinzip des heutigen Opernglases konstruierten („galileischen") Fernrohr die Jupitermonde, die Gebirgsnatur der Mondoberfläche und die Phasen der Venus. 1611 beschrieb Kepler die Wirkungsweise eines aus 2 konvexen Linsen zusammengesetzten Fernrohrs, das vor allem in der Vergrößerungsfähigkeit das galileische Fernrohr weit übertraf und schon von 1613 an, als Scheiner damit seine Sonnenfleckenbeobachtungen begann, als astronomisches Fernrohr die ältere Form gänzlich verdrängte (Bild 78/1). Der Holländer Huygens erkannte damit um die Mitte des Jahrhunderts die Natur des Saturnrings, fand den hellsten Saturnmond und die Rotationsdauer des Mars, Hevel zeichnete die erste, viele Einzelheiten enthaltende Mondkarte, Cassini fand vier weitere, schwächere Saturnmonde.

Seinen größten Wert für die theoretische Astronomie erlangte das Fernrohr aber erst, als es von 1667 an Stelle der bis dahin benutzten Diopter mit den Kreisen der astronomischen Meßinstrumente verbunden wurde. Bald nach Beginn des folgenden 18. Jahrhunderts war man imstande, Beobachtungen mit einer Genauigkeit von etwa 1 Bogensekunde anzustellen, während die Genauigkeitsgrenze von Messungen ohne Fernrohr bei 1 Bogenminute lag. Da das Verhältnis der Planetenentfernungen im Sonnensystem bekannt war, genügte es, die Entfernung eines Planeten von der Erde zu messen, um daraus die wahren Dimensionen des Planetensystems zu berechnen.

Im Jahre 1673 fand der dänische Astronom Olaf Römer aus den Abweichungen der Zeiten der Jupitermondverfinsterungen, die der Entfernung Jupiters von der Erde proportional waren, daß das Licht für seine Ausbreitung eine gewisse Zeit

78/1 Ein Fernrohr des 17. Jahrhunderts

braucht. Er berechnete, daß die Lichtgeschwindigkeit etwa 10000mal so groß ist wie die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn, was mit den heute angenommenen Erdbahndimensionen auf etwa 300000 km $\cdot$ s^{-1} führt.

Mit den verbesserten Instrumenten hoffte man auch, endlich die durch die Bewegung der Erde um die Sonne verursachte Parallaxe der Fixsterne auffinden zu können. In der Tat fand um 1727 der englische Astronom BRADLEY eine jährliche Verschiebung der Fixsterne aus ihrer mittleren Stellung um fast $\pm 21''$, die er anfänglich für die gesuchte Parallaxe hielt. Da aber alle Sterne die gleiche Verschiebung zeigten und die Maxima dann eintraten, wenn die Längendifferenzen der Sterne von der Sonne 0° bzw. 180° betrugen (bei der Parallaxe sind die Maxima bei Längendifferenzen von 90° zu erwarten), erkannte er, daß es sich um eine Folge der endlichen Lichtgeschwindigkeit handelte, die sogenannte Aberration des Lichts. Die Größe der Aberration von $20''.7$ führt wieder auf eine Lichtgeschwindigkeit vom 10000fachen der Erdgeschwindigkeit. Damit war ein wesentlicher Nachweis für die Wahrheit des kopernikanischen Systems erbracht. Die Parallaxen selbst wurden erst im 19. Jahrhundert gefunden, ihre Kleinheit ($<1''$) erforderte eine nochmalige erhebliche Steigerung der Beobachtungsgenauigkeit.

Die Fernrohre der ersten 150 Jahre hatten einfache Linsen, die infolge der chromatischen Aberration farbige Säume um helle Objekte zeigten. Die Beseitigung oder wenigstens Verminderung der chromatischen Aberration gelang zuerst um die Mitte des 18. Jahrhunderts dem Engländer DOLLOND. Aber seine Objektive waren noch klein. Erst JOSEPH FRAUNHOFER (1787 bis 1826) brachte die Glasschmelztechnik und die Berechnung der Objektive auf eine Höhe, die dann in stetiger Weiterentwicklung den Bau großer, optisch einwandfreier Refraktoren bis zu 1 m Objektivdurchmesser ermöglichte.

Die Mängel der damaligen Linsenfernrohre veranlaßten den deutschen, aber früh nach England ausgewanderten Astronomen WILHELM HERSCHEL (1738 bis 1822), sich der Konstruktion von Spiegelfernrohren zuzuwenden. 1779 begann er mit selbstgebauten Teleskopen systematische Beobachtungen und entdeckte schon 1781 den Planeten Uranus.

Sein größtes, optisch allerdings mangelhaftes Fernrohr hatte bei 12 m Brennweite einen Spiegeldurchmesser von 125 cm, seine meisten Beobachtungen aber führte er mit einem Teleskop von 50 cm Spiegeldurchmesser durch.

Seine Arbeiten vermittelten erstmals eine Kenntnis der Verteilung der Fixsterne am Himmel und des Sonnenapex, des Zielpunktes der Sonnenbewegung im Raum (siehe Abschnitt 4.2), er entdeckte und beschrieb viele Sternhaufen und Tausende

von Nebelflecken, fand zahlreiche Doppelsterne und konnte bei vielen von ihnen Bahnbewegungen nachweisen. Sein Sohn JOHN HERSCHEL (1792 bis 1872) setzte seine Arbeiten auch am Südhimmel fort.
Im 19. Jahrhundert wurde die Doppelsternforschung hauptsächlich von Vater und Sohn STRUVE (WILHELM, 1793 bis 1864, und OTTO, 1819 bis 1905) an den russischen Sternwarten Dorpat (Tartu, ESSR) und nach 1839 Pulkowo (bei Leningrad) betrieben. In Deutschland ragt WILHELM BESSEL (1784 bis 1846) hervor. Ihm verdanken wir die genaue Bestimmung aller Fundamentalgrößen für die exakte Messung von Sternpositionen, er führte selbst zahlreiche Beobachtungen am Meridiankreis aus und bestimmte die erste zuverlässige Fixsternparallaxe, und zwar für den Doppelstern 61 Cygni. Er fand sie zu 0,″35 (entsprechend einer Entfernung von 2,8 Parsec), ein nur wenig von den neuesten Messungen abweichender Wert. Aus geringen Schwankungen in der Eigenbewegung des Sirius schloß er auf das Vorhandensein eines unbekannten Begleiters. Dieser Siriusbegleiter wurde tatsächlich 16 Jahre nach BESSELS Tod zum ersten Male und am vorausberechneten Ort aufgefunden.
An besonderen Erfolgen der Astronomie des 19. Jahrhunderts sind noch zu erwähnen: die Auffindung der Planetoiden, von denen von 1801 bis 1807 vier, von 1845 bis 1900 fast 500 weitere entdeckt wurden, die Berechnung der Bahn des Neptun durch ADAMS und LEVERRIER und seine Auffindung am berechneten Ort durch GALLE in Berlin 1846, die Entdeckung der Marsmonde durch HALL 1877 und des 5. Jupitermonds durch BARNARD 1892 sowie die Arbeiten von SCHIAPARELLI über den Planeten Mars, durch die das Interesse an der Astronomie in weiten Kreisen geweckt wurde.
Entscheidender für die Erweiterung der astronomischen Erkenntnisse war aber die Einführung neuer Beobachtungsmethoden in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts. Diese Methoden stützen sich vor allem auf Erkenntnisse, die in anderen Bereichen der Wissenschaft gewonnen wurden, insbesondere in Bereichen der Physik, die sich unter dem Einfluß der damals erstarkenden kapitalistischen Produktionsweise zügig entwickelt hatten.
So wurde eine genauere Analyse des Sternlichts durch die Arbeiten von KIRCHHOFF und BUNSEN (1858) ermöglicht, die die Grundgesetze der Spektralanalyse fanden. Jetzt konnten im Spektrum der Sonne und einiger heller Sterne die Linien zahlreicher irdischer Elemente festgestellt und damit die stoffliche Einheitlichkeit der Himmelskörper nachgewiesen werden. Zur vollen Wirksamkeit kam die neue Methode erst rund 3 Jahrzehnte später mit der Einführung der Photographie in die Astronomie.
Zu den bedeutenden Forschern auf astrophysikalischem Gebiet gehört der deutsche Astronom KARL SCHWARZSCHILD (1873 bis 1916), nach dem die Sternwarte mit dem zur Zeit größten Spiegelteleskop in der Deutschen Demokratischen Republik (in Tautenburg bei Jena) benannt ist.
Die stetige Vervollkommnung der photographischen Platten, die Konstruktion besonderer Astrographen, die größere Sternfelder exakt abbilden können, vor allem aber der Bau von Spiegelteleskopen, deren lichtsammelnde Flächen die größten Refraktoren um ein Vielfaches übertrifft, haben uns schließlich in der ersten Hälfte des gegenwärtigen Jahrhunderts die astrophysikalischen Erkenntnisse und die Ein-

sichten in den Bau des Universums gebracht, die in den betreffenden Abschnitten dieses Buches dargestellt werden.

Zu erwähnen ist noch die Verfeinerung der quantitativen Messung des Sternlichts, der Photometrie, durch die Einführung der lichtelektrischen Methode und vor allem die Anwendung der Atomphysik, die Aufschluß über die bis dahin unbekannte Herkunft der Strahlungsenergie der Sterne und den Ablauf der Sternentwicklung gab.
In der neuesten Zeit sind noch zwei leistungsfähige Hilfsmittel der astronomischen Forschung eingesetzt worden, die völlig neue Möglichkeiten erschlossen haben: die Radioastronomie und die künstlichen Himmelskörper.

Die Entwicklung der astronomischen Wissenschaft schreitet unablässig voran und führt zu immer umfangreicheren und tieferen Einsichten in den Aufbau, die Struktur und die Entwicklung des Sonnensystems und der übergeordneten kosmischen Systeme. Gegenwärtig zeichnen sich neue, bedeutende Erkenntnisse über Wesen und Struktur der Materie im Universum ab.
Die astronomische Wissenschaft hängt, wie jede andere Wissenschaft, mit der Produktionsweise der Gesellschaft eng zusammen. Sie erfreut sich besonderer Förderung in allen Ländern der sozialistischen Gemeinschaft, besonders in der Sowjetunion, die über ein ausgedehntes Netz moderner, leistungsfähiger astronomischer Forschungsstätten verfügt.
In der Bewertung, die der astronomischen Wissenschaft durch die Gesellschaft beigemessen wird, spiegelt sich auch die große Rolle dieser Wissenschaft bei der Entwicklung der Weltanschauung der Menschen wider. Nicht zufällig versuchen reaktionäre Kreise in den kapitalistischen Staaten, die Ergebnisse der Astronomie unwissenschaftlich auszudeuten und abergläubische Vorstellungen, z. B. die Astrologie, zu nähren.
Zusammengefaßt betrachtet, hat die Astronomie in ihrer historischen Entwicklung zwingend nachgewiesen, daß die kosmische Materie objektiven, ihr innewohnenden Gesetzmäßigkeiten folgt; sie hat gezeigt, daß alle beobachteten Zustände und Vorgänge im Kosmos aus diesen Naturgesetzen erklärbar sind.

3.5. Fragen und Aufgaben

1. Wodurch ist das geozentrische Weltsystem des Ptolemäus gekennzeichnet? Wie ist seine Entstehung historisch zu erklären?
2. Weshalb konnten die entscheidenden Beweise für die Richtigkeit des heliozentrischen Systems zu Zeiten Kopernikus' noch nicht erbracht werden?
3. Erläutern Sie, inwiefern die Entdeckung der Spektralanalyse von entscheidender Bedeutung für die astronomische Forschung von der Mitte des 19. Jahrhunderts an war!
4. Wieso ist der Schluß berechtigt, daß Radioastronomie und Forschungen mittels Raumsonden neue wesentliche astronomische Erkenntnisse versprechen?

4. Das Milchstraßensystem und das Weltall

4.1. Sterne und interstellare Materie

4.1.1. Die scheinbare Helligkeit der Sterne

Seit alters her werden die Sterne nach der Helligkeit unterschieden, in der sie einem Beobachter auf der Erde erscheinen. Schon im Altertum wurden die hellsten Sterne als Sterne 1. Größe bezeichnet; die schwächsten Sterne, die mit normalem bloßem Auge gesehen werden können, sind Sterne 6. Größe (s. Abschnitt 1.1.). Diese grobe Einteilung erwies sich jedoch in neuerer Zeit als zu ungenau für die astronomische Forschung; man kam überein, eine exakte Maßeinheit für die Sternhelligkeit zu schaffen und außer ganzzahligen Werten auch gebrochene (dezimal geteilte) Werte zuzulassen.
Es wurde festgesetzt, daß der Helligkeitsunterschied von 5 Größenklassen einem Verhältnis der Strahlungsintensitäten von 1 : 100 entsprechen soll; ein Stern 1. Größe hat nach dieser Festsetzung die 100fache Helligkeit eines Sterns 6. Größe. Demgemäß entspricht ein Helligkeitsunterschied von 1 Größenklasse (Bezeichnung 1^{m}) dem Intensitätsverhältnis von $1 : \sqrt[5]{100} \approx 1 : 2{,}512$.

Begründen Sie diese Aussage!

Bedeuten I_1 und I_2 die Strahlungsintensitäten zweier Sterne, so ist

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{1}{\sqrt[5]{100}}\right)^{m_1 - m_2}. \tag{13}$$

Durch Logarithmieren ergibt sich daraus, weil $\lg \sqrt[5]{100} = \frac{2}{5} = 0{,}4$ ist,

$$m_1 - m_2 = \frac{1}{-0{,}4} \lg \frac{I_1}{I_2} = -2{,}5 \lg \frac{I_1}{I_2}. \tag{13a}$$

Die Helligkeit eines Sterns, die von einem Beobachter auf der Erde aus gemessen oder geschätzt wird, heißt *scheinbare Helligkeit m.*
Über den Nullpunkt der Helligkeitsskala wurde vereinbart, daß die scheinbare visuelle (d.h. der Farbempfindlichkeit des Auges entsprechende) Helligkeit des Polarsterns $m_{\mathrm{vis}} = 2{,}^{\mathrm{m}}12$ sein soll.

Durch diese Festlegungen sollte erreicht werden, daß die neue Helligkeitsskala weitgehend mit der alten Ordnung übereinstimmt.

Nach der gegenwärtigen Helligkeitsskala ergibt sich, daß manche hellen Sterne, die früher unter den Sternen 1. Größe erfaßt waren, Helligkeitswerte kleiner als 1 erhalten. So beträgt z. B. für den Stern Wega (α in der Leier) $m_{vis} = 0{,}^{m}05$, für den Fixstern größter scheinbarer Helligkeit, Sirius (α im Großen Hund), $m_{vis} = -1{,}^{m}43$. Auch für die scheinbare Helligkeit der helleren Planeten sowie des Mondes und der Sonne ergeben sich negative Werte.

Die scheinbare Helligkeit der Sonne beträgt $m_{vis} = -26{,}^{m}9$; das Wievielfache des Sterns Capella (α im Fuhrmann; $m_{vis} = 0{,}^{m}1$) ist das ungefähr?

Wenn gegenwärtig von Sternen 1., 2., ... Größe gesprochen wird, so sind alle Sterne gemeint, deren Helligkeit vom betreffenden Wert der Größenklasse um höchstens $0{,}^{m}5$ nach oben oder unten abweicht; als Sterne 1. Größe gelten also die Sterne mit einer Helligkeit zwischen $0{,}^{m}5$ und $1{,}^{m}5$.

Suchen Sie mit Hilfe einer Sternkarte einige Sterne 1. bis 4. Größe auf und prägen Sie sich die beobachtete Helligkeit ein!
Suchen Sie Sterne auf, die Ihnen gleichhell wie Sterne erscheinen, deren scheinbare Helligkeit Sie kennen, und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den Angaben in einem Sternatlas oder einem Verzeichnis!

Mit Hilfe von Fernrohren ist es möglich, auch schwächere Sterne als 6. Größe visuell zu beobachten. Mit einem Schulfernrohr von 63 mm Objektivöffnung können unter günstigen Bedingungen noch Sterne mit einer scheinbaren Helligkeit von 11^{m} gesehen werden.
Fernrohre, vor allem größere Instrumente, werden gegenwärtig hauptsächlich für photographische Himmelsaufnahmen verwendet. Die photographische Beobachtung hat vor allem folgende Vorteile:
1. Bei längeren Belichtungszeiten werden schwächere Sterne erfaßt als bei visuellen Beobachtungen.
2. Die Aufnahmen enthalten viele Sterne gleichzeitig.
3. Die Platten können als Dokumente aufbewahrt werden.
Viele Forschungsergebnisse werden durch Vergleich alter und neuer Aufnahmen erhalten.
Die Grenze der photographischen Beobachtungsmöglichkeit liegt gegenwärtig etwa bei Einzelsternen mit einer scheinbaren Helligkeit von 23^{m}.

Der wievielte Teil der Helligkeit des Polarsterns ist das ungefähr?

Als Grundlage für die Herstellung von Sternkarten und für statistische Untersuchungen sind *Durchmusterungskataloge* erarbeitet worden. Sie enthalten die Koordinaten (α und δ) und die scheinbaren Helligkeiten nur mit einer Genauigkeit, die zur sicheren Unterscheidung der Sterne ausreicht, dafür sind aber die Angaben vollständig bis zu einer bestimmten Grenzhelligkeit. Die bekannten Sternkarten und Sternatlanten s.nd nach den Angaben in

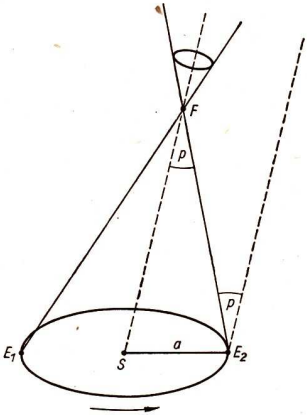
Sternkatalogen gezeichnet und vervielfältigt. In neuester Zeit gibt es auch Atlanten, deren Blätter Reproduktionen von photographischen Himmelsaufnahmen sind (Beilage, Tafel IX).

Die Zahl der mit bloßem Auge sichtbaren Sterne wird oft falsch geschätzt. Die Gesamtzahl der Sterne bis zur 6. Größe beträgt ungefähr 6000. Davon befindet sich etwa die Hälfte unter dem Horizont, außerdem sind in Horizontnähe die schwächeren Sterne infolge der atmosphärischen Lichtabsorption nicht erkennbar. Wir können also etwa 2500 Sterne gleichzeitig am Himmel sehen.

4.1.2. Parallaxe und Entfernung

Durch die Bewegung der Erde in ihrer Bahn um die Sonne sehen wir nach einem bestimmten Fixstern im Laufe eines Jahres von verschiedenen Stellen aus, wir sehen ihn deshalb an verschiedenen Stellen des (angenommenen) Himmelshintergrundes. Dadurch wird eine scheinbare jährliche Bewegung des Sterns auf einer kleinen elliptischen Bahn auf der Himmelskugel hervorgerufen.

Diese Erscheinung können wir uns durch einen einfachen „Modellversuch" anschaulich machen. Blicken wir von einem bestimmten Punkt in einem Zimmer auf eine an der Zimmerdecke hängende Lampe, so sehen wir ihr Bild an einer bestimmten Stelle der Wand oder der Decke. Bewegen wir uns, so scheint sich das Bild der Lampe gegenüber seinem Hintergrund zu bewegen. Beschreiben wir dabei eine geschlossene Kurve, z. B. einen Kreis, so bewegt sich auch das Bild vor seinem Hintergrund in einer geschlossenen Kurve.



83/1 Scheinbare jährliche Bewegung eines angenommenen nahen Fixsterns als Folge der Bahnbewegung der Erde um die Sonne

Zustandekommen und Form der scheinbaren jährlichen Bewegung eines Fixsterns auf der Himmelskugel sind im Bild 83/1 schematisch dargestellt.

Diese parallaktische Verschiebung (vgl. Abschnitt 2.1.) des Sternortes erreicht ihren größten Betrag, wenn die Beobachtungen in gegenüberliegenden Punkten der Erdbahn (E_1 und E_2 in Bild 83/1), also mit einem zeitlichen Abstand von einem halben Jahr, durchgeführt werden.

Wie verläuft die scheinbare jährliche Bewegung für Sterne in der Ebene der Erdbahn (Ekliptik)?

Die große Halbachse dieser scheinbaren jährlichen Bahn eines Fixsterns in Winkelmaß nennen wir die Parallaxe, genauer die *jährliche* oder die *trigonometrische Par-*

allaxe. Sie kann auch definiert werden als der Winkel, unter dem die große Halbachse der Erdbahn a (die Astronomische Einheit) vom Fixstern aus erscheint (siehe Bild 83/1). Die Größe der Parallaxe p ist ein Maß für die Entfernung r des Sterns. Es ist

$$\sin p = \frac{a}{r}. \tag{14}$$

Die Entfernung r, die der Parallaxe $p = 1''$ entspricht, wird *1 Parsec* (pc) genannt. Die Wahl dieser Entfernungseinheit ist vorteilhaft, weil für diese Einheit folgende Zahlenwertgleichung gilt:

$$r = \frac{1}{p}. \tag{15}$$

In Einheiten des metrischen Systems umgerechnet ist $1\ \mathrm{pc} = 30{,}86 \cdot 10^{12}$ km.

Größere Entfernungen werden in *Kiloparsec* ($1\ \mathrm{kpc} = 10^3\ \mathrm{pc}$) oder für Objekte außerhalb des Milchstraßensystems in *Megaparsec* ($1\ \mathrm{Mpc} = 10^6\ \mathrm{pc}$) angegeben.

Als „anschauliche" Maßeinheit wird in der Literatur oftmals das Lichtjahr verwendet. 1 Lichtjahr ist die Strecke, die das Licht im Vakuum während eines tropischen Jahres zurücklegt. Es ist $1\ \mathrm{pc} \approx 3{,}26$ Lichtjahre.
Sorgfältig bestimmte trigonometrische Parallaxen können als zuverlässig betrachtet werden, wenn $p > 0{,}''04$, also $r < 25$ pc ist. Die Bestimmung einer Parallaxe von $0{,}''04$ entspricht der Messung des Winkeldurchmessers eines Zweimarkstücks aus einer Entfernung von 67 km.

4.1.3. Farbe, Spektrum und Spektralklasse der Sterne

Die Sterne zeigen verschiedene Farben; z. B. erscheint Sirius weiß, Capella gelb und Arktur rötlich.

Suchen Sie Fixsterne von auffallenden Farbtönungen am Sternhimmel auf!

Werden von den Sternen photographische Aufnahmen auf unsensibilisierten (d. h. nicht für bestimmte Farben besonders empfindlich gemachten) Platten ausgeführt, dann erscheinen die bläulichen Sterne heller und die rötlichen Sterne dunkler als bei visueller Beobachtung.

Zum Beispiel erscheint bei einer photographischen Aufnahme des Sternbilds Orion auf unsensibilisierter Platte der rote Stern Beteigeuze (α im Orion) schwächer als der bläuliche Stern Bellatrix (γ im Orion); bei visueller Beobachtung ist es umgekehrt.

Bei den gelben und roten Sternen überwiegt die Intensität im langwelligen Teil des Spektrums, bei den bläulichen im kurzwelligen Teil.
Aus diesen Darlegungen folgt, daß Helligkeitsmessungen in verschiedenen Wellenlängenbereichen im allgemeinen zu verschiedenen Ergebnissen führen. Der Helligkeitsunterschied, der sich bei Messungen in zwei Wellenlängenbereichen, d. h. in zwei Farben ergibt, heißt *Farbenindex.* Vereinbarungsgemäß ist der Farbenindex gleich $m_{\text{kurzwellig}} - m_{\text{langwellig}}$.

Die *Spektren* der Sterne lassen sich mittels Spektrographen, die an lichtstarke Fernrohre angesetzt werden, in ihren Einzelheiten untersuchen. Das Spektrum eines Sterns erscheint als helles Band mit den Spektralfarben von Rot bis Violett; es zeigt dunkle Absorptionslinien (siehe Abschnitt 2.2. über das Spektrum der Sonne), mitunter auch helle Emissionslinien.
Die Sternspektren unterscheiden sich durch die Verteilung der Strahlungsintensität in den einzelnen Wellenlängenbereichen sowie durch Lage und Anzahl der Linien (siehe Bildbeilage, Tafel X). Man kann sie in eine Reihe von *Spektralklassen* einordnen. Die wichtigsten Spektralklassen sind:

O B A F G K M.

Jede Spektralklasse wird noch weiter unterteilt, im allgemeinen dezimal (0 bis 9). Die Sonne gehört zur Spektralklasse G 2.
Aus der Energieverteilung im Spektrum läßt sich die Oberflächentemperatur des betreffenden Sterns ermitteln. Die Reihe der Spektralklassen schreitet von höheren Oberflächentemperaturen zu niederen fort (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Spektralklassen der Sterne

Spektralklasse	Farbe	Oberflächentemperatur (im Mittel)	Spektralklasse	Farbe	Oberflächentemperatur (im Mittel)
O	bläulich	25000 °K	G	gelb	5500 °K
B	bläulichweiß	15000	K	rötlichgelb	4000
A	reinweiß	9000	M	rötlich	2800
F	gelblichweiß	7000			

Im Innern der Sterne ist die Temperatur wesentlich höher als an der Oberfläche, sie kann allerdings nicht unmittelbar aus Beobachtungen erschlossen, sondern nur auf Grund physikalischer Theorien errechnet werden. Es wurden Werte von über 1 Million Grad ermittelt.
Die Sternspektren geben Aufschluß nicht nur über die Oberflächentemperatur, sondern auch über die chemische Zusammensetzung der Sterne. Untersuchungen der Linien in den Sternspektren haben gezeigt, daß die relative Häufigkeit der einzelnen chemischen Elemente in den Atmosphären verschiedener Sterne ungefähr übereinstimmt. Das ist ein weiterer Nachweis der materiellen Einheit des Universums.

4.1.4. Leuchtkraft und Spektrum

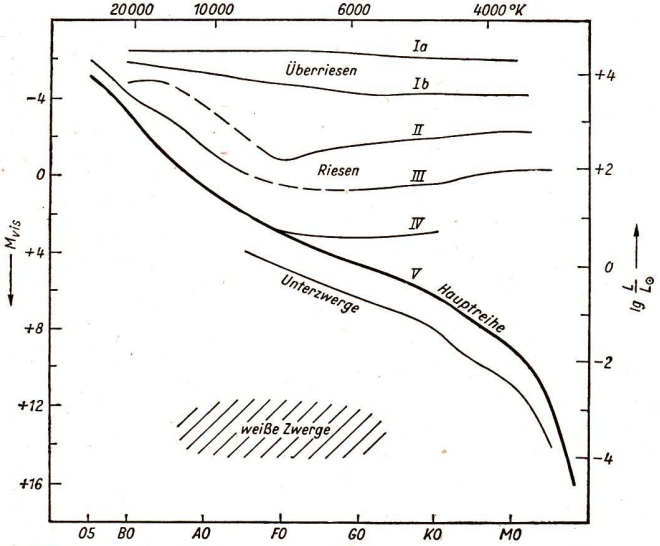
Die scheinbare Helligkeit eines Sterns ist kein Maß für seine Energieausstrahlung, denn nach einem physikalischen Gesetz nimmt die Intensität der Strahlung mit dem Quadrat der Entfernung ab. So können nahe Sterne geringerer Energieausstrahlung

eine größere scheinbare Helligkeit aufweisen als weiter entfernte Sterne mit größerer Energieausstrahlung.

Veranschaulichen Sie sich diesen Zusammenhang mit zwei Glühlampen verschiedener Leistung in verschiedenen Entfernungen!

Um die Sterne nach ihrer Energieausstrahlung vergleichen zu können, ist es notwendig, sie in Gedanken in gleiche Entfernung zu versetzen und danach ihre Helligkeiten zu vergleichen. Für diese Entfernung wurde der Wert 10 pc festgelegt; die scheinbare Helligkeit, in der ein Stern in einer Entfernung von 10 pc zu beobachten wäre, wird *absolute Helligkeit M* genannt. Die absolute Helligkeit M wird wie die scheinbare Helligkeit m in Größenklassen angegeben.
Für einen Stern in 10 pc Entfernung, z. B. Arktur (α im Bootes) oder Pollux (β in den Zwillingen) haben demnach scheinbare Helligkeit und absolute Helligkeit den gleichen Wert.
Die absolute Helligkeit der Sonne beträgt $M_{vis} = 4{,}^{m}7$.

Begründen Sie diesen Zusammenhang nach dem Abstandsgesetz der Lichtausstrahlung! Beachten Sie dabei, daß 1 pc = 206 265 AE ist!



86/1 Hertzsprung-Russell-Diagramm (schematisch)

Die gesamte Energieausstrahlung eines Sterns wird *Leuchtkraft L* genannt. Sie wird meist in Einheiten der Leuchtkraft der Sonne ($L_\odot = 3{,}861 \cdot 10^{23}$ kW, siehe Abschnitt 2.2.) angegeben. Zwischen der Leuchtkraft und der absoluten Helligkeit eines Sterns besteht ein unmittelbarer Zusammenhang. Die Leuchtkraft eines Sterns ist von seiner Temperatur und seinem Radius abhängig.

Somit kann der Radius eines Sterns errechnet werden, wenn seine Leuchtkraft (bzw. seine absolute Helligkeit) und seine Oberflächentemperatur (bzw. sein Spektrum) bekannt sind.

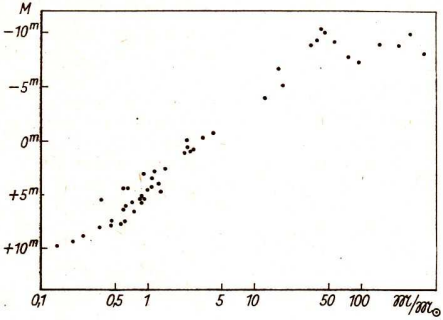
Die Leuchtkraft der Sterne schwankt in einem verhältnismäßig großen Bereich, nach gegenwärtiger Kenntnis etwa zwischen dem 500000fachen und $^1/_{100000}$ der Leuchtkraft der Sonne.
Werden in einem Diagramm als Abszisse die Spektralklassen (bzw. die Oberflächentemperaturen) und als Ordinate die absoluten Helligkeiten (als Maß für die Leuchtkräfte) gewählt, so zeigt sich ein bemerkenswerter gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen diesen Größen. In bestimmten Gebieten dieses Diagramms ergeben sich Konzentrationen, andere Gebiete sind schwächer besetzt oder nahezu leer (Bild 86/1). Es läßt sich in dem Diagramm erkennen, daß Sterne gleicher Spektralklasse (und damit annähernd gleicher Oberflächentemperatur) in Bereichen verschiedener absoluter Helligkeiten auftreten; diese Sterne unterscheiden sich also in ihrer Leuchtkraft. Das im Bild 86/1 dargestellte Diagramm wird nach den Forschern, die diese gesetzmäßigen Zusammenhänge als erste erkannt und untersucht haben, *Hertzsprung-Russell-Diagramm* genannt.
Zur genauen Charakteristik eines Sterns ist, wie aus dem eben Dargelegten hervorgeht, außer der Angabe der Spektralklasse noch die Angabe einer weiteren Größe, der *Leuchtkraftklasse*, erforderlich. Die Leuchtkraftklassen werden mit römischen Zahlzeichen in der Reihe abnehmender Leuchtkräfte angegeben. Die Sonne gehört zur Leuchtkraftklasse V, d.h. sie liegt im Hertzsprung-Russell-Diagramm in der Hauptreihe. Die vollständige Kennzeichnung der Sonne lautet somit G 2 V.

Anstelle der Leuchtkraftklassen sind auch die Bezeichnungen Überriesen, Riesen und Zwerge (Hauptreihensterne) üblich. Diese Bezeichnungen sind gerechtfertigt, da die Leuchtkraft bei konstanter Temperatur mit zunehmendem Radius anwächst.

Aus dem Hertzsprung-Russell-Diagramm geht auch hervor, daß es Sterne verhältnismäßig hoher Oberflächentemperatur, aber sehr geringer Leuchtkraft gibt. Diese Sterne werden *weiße Zwerge* genannt. Sie haben eine außerordentlich hohe Dichte ($\approx 10^5\,\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$), in ihnen bestehen extreme physikalische Zustände, die durch die dichte Packung der Atomkerne bedingt sind.
Aus dem Spektrum eines Sterns kann auch erschlossen werden, welche Schwerebeschleunigung auf der Sternoberfläche herrscht, und damit, in welcher Größenordnung der Durchmesser des Sterns liegt, da auch zwischen Masse und Leuchtkraft eines Sterns ein gesetzmäßiger Zusammenhang besteht (Bild 88/1).
Es ist also möglich, allein aus dem Spektrum die Lage eines Sterns im Hertzsprung-Russell-Diagramm festzustellen, also auch seine absolute Helligkeit zu bestimmen.
Da sich die scheinbare Helligkeit m direkt messen läßt, ergibt sich die Möglichkeit, die Entfernung eines Sterns aus seinem Spektrum zu ermitteln. Einer bestimmten

Differenz $m - M$, dem *Entfernungsmodul*, entspricht eine bestimmte Entfernung, wie die Tabelle 7 zeigt.

Für diesen Zusammenhang läßt sich eine Gleichung aufstellen. Wird in der Beziehung zwischen den Helligkeiten und den Strahlungsintensitäten zweier Sterne [Gleichung (13a)] für m_1 die scheinbare, für m_2 die absolute Helligkeit *desselben* Sterns eingesetzt, so er-



88/1 Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft der Sterne (nach Beobachtungen)

gibt sich – nach dem photometrischen Entfernungsgesetz – anstelle des Quotienten der Intensitäten I_1 und I_2 der reziproke Quotient der Entfernungsquadrate. Wird die wahre Entfernung r des Sterns in Parsec gemessen, so gilt, da 10 pc die Bezugsentfernung für die absolute Helligkeit ist, die Zahlenwertgleichung

$$m - M = -2{,}5 \lg \frac{10^2}{r^2} = -5 \lg \frac{10}{r} = -5 + 5 \lg r. \qquad (16)$$

Daraus läßt sich bei bekanntem Entfernungsmodul die Entfernung berechnen, aber auch bei bekannter Entfernung aus der scheinbaren Helligkeit m die absolute Helligkeit M.

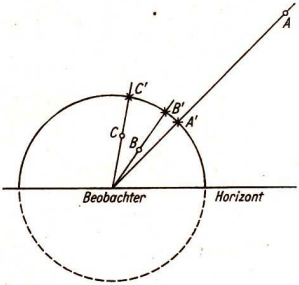
Tabelle 7: Entfernungsmodul und Entfernung

Entfernungsmodul $m - M$	Entfernung (in Parsec)	Parallaxe (in Bogensekunden)	Entfernungsmodul $m - M$	Entfernung (in Parsec)	Parallaxe (in Bogensekunden)
−5	1,0	1,0	1	16	0,063
−4	1,6	0,63	2	25	0,040
−3	2,5	0,40	3	40	0,025
−2	4,0	0,25	4	63	0,016
−1	6,3	0,16	5	100	0,010
0	10,0	0,10	10	1000	0,001

Mit Hilfe des Entfernungsmoduls bestimmte Parallaxen gehören zu den *photometrischen Parallaxen*, man nennt sie, da sie aus dem Spektrum ermittelt werden, *spektroskopische Parallaxen.*
Die besondere Bedeutung dieser Art Entfernungsbestimmung liegt darin, daß ihre Anwendung nicht auf die nähere Umgebung des Sonnensystems beschränkt ist, wie wir es bei den trigonometrischen Parallaxen kennengelernt haben.

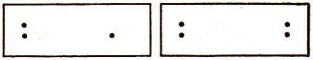
4.1.5. Doppel- und Mehrfachsterne

Die räumliche Anordnung der Sterne ist bei direkter Beobachtung oder bei Betrachtung photographischer Himmelsaufnahmen nicht zu erkennen. Alle Sterne erscheinen uns, als ob sie auf eine Fläche, die Oberfläche der Himmelskugel, projiziert wären.



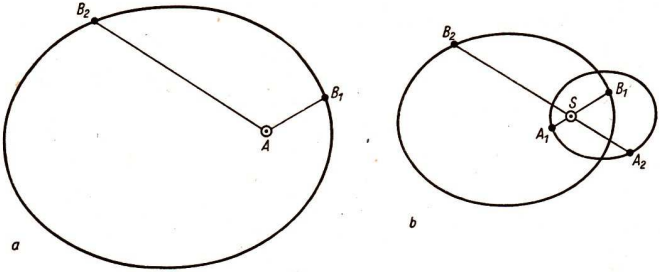
89/1 Winkelabstand und räumliche Entfernung der Sterne

Es kommt vor, daß zwei Sterne scheinbar nahe beieinander stehen, während sie in Wirklichkeit verschiedene Entfernung haben, also räumlich weit getrennt sind (Bild 89/1).
Es gibt aber auch viele Sternpaare, in denen zwei Sterne wirklich so nahe benachbart sind, daß sie unter der Wirkung der gegenseitigen Anziehung stehen. Das sind



89/2 Stabile Lagen der Komponenten eines Mehrfachsterns

physische Doppelsterne. Mehrfachsterne mit mehr als zwei Komponenten sind nur dann für lange Zeit (in kosmischem Maßstab) stabil, wenn die gegenseitigen Entfernungen teils klein, teils groß sind (Bild 89/2).
Man spricht von *visuellen Doppelsternen*, wenn im Fernrohr beide Komponenten zu sehen sind. Einer der Sterne kann als ruhend betrachtet und die scheinbare relative Bahn des anderen Sterns gemessen werden (Bild 90/1a); in Wirklichkeit beschreiben beide Sterne Bahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt (Bild 90/1b).
Falls wir nicht zufällig senkrecht auf die Bahnebene eines Doppelsterns sehen, bewegt sich jeder der Sterne in einem Teil seiner Bahn auf uns zu, in einem anderen Teil der Bahn von uns weg. Jede Bewegung zwischen Lichtquelle und Beobachter in radialer Richtung (in Richtung der Sehlinie) führt nach dem Dopplerschen Prinzip zu einer Änderung der Wellenlängen im Spektrum, die meßbar ist als Verschiebung der Spektrallinien. Die Größe der Verschiebung ist proportional der Radialgeschwindigkeit.

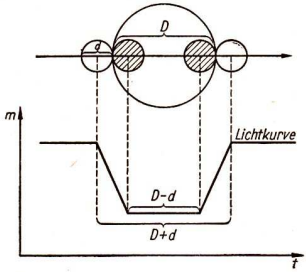


90/1 a) Relative Bahn der schwächeren Komponente eines Doppelsterns um die ruhend angenommene hellere Komponente, b) wahre Bewegung der Komponenten A und B um den gemeinsamen Schwerpunkt S

Sehr enge Doppelsterne unterscheiden sich im Aussehen nicht von einfachen Sternen. Man erhält auch nur *ein* Spektrum. Die periodischen Linienverschiebungen bleiben aber meßbar. In diesem Fall spricht man von *spektroskopischen Doppelsternen.*

Wenn die Bahnebene eines Doppelsterns zufällig so liegt, daß die Sehlinie einen sehr kleinen Winkel mit ihr bildet, kommt es zu gegenseitigen Bedeckungen der Sterne. Dabei wird die scheinbare Helligkeit vermindert, wie es in Bild 90/2 schematisch gezeigt wird.

Der Doppelsterncharakter wird also hierbei aus Helligkeitsmessungen erkannt. Solche photometrischen Doppelsterne sind bekannt als *Bedeckungsveränderliche.* Bild 90/2 macht auch verständlich, daß aus einer genauen Lichtkurve (Helligkeitsänderung während eines Umlaufes der Komponenten) die Größe der Radien der beiden Sterne abgeleitet werden kann.



90/2 Schematische Darstellung einer zentralen Bedeckung und eines Teils der Lichtkurve für einen Bedeckungsveränderlichen (t ist die Zeit, m die scheinbare Helligkeit)

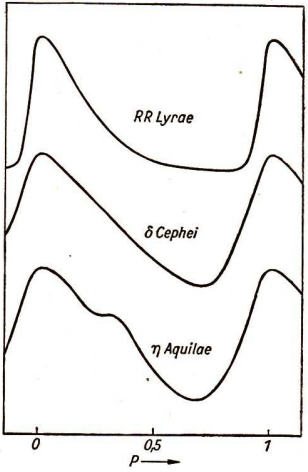
4.1.6. Veränderliche Sterne

Bei den Bedeckungsveränderlichen entsteht der Lichtwechsel durch die gegenseitige Bedeckung. Die Strahlungsintensität der an diesem Vorgang beteiligten Sterne bleibt

konstant. Im Gegensatz dazu treten bei den *physisch veränderlichen Sternen* Änderungen der Temperatur, der Leuchtkraft und anderer Größen auf. Man unterscheidet verschiedene Gruppen von Veränderlichen. Die meisten werden nach typischen Sternen benannt.

Unter den Riesen- und Überriesensternen gibt es Veränderliche mit periodischen Schwankungen der Helligkeit, der Temperatur (also auch der Spektralklasse) und der Radialgeschwindigkeit, die weitgehend damit erklärt werden können, daß der Stern sich periodisch ausdehnt und zusammenzieht. Der Lichtwechsel ist hauptsächlich eine Folge der Temperaturänderungen.

Die wechselnde Größe der Oberfläche trägt auch zur Änderung der Helligkeit bei. Die Änderung des Radius, die sich aus der Radialgeschwindigkeitskurve berechnen läßt, erreicht etwa 10% des Radius.



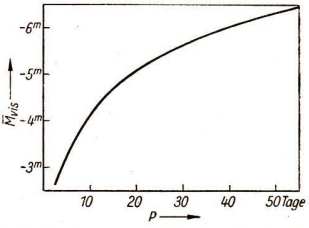
91/1 Typische Lichtkurven für einen RR-Lyrae-Stern und für zwei δ-Cephei-Sterne

Diese pulsierenden Veränderlichen (siehe Bild 91/1) werden nach der Länge der Periode (P) eingeteilt in *RR-Lyrae-Sterne* ($P < 1$ d), *δ-Cephei-Sterne* ($1\,\mathrm{d} < P < 50\,\mathrm{d}$) und langperiodische oder *Mira-Ceti-Sterne* ($P > 100$ d). Bei der letzten Gruppe verlaufen die langsamen Schwankungen nicht streng periodisch.

Besonders wichtig ist das Bestehen einer Beziehung zwischen der Periode und der Leuchtkraft bei den δ-Cephei-Sternen (Bild 91/2).

Helligkeitsmessungen ergeben die mittlere scheinbare Helligkeit und die Periode des Lichtwechsels, aus der nach Bild 91/2 die absolute Helligkeit erhalten wird. So können Parallaxen von δ-Cephei-Sternen bestimmt werden, und zwar bis in große Entfernungen wegen der hohen Leuchtkräfte dieser Sterne.

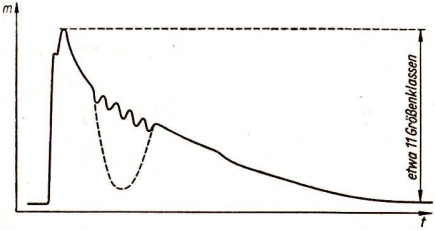
Es gibt noch zwei Gruppen von Veränderlichen, die für kurze Zeit große absolute Helligkeit erreichen: die *Novae* und die *Supernovae*.



91/2 Beziehung zwischen der Periode P und der mittleren absoluten visuellen Helligkeit $\bar{M}_{\mathrm{vis}}$ bei δ-Cephei-Sternen

Nova stella heißt neuer Stern. Früher wurden nämlich die plötzlich aufleuchtenden Novae

für neu entstandene Sterne gehalten. Nach Beobachtungen der Helligkeiten, der Radialgeschwindigkeiten und der Änderungen im Spektrum ergibt sich wahrscheinlich folgender Vorgang bei einer Nova: In einem Stern, der im Hertzsprung-Russell-Diagramm (Bild 86/1) unterhalb der Hauptreihe liegt, wird plötzlich ein großer Energiebetrag ($\approx 10^{37}$ Ws) frei. Dadurch wird eine äußere Hülle mit hoher Geschwindigkeit (≈ 1000 km $\cdot$ s^{-1}) abgestoßen. Die Leuchtkraft vergrößert sich dabei mehr als 10000fach. Die absolute (und damit auch die scheinbare) Helligkeit wächst also um mehr als 10^m. Bei den „schnellen" Novae geschieht das in weniger als einem Tag. Die Hülle wird bei weiterer Ausdehnung zunehmend durchsichtig. Die Helligkeit nimmt unter zeitweise starken Schwankungen ab und führt schließlich ungefähr auf den Ausgangswert zurück (Bild 92/1).



92/1 Typischer Verlauf der Helligkeitsänderungen von Novae. Die unterbrochene Linie entspricht einer seltener beobachteten Form der Lichtkurve.

Die abgestoßene Hülle enthält nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtmasse. Bei den gewöhnlichen Novae wird der Stern durch die Explosion nicht wesentlich verändert.
Die viel selteneren Supernovae haben ähnliche Lichtkurven wie die Novae. Sie erreichen im Maximum absolute Helligkeiten bis etwa -16^m. Über die physikalischen Vorgänge bei ihren Ausbrüchen haben wir noch keine sicheren Kenntnisse.

4.1.7. Interstellare Materie

Schon seit längerer Zeit sind unregelmäßig geformte *helle Nebel* bekannt (siehe Bildbeilage, Tafel XI). Die Nebel bestehen aus Gas von sehr geringer Dichte mit einer kleinen Beimischung von Staub. Das Wort „Staub" soll hier kleine feste Teilchen kennzeichnen. Die Staubteilchen reflektieren das Licht von Sternen, die dicht vor dem Nebel oder im Nebel stehen. Das Spektrum eines solchen *Reflexionsnebels* stimmt mit dem Spektrum des beleuchtenden Sterns oder der Sterngruppe überein. Wenn sehr heiße Sterne im Nebel oder in seiner Nähe stehen, regt die energiereiche kurzwellige Sternstrahlung die Gasmassen des Nebels zu eigenem Leuchten an. Das Spektrum eines solchen *Emissionsnebels* zeigt einzelne helle Linien.
Eine interstellare Wolke kann auch erkennbar sein, wenn keine hellen Sterne in ihrer Nähe stehen. Licht wird beim Durchgang durch eine solche Wolke an den Staubteilchen gestreut. Dadurch wird es geschwächt und gleichzeitig verfärbt, und zwar

gerötet. Die „Sternleeren“ zwischen hellen Sternwolken der Milchstraße werden durch nahe lichtschwächende Wolken vorgetäuscht. Bei Rötung des Lichts entspricht der Farbenindex eines Sterns nicht mehr der Spektralklasse.
Untersuchungen über die interstellare Materie haben ergeben, daß im Bereich des Milchstraßensystems viele Wolken mit Durchmessern von etwa 1 pc bis zu einigen 100 pc existieren. Die mittlere Gasdichte ist etwa 10^{-24} g · cm^{-3} (etwa 1 Wasserstoffatom in 1 cm^3). Die Staubdichte ist noch viel geringer. Die interstellaren Wolken bestehen aus den gleichen chemischen Elementen und Atombestandteilen wie die Sterne und die stoffliche Materie des Sonnensystems; dadurch wird die materielle Einheit des Universums beweiskräftig belegt.

4.1.8. Zusammenfassung

Wir beobachten die stoffliche Materie im Weltall konzentriert in den Sternen und dünn verteilt in den interstellaren Wolken. Die Fixsterne sind selbstleuchtende Sterne von der Art der Sonne. Sie werden charakterisiert durch physikalische Zustandsgrößen wie Masse, Radius, Leuchtkraft usw. Zwischen diesen Größen bestehen gesetzmäßige Zusammenhänge. Wir unterscheiden verschiedene Sterntypen.
Doppelsterne und veränderliche Sterne kommen in großer Zahl vor, sie sind keine seltenen Ausnahmefälle. Beobachtungen dieser Objekte tragen wesentlich zu unseren Kenntnissen über die Fixsterne bei.
Die interstellaren Wolken wären für sich allein mit optischen Hilfsmitteln nicht zu beobachten. Das Licht der Sterne ermöglicht, bestimmte Eigenschaften dieser Wolken festzustellen. Die Unterscheidung von Sternen und interstellaren Wolken spricht nicht gegen die Einheitlichkeit der Materie im Weltall. In beiden Formen besteht die stoffliche Materie aus den gleichen chemischen Elementen und Atombestandteilen; sie verhält sich nach den gleichen physikalischen Gesetzen.

4.1.9. Fragen und Aufgaben

1. Ordnen Sie die hellsten Sterne des Großen Bären (die sieben „Wagensterne“) nach ihrer scheinbaren visuellen Helligkeit! (Beobachtung mit bloßem Auge)
2. Welcher Stern des Großen Bären kommt in seiner scheinbaren Helligkeit dem Polarstern am nächsten? (Beobachtung mit bloßem Auge)
3. Die auf trigonometrischem Wege ermittelte Parallaxe des Sterns α Centauri (α im Centauren), eines der uns nächsten Fixsterne, beträgt $0\overset{''}{,}76$. Wie groß ist seine Entfernung in Parsec, in Kilometern und in Lichtjahren?
4. Warum enthalten die Ergebnisse der Sonnenphysik auch Erkenntnisse über physikalische Eigenschaften der Fixsterne?
5. Welche Vorteile bietet die Anwendung der Photographie für verschiedene Untersuchungen über Fixsterne?
6. Charakterisieren Sie die Sterne, die im Hertzsprung-Russell-Diagramm auf dem oberen, auf dem mittleren und auf dem unteren Teil der Hauptreihe liegen!
7. Beschreiben Sie verschiedene Möglichkeiten zur Feststellung interstellarer Wolken!

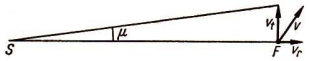
4.2. Das Milchstraßensystem und andere Galaxien

4.2.1. Die Bewegung der Sterne

Die räumlichen Bewegungen der Fixsterne lassen sich in zwei Komponenten zerlegen. Im Bild 94/1 ist S die vorläufig als ruhend angenommene Sonne, F ein Fixstern, der sich mit der Geschwindigkeit v bewegt.
Die räumliche Geschwindigkeit v setzt sich aus der *Radialgeschwindigkeit* v_r und der zu ihr senkrechten *Tangentialgeschwindigkeit* v_t zusammen. Es ist

$$v^2 = v_r^2 + v_t^2 . \tag{17}$$

Die Radialgeschwindigkeit läßt sich aus Verschiebungen der Linien im Sternspektrum gegen ihre Normallage (Dopplereffekt) ermitteln. Die Tangentialgeschwindigkeit wirkt sich in einer Verschiebung der Sterne am Himmel, also in einer Änderung von Rektaszension und Deklination aus. Diese Verschiebung, die *Eigenbewegung*, ist im Bild 94/1 mit μ bezeichnet. Eigenbewegungen werden durch den Vergleich von Sternörtern, die zu verschiedenen Zeiten gemessen wurden, erhalten. Daraus läßt sich die Tangentialgeschwindigkeit v_t berechnen, wenn die Entfernung der Sterne bekannt ist.



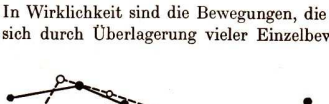
94/1 Zerlegung der räumlichen Geschwindigkeit v in die Radialgeschwindigkeit v_r und die Tangentialgeschwindigkeit v_t. In Wirklichkeit ist v sehr klein im Verhältnis zur Entfernung des Fixsterns (F) von der Sonne (S).

Die größte gemessene Eigenbewegung beträgt 10,″3 je Jahr, für die meisten Sterne liegt der Wert unter 1″ je Jahr. Deshalb werden Änderungen im Aussehen der Sternbilder erst nach sehr langen Zwischenzeiten merklich (Bild 94/2).

Wären die Sterne der Sonnenumgebung ohne Bewegung und bewegte sich das Sonnensystem geradlinig nach einem Zielpunkt, dem Apex, so wären scheinbare Bewegungen der Umgebungssterne zu beobachten, wie sie im Bild 95/1 dargestellt sind. Alle Sterne in der Umgebung des Apex würden scheinbar auf uns zukommen, sie hätten negative Radialgeschwindigkeit.

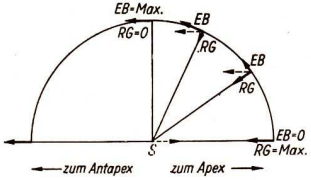
Welche Sternbewegungen wären unter diesen Umständen in der Umgebung des Gegenpunktes, des Antapex, zu beobachten?

In Wirklichkeit sind die Bewegungen, die wir beobachten, komplizierter. Sie setzen sich durch Überlagerung vieler Einzelbewegungen von Sternen und Sterngruppen



94/2 Änderung im Aussehen des als „Großer Wagen" bekannten Teils des Sternbilds Großer Bär durch die Eigenbewegungen. Schwarze Kreise zeigen die gegenwärtigen Sternörter, leere Kreise die Örter in 100 000 Jahren.

zusammen. Die Analyse ergibt, daß sich die Sonne gegenüber den Sternen der Umgebung mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 km · s^{-1} auf einen im Sternbild Herkules liegenden Apex zu bewegt.



95/1 Die Bewegung der Sonne (S) zum Apex spiegelt sich wider in scheinbaren Bewegungen der Sterne der Sonnenumgebung. Die Größe dieser scheinbaren Bewegungen hängt ab vom Winkelabstand der Sterne vom Apex der Sonnenbewegung. EB = Eigenbewegung, RG = Radialgeschwindigkeit.

4.2.2. Offene Sternhaufen und Kugelsternhaufen

Die Sterngruppe der Plejaden, auch Siebengestirn genannt, wird aus den hellsten Sternen eines Sternhaufens gebildet, der einen Durchmesser von 5,3 pc hat und am Himmel unter einem Winkeldurchmesser von etwa 2° erscheint. Er enthält etwa 160 Sterne mit Helligkeiten zwischen 3^m und 14^m. Eine solche lockere Sterngruppierung wird *offener Sternhaufen* genannt (siehe Bildbeilage, Tafel XII/1).

Suchen Sie auf der Sternkarte weitere offene Sternhaufen auf und beobachten Sie geeignete Objekte mit dem Feldstecher oder dem Fernrohr (kleine Vergrößerung)!

Gegenwärtig sind etwa 500 offene Sternhaufen bekannt, von denen jeder einige hundert Sterne in einem Gebiet von etwa 1,5 bis 20 pc Durchmesser enthält. Ein wichtiges Merkmal für die Zusammengehörigkeit der Sterne eines Haufens ist ihre gemeinsame Bewegung im Raum. Es gibt Gruppen von am Himmel weit verstreuten Sternen, deren Zusammengehörigkeit nur durch die gemeinsame Bewegung erkennbar ist.
Kugelsternhaufen (siehe Bildbeilage, Tafel XII/2) enthalten Hunderttausende von Sternen in kugelsymmetrischer Anordnung mit meistens starker Konzentration nach dem Zentrum. Die wahren Durchmesser der Kugelsternhaufen betragen im Mittel etwa 70 pc; die Winkeldurchmesser bleiben im allgemeinen unter 1°.

Suchen Sie mit Hilfe der Sternkarte leicht beobachtbare Kugelsternhaufen am Himmel auf (Fernrohrbeobachtung)!

Offene Sternhaufen kommen nur in der Nähe der Symmetrieebene der Milchstraße vor, sie werden deshalb auch *galaktische Sternhaufen* genannt. Kugelsternhaufen finden sich dagegen in größeren Entfernungen von dieser Ebene.
Das Studium der Sternhaufen liefert wichtige Grundlagen für die Untersuchung des Baues des Milchstraßensystems und für die Sternentwicklung. Die Entfernung eines Sternhaufens läßt sich genauer bestimmen als die Entfernung eines Einzelsterns, und die Sterne eines Haufens haben eine gemeinsame Entstehungsgeschichte.

4.2.3. Das Milchstraßensystem

In dunklen Nächten ist die Milchstraße mit bloßem Auge als schwach leuchtendes, unscharf begrenztes Band von wechselnder Breite zu erkennen. Himmelsaufnahmen zeigen deutlich die Konzentration der schwächeren Sterne in Sternwolken der Milchstraße (siehe Bildbeilage, Tafel XIII). Die Milchstraße folgt in ihrem Verlauf annähernd einem Großkreis auf der Himmelskugel, der gegen den Äquator stark geneigt ist.

Welche Schlüsse können hieraus auf die räumliche Form des Milchstraßensystems gezogen werden?

Zur genaueren Untersuchung der Struktur des Milchstraßensystems sind viele Sternzählungen durchgeführt worden. Die zahlreichen Sterne mit geringer Leuchtkraft können aber nur bis zu Entfernungen von wenigen Parsec wahrgenommen werden; im übrigen wird die Beobachtung weit entfernter Objekte der Milchstraße durch die interstellaren Wolken in der Nähe der Hauptebene dieses Sternsystems erschwert. Das Licht der entfernten Objekte wird durch die Streuung an den Staubteilchen dieser Wolken geschwächt und verfärbt (gerötet).

Untersuchungen über die interstellare Materie selbst liefern aber auch wichtige Aufschlüsse über die Strukturen in der Milchstraße. Vom neutralen Wasserstoff, der reichlich vorhanden ist, geht eine Strahlung von etwa 21 cm Wellenlänge aus. Aus dieser Strahlung, die von Radioteleskopen aufgenommen wird, wurde festgestellt, daß die interstellaren Wolken vorwiegend auf Spiralarmen der Milchstraße liegen. Die Verteilung der Sterne braucht allerdings nicht mit der Verteilung der interstellaren Wolken übereinzustimmen.

Bei den Untersuchungen über Bau und Größe des Milchstraßensystems helfen auch Vergleiche mit ähnlichen, im Ganzen überblickbaren Sternsystemen (siehe Bildbeilage, Tafel XIV und XV).
Im Milchstraßensystem sind die meisten Sterne und die interstellaren Wolken in einer diskusartigen Scheibe von etwa 25 kpc Durchmesser enthalten. Diese Scheibe ist in der Mitte etwa 5 kpc, in der Nähe der Sonne nur noch 1 kpc dick. Die Sonne ist etwa 10 kpc vom Zentrum entfernt. Die Kugelsternhaufen und dünn verteilte Einzelsterne bilden ein nahezu kugelförmiges System von etwa 50 kpc Durchmesser, dessen Mitte das Zentrum der Milchstraße ist. In der Scheibe ist die Materie nicht gleichmäßig verteilt, sondern vorwiegend in Spiralarmen konzentriert.
Die einzelnen Sterne beschreiben Bahnen um das Zentrum der Milchstraße, ähnlich wie die Planeten die Sonne umkreisen. Die Sonne hat in der Bahn um das Zentrum der Milchstraße eine Geschwindigkeit von rund $300\ \mathrm{km} \cdot \mathrm{s}^{-1}$. Ein Umlauf dauert etwa $2 \cdot 10^8$ Jahre, wie sich aus dem Bahnumfang und der Geschwindigkeit ergibt (für eine Kreisbahn).
Die Bewegungsverhältnisse werden durch das Gravitationsgesetz bestimmt. Das gibt Möglichkeiten zur Abschätzung der Gesamtmasse des Milchstraßensystems. Sie wurde zu $2 \cdot 10^{11}$ Sonnenmassen erhalten. Die Zahl $2 \cdot 10^{11}$ kann auch als eine obere Grenze für die Gesamtzahl der Sterne im Milchstraßensystem aufgefaßt werden, weil zwar die meisten Sterne etwas kleinere Masse haben als die Sonne, aber die interstellare Materie wesentlich zur Gesamtmasse beiträgt.

4.2.4. Andere Galaxien

Aus großer Entfernung erscheint ein Sternsystem von der Art der Milchstraße, eine *Galaxis*, als schwaches, verwaschenes Objekt (siehe Bildbeilage, Tafel XIV). Man spricht deshalb auch von *extragalaktischen* (d.h. außerhalb der Milchstraße befindlichen) Systemen. Nach dem Aussehen wird unterschieden zwischen *elliptischen Systemen* (z.B. die beiden Begleiter des Andromedanebels), *Spiralsystemen* (z.B. der Andromedanebel) und *irregulären Systemen* mit unregelmäßiger Struktur (z.B. die Magellanschen Wolken). Aufnahmen relativ naher Systeme außerhalb der Milchstraße mit größten Instrumenten lassen hellste Einzelobjekte (Kugelsternhaufen, Überriesen, Novae im Maximum) erkennen. Das beweist, daß es sich wirklich um Sternsysteme handelt.
In sehr weit entfernten Galaxien können außer den sehr selten aufleuchtenden Supernovae gegenwärtig noch keine Einzelsterne beobachtet werden.

4.2.5. Unendlichkeit des Universums in Raum und Zeit

In der Nähe der Ebene der Milchstraße befinden sich so viele interstellare Wolken, daß der Ausblick auf die entfernten Galaxien versperrt ist. Außerhalb dieses Streifens am Himmel ergaben Zählungen von Galaxien auf großen Flächen eine annähernd gleichmäßige Verteilung. Kleinere Flächen können recht unterschiedliche Nebeldichten zeigen, weil eine deutliche Tendenz zur Bildung von *Gruppen und Haufen von Galaxien* festzustellen ist. Untersuchungen der räumlichen Verteilung haben ergeben, daß diese Verteilung nicht nur durch zufällige Projektionseffekte vorgetäuscht ist. Es gibt Galaxiengruppen mit wenigen Mitgliedern (siehe Bildbeilage, Tafel XVI/1) und Haufen mit Hunderten bis Tausenden von Galaxien verschiedener Größe.
In letzter Zeit ist versucht worden, Systeme noch höherer Ordnung nachzuweisen. Ein solches System, das *Supergalaxis* genannt wird, umfaßt viele Haufen von Galaxien.
Der ganze mit modernen Instrumenten überschaubare Teil des Weltalls wird als *Metagalaxis* bezeichnet. Die Metagalaxis ist kein abgeschlossenes System höherer Ordnung. Sie reicht über die Grenze hinaus, die gegenwärtig durch die Leistungsfähigkeit der Instrumente bestimmt ist. Nichts spricht jedoch dafür, daß eine Grenze des Weltalls besteht. Das Licht ist von dem entferntesten Nebelhaufen, für den zur Zeit Messungen vorliegen, bis zu uns etwa $6 \cdot 10^9$ Jahre unterwegs.
In den Spektren der Galaxien, abgesehen von einigen Mitgliedern der Lokalen Gruppe, tritt eine mit der Entfernung wachsende *Rotverschiebung* auf. Wenn es sich um einen Dopplereffekt handelt, was die nächstliegende Deutung ist, zeigt die Rotverschiebung an, daß die Sternsysteme um so schneller von uns wegeilen, je weiter sie von uns entfernt sind (siehe Bildbeilage, Tafel XVI/2). Es wäre aber falsch, wenn man daraus auf eine zentrale Lage des Milchstraßensystems im Weltall schließen wollte.

Auch diesen Zusammenhang kann man sich durch einen „Modellversuch" veranschaulichen. Wird ein Gummiballon, auf dem Punkte aufgemalt sind, durch Aufblasen vergrößert, so

entfernen sich, von einem beliebigen Punkt aus betrachtet, die anderen Punkte der Oberfläche. Das erläutert die beschriebene Erscheinung der „zentralen Lage" des Beobachters.

Wenn man gleichbleibende Geschwindigkeiten der Expansion annähme und zurückrechnete, ergäbe sich, daß vor etwa 10^{10} Jahren alle Galaxien auf engstem Raum beisammen gewesen sind. In diesem Zusammenhang wird oft fälschlich von einem „Alter des Universums" von 10^{10} Jahren gesprochen. Selbst wenn die – keineswegs durch Beobachtungen gestützte – Annahme von einer gleichbleibenden Expansionsgeschwindigkeit richtig wäre, ließe sich daraus und aus den bekannten physikalischen Gesetzmäßigkeiten vor allem schließen, daß der damalige physikalische Zustand des Universums wesentlich vom heutigen Zustand verschieden war. Unsere gegenwärtigen Kenntnisse würden nicht ausreichen, um die Entwicklung *vor* diesem Zeitpunkt weiter zu verfolgen.

Aus den Erkenntnissen der Physik geht hervor, daß die „Bausteine" der Materie ineinander übergehen und auseinander hervorgehen können. Solche Prozesse gehen im Universum unaufhörlich vor sich. Die Beobachtungen lassen keinen Platz für die Annahme, daß es in der Folge dieser Prozesse einen Anfang gab oder ein Ende geben wird. Aus diesen wissenschaftlichen Erkenntnissen folgern wir die zeitliche Unendlichkeit (Ewigkeit) der Materie und ihrer Bewegung im Universum.

4.2.6. Zusammenfassung

Das Milchstraßensystem, unsere weitere kosmische Heimat, ist ein System von Sternen sowie Gas- und Staubmassen. Verglichen mit anderen Sternsystemen ähnlicher Art (Galaxien) gehört es zu den Riesensystemen, nimmt aber keinerlei Sonderstellung im All ein.

Die Beobachtungen an Galaxien können um so weniger in Einzelheiten gehen, je weiter die Objekte entfernt sind. Trotzdem zeigen die Beobachtungen, daß der ganze gegenwärtig überschaubare Teil des Universums einheitlichen materiellen Aufbau hat und daß die uns bekannten physikalischen Gesetze überall gültig sind. Die wissenschaftlichen Tatsachen sprechen eindeutig für die Unendlichkeit des Weltalls in Raum und Zeit.

4.2.7. Fragen und Aufgaben

1. Wie läßt sich die Bewegung des Sonnensystems unter den Sternen der Umgebung nach Richtung und Geschwindigkeit ermitteln?
2. Welche Umstände erschweren die Untersuchungen über Aufbau und Größe des Milchstraßensystems?
3. Beschreiben Sie den Bau des Milchstraßensystems (schematisch) mit Angabe der ungefähren Lage des Sonnensystems in der Milchstraße!
4. Woraus schließen wir auf die zeitliche Unendlichkeit des Weltalls?

5. Vorstellungen über die Entwicklung im Weltall

5.1. Ursprung und Alter der Himmelskörper

5.1.1. Altersbestimmung im Universum

Zur Altersbestimmung von Himmelskörpern wurden mehrere Methoden entwickelt, die sich auf unterschiedliche Gruppen von Objekten anwenden lassen. Bei den *direkten* Methoden werden die Altersbestimmungen im Laboratorium vorgenommen, so daß nur Körper untersucht werden können, die uns unmittelbar zugänglich sind. Daher kann auf diese Weise nur das Alter der Erde und der Meteoriten ermittelt werden, die auf unseren Planeten gelangt sind. Die *indirekten* Verfahren beruhen auf einem Vergleich zwischen theoretischen Vorstellungen und den Beobachtungen.
Bei der Altersbestimmung der Erde und der Meteoriten wird davon ausgegangen, daß sowohl die Erdrinde als auch die Meteoriten *radioaktive* Stoffe enthalten, deren Atome in andere Atomsorten zerfallen. Dabei ist die Zeit, in der sich die Hälfte einer bestimmten radioaktiven Substanz in ein anderes Element umwandelt, für den betreffenden Stoff charakteristisch. Aus dem Mengenverhältnis zwischen einer radioaktiven Substanz und seinen Zerfallsprodukten läßt sich das Alter eines Meteoriten oder der Erdrinde ermitteln. So wurde für die Erde ein Alter von 4,5 bis 5 Milliarden Jahren gefunden, während sich Meteoritenalter bis zu 6 Milliarden Jahren ergaben.
Für die Fixsterne auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms kann eine obere Altersgrenze abgeschätzt werden. Diese Sterne gewinnen ihre Energie, die sie abstrahlen, aus der Kernfusion von Wasserstoff in Helium. Es ist bekannt, wieviel Energie beim Aufbau einer bestimmten Menge Helium aus Wasserstoff frei wird. Nimmt man an, daß die Sterne auf der Hauptreihe ständig die gleiche Energiemenge je Sekunde abstrahlen, so läßt sich berechnen, nach welcher Zeit der Gesamtvorrat eines bestimmten Sterns an Wasserstoff vollständig in Helium umgewandelt ist. Dabei wird noch angenommen, daß der betreffende Stern ursprünglich nur aus Wasserstoff bestand.
Auf diese Weise ergibt sich für einen B0-Stern ein Alter von 220 Millionen Jahren und für einen A0-Stern von 5,2 Milliarden Jahren.

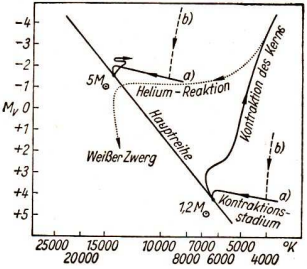
Die so gewonnenen Alterswerte sind aber viel zu groß. Einmal bestanden die Sterne anfänglich sicher nicht vollständig aus Wasserstoff, zum anderen bleiben sie nicht Hauptreihensterne, bis sie ihren gesamten Wasserstoffvorrat in Helium umgewandelt haben.

Wesentlich genauer sind dagegen die Werte, die durch Vergleich mit der Theorie des Sternaufbaus und der Sternentwicklung gewonnen werden. Diese Methode ist bei Sterngruppen, deren Mitglieder etwa gleichzeitig entstanden sind, anwendbar. Solche Gruppen sind die offenen und kugelförmigen Sternhaufen. Bei diesen Untersuchungen ergab sich, daß die Kugelhaufen die ältesten Objekte sind, deren Alter mehr als 10 Milliarden Jahre beträgt. Dagegen gibt es offene Haufen, die erst vor wenigen Millionen Jahren entstanden, also vor einer Zeit, die astronomisch sehr kurz ist. Die Sterne sind also nicht in einem „einmaligen Schöpfungsakt" erschaffen worden.

5.1.2. Entstehung und Entwicklung der Sterne

Aus der Altersbestimmung der Sterne geht hervor, daß es alte und junge Objekte gibt. Da offene Sternhaufen existieren, die erst einige Millionen Jahre alt sind, kann angenommen werden, daß auch heute noch Sterne entstehen.
Die im wesentlichen gleiche räumliche Verteilung der O- und B-Sterne, die die jüngsten Objekte sind, und der interstellaren Materie läßt vermuten, daß die Sterne aus dem interstellaren Gas und Staub gebildet werden.
Über den Prozeß der *Sternbildung* ist heute noch wenig bekannt. Die darüber bestehenden Vorstellungen sind vorläufig reine Hypothesen. So kann bei einer hinreichend großen und vor allem dichten interstellaren Wolke die Anziehungskraft zwischen den einzelnen Wolkenteilen so groß sein, daß die auseinandertreibenden Kräfte keine wesentliche Rolle spielen. Dadurch wird sich die Wolke zusammenziehen. Bei diesem Prozeß wird Energie der Lage (potentielle Energie) frei, die zum Teil in Wärme umgewandelt wird und die Wolke aufheizt. Wenn im Zentrum der Gaskugel, dem Gebiet der stärksten Aufheizung, eine Temperatur von etwa 1 Million Grad erreicht ist, können die Atomkerne des Wasserstoffs zu Heliumkernen verschmelzen. Die dabei freigesetzte Energie verläßt die nun zum Stern gewordene Gasmasse als Strahlung. Unter der Einwirkung der Strahlung von bereits bestehenden heißen Sternen kann die Bildung von Protosternen, d.h. von Objekten, aus denen dann die Sterne hervorgehen, beschleunigt werden.
Bei der *Entwicklung eines Sterns* hat man zwei Stadien zu unterscheiden, das Kontraktionsstadium, das die Entwicklung vom Protostern zum Hauptreihenstern betrifft, und die späteren Phasen, in denen die ausgestrahlte Energie durch Kernprozesse erzeugt wird.
Auf die wesentlichen Vorgänge im *Kontraktionsstadium* wurde schon bei der Sternbildung hingewiesen. Während der Kontraktion wandert der Stern wahrscheinlich von rechts oder auch von oben in das Hertzsprung-Russell-Diagramm hinein. Der Durchmesser des Sterns verringert sich im Laufe der Zeit, während die Temperatur sowohl in den oberflächennahen Schichten als auch im Zentrum ansteigt. Wenn bei Temperaturen von mehr als 1 Million Grad in den inneren Gebieten der Aufbau von Helium aus Wasserstoff beginnt, erreicht der Stern einen Gleichgewichtszustand, in dem sich seine Zustandsgrößen nicht mehr wesentlich ändern. Er liegt dann auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms.

Die Kontraktionszeit eines Sterns hängt von seiner Masse ab. Je größer die Masse ist, um so schneller erreicht der Stern die Hauptreihe.
Die nun für die Ausstrahlung erforderliche Energie wird durch die „Verbrennung" des Wasserstoffs zu Helium in den zentrumsnahen Gebieten gewonnen. Wenn dort der gesamte Wasserstoff verbraucht ist, versiegt dort diese Energiequelle, da von den äußeren Schichten kein weiterer Wasserstoff zugeführt werden kann. Zunächst zieht sich bei Erhöhung der Temperatur der zu Helium ausgebrannte Kern des Sterns zusammen. In der an den Kern angrenzenden Schale ist nun die Temperatur so weit angestiegen, daß auch dort Wasserstoff zu Helium umgewandelt werden kann. Im ausgebrannten Heliumkern des Sterns ist die Temperatur auf solche Werte angewachsen (etwa 100 Millionen Grad), daß ein weiterer Energieerzeugungsprozeß



101/1 Schematischer Entwicklungsweg zweier Sterne von 5 bzw. 1,2 Sonnenmassen im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Über der effektiven Temperatur ist die absolute Helligkeit aufgetragen. Für das Kontraktionsstadium sind zwei Möglichkeiten angegeben (es ist noch nicht geklärt, welcher der beiden Wege wirklich beschritten wird).

abläuft: Aus jeweils drei Heliumkernen wird ein Kohlenstoffkern aufgebaut. Die Energieerzeugung erfolgt dann also in zwei verschiedenen Gebieten des Sterns. Während dieser Prozesse im Sterninneren bläht sich der Stern als Ganzes auf und erhöht unter Abnahme der effektiven Temperatur seine Leuchtkraft. Er wird zum Riesenstern. Das zwischen der Hauptreihe und dem Riesenast liegende Gebiet des Hertzsprung-Russell-Diagramms durchläuft er verhältnismäßig schnell. Daher sind in der sogenannten Hertzsprung-Lücke nur sehr wenige Sterne anzutreffen.
Im Riesenstadium halten sich die Sterne, verglichen mit der Verweilzeit auf der Hauptreihe, verhältnismäßig kurz auf. Wenn ihr Energievorrat nahezu völlig erschöpft ist, da die Zone der Wasserstoffverbrennung immer weiter nach außen gewandert ist, wird der Stern vermutlich unter Abgabe von Masse zu einem weißen Zwerg (Bild 101/1).

5.1.3. Kosmogonie des Sonnensystems

Über die Bildung und Entwicklung des Planetensystems wurde eine Reihe von Theorien aufgestellt, die aber mit mehr oder weniger Schwächen behaftet sind. Die wohl beste Vorstellung über die Bildung des Sonnensystems geht davon aus, daß dieser Vorgang der Entstehung von Doppelsternen sehr ähnlich ist. Da Doppelsterne häu-

fige Objekte im Weltall sind, wird es wahrscheinlich auch viele Planetensysteme geben, obgleich uns nur das System unserer Sonne bekannt ist. Es wurde abgeschätzt, daß etwa 0,1 Prozent aller Fixsterne von Planeten umlaufen werden.
Nach den Vorstellungen dieser Theorie hat sich aus der interstellaren Substanz zunächst eine kugelförmige rotierende Gaswolke, deren Masse erheblich größer war als die des heutigen Sonnensystems, herausgelöst. Durch die Rotation und die gegenseitige Anziehung der einzelnen Teile flachte sich die Wolke ab und bildete eine Scheibe mit einer zentralen Verdichtung, der „Ursonne", deren Masse wahrscheinlich nur wenig größer war als die Masse der heutigen Sonne. Während der Abflachung zur Scheibe verflüchtigte sich ein großer Teil der Materie in den Weltraum. In der Scheibe herrschte eine starke Bewegung mit Wirbeln.
An den Berührungsflächen der Wirbel kam es zu Verdichtungen, aus denen die „Urplaneten" hervorgingen.
Diese Theorie basiert auf älteren Vorstellungen und stellt eine Synthese von ihnen dar. Jedoch wurde sie noch nicht in allen Einzelheiten durchgerechnet, so daß sie quantitativ bisher nicht bewiesene Annahmen enthält.

5.1.4. Zusammenfassung

Die Altersbestimmung der Erde und Meteoriten wird im Laboratorium durch Häufigkeitsmessungen radioaktiver Stoffe und ihrer Zerfallsprodukte vorgenommen.
Das Alter der Sterne und Sternhaufen ergibt sich aus der Theorie des Sternaufbaus und der Sternentwicklung durch Vergleich mit den Beobachtungsergebnissen. Es zeigt sich, daß Objekte existieren, die älter als 10 Milliarden Jahre sind, und andere, die sich erst vor wenigen Millionen Jahren bildeten. Aus diesem großen Altersunterschied kann geschlossen werden, daß auch noch heute Sterne entstehen.
Sterne bilden sich aus interstellarer Materie. Nach der Kontraktion des Protosterns kommt der Stern auf die Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms. Dann schöpft er seine Energie aus dem Aufbau von Wasserstoff zu Helium. Nach dem Ausbrennen der zentrumsnahen Zonen des Sterns entwickelt er sich zu einem Riesenstern. Schließlich wird er zu einem weißen Zwerg.
Das Planetensystem entstand ebenfalls aus interstellarer Materie. Durch die Wirbelbewegung in der Wolke, aus der das System hervorging, kam es an bestimmten Stellen zu Verdichtungen, aus denen sich die Urplaneten bildeten.
Die wissenschaftlichen Untersuchungen weisen nach, daß sich die Materie im Universum unaufhörlich bewegt und ihre Formen verändert. Aus diffusen interstellaren Wolken bilden sich Himmelskörper, die in ihrem Entwicklungsprozeß wiederum Substanz in den interstellaren Raum abgeben.

5.1.5. Fragen und Aufgaben

1. Wodurch gewinnt ein Stern in den verschiedenen Entwicklungsstadien seine Energie?
2. Beschreiben Sie den Entwicklungsweg eines Sterns!
3. Wie ist die unterschiedliche Verteilung der Sterne im Hertzsprung-Russell-Diagramm zu erklären?

5.2. Geschichtlicher Rückblick auf die kosmogonischen Theorien

Die erste kosmogonische Theorie des Sonnensystems stellte der deutsche Philosoph KANT auf und veröffentlichte sie im Jahre 1755. Nach seiner Auffassung sollen sich die Sonne und die Planeten aus einer großen Wolke von festen Teilchen durch Verdichtung gebildet haben. Einige dieser Annahmen haben auch heute noch Gültigkeit.

Nach KANT trat 1796 der französische Physiker LAPLACE mit seiner Nebularhypothese auf. Aus einer ausgedehnten rotierenden Gasmasse, die sich unter ihrer eigenen Gravitationswirkung zusammenzog, entstanden nach dieser Vorstellung die Planeten nacheinander, da sich wegen der auftretenden Fliehkräfte Gasringe ablösen sollten. Jedoch konnte auch diese Hypothese nicht allen Beobachtungsbefunden gerecht werden.

Nach dem englischen Astronomen JEANS bildeten sich die Planeten beim sehr nahen Vorübergang eines anderen Fixsterns an der Sonne. Durch die Gezeitenwirkungen sollte ein Substanzstrom aus der Sonne herausgezogen werden, in dem Verdichtungen eintraten, aus denen die Planeten entstanden. Nach dieser „Katastrophentheorie" wäre unser Planetensystem im Milchstraßensystem wahrscheinlich das einzige seiner Art, da ein naher Vorübergang zweier Sterne äußerst selten vorkommt. Außerdem hätte sich bei den hohen Temperaturen die aus der Sonne herausgelöste Substanz verflüchtigt. Deshalb hat diese Theorie nur eine geringe wissenschaftliche Überzeugungskraft.

Die Turbulenztheorie des deutschen Physikers v. WEIZSÄCKER geht von der Vorstellung aus, daß sich die Sonne und die Planeten aus dem gleichen Urnebel bildeten. In dem durch Rotation zur Scheibe abgeflachten Nebel treten durch Turbulenz Wirbel auf, an deren Berührungsflächen sich die Substanz verdichtet, woraus schließlich die Planeten entstehen.

Die von dem sowjetischen Astronomen FESSENKOW aufgestellte Vorstellung basiert auf der Hypothese von LAPLACE; sie konnte eine ganze Reihe von Beobachtungen erklären, andere Fragen blieben jedoch unbeantwortet.

Einen Zusammenstoß der Sonne mit einer Meteoritenwolke nahm der sowjetische Geologe SCHMIDT an. Unter der Gravitationswirkung und dem Strahlungsdruck der Sonne soll es zur Planetenbildung gekommen sein, wobei zur Erklärung der Titius-Bode-Reihe eine bestimmte Verteilung der Meteoritenteilchen vorausgesetzt wurde. Jedoch konnte FESSENKOW zeigen, daß es keine befriedigende Erklärung für die Bildung von größeren Körpern aus Meteoriten gibt.

Die vom amerikanischen Astronomen KUIPER entwickelte Hypothese ist im Abschnitt 5.1.3. dargelegt. Sie bezieht eine Reihe von Annahmen aus anderen Vorstellungen ein und entspricht von allen Hypothesen am besten den astronomischen Beobachtungen. Sie dürfte deshalb nach unseren gegenwärtigen Kenntnissen der Wahrheit am nächsten kommen.

An der Ausarbeitung kosmogonischer Theorien, insbesondere der Theorie der Sternentstehung und Sternentwicklung, die in den letzten 15 Jahren große Fortschritte gemacht hat, beteiligten sich viele Astronomen aller Länder.

Anhang

Tabellen

1. Astronomische Konstanten und Maßeinheiten

Aberrationskonstante	$20,''469$
Jährliche Präzession	$50,''2564 + 0,''0222 \cdot T$
Schiefe der Ekliptik	$23°27'8,''3 - 46,''85 \cdot T$
(T in julianischen Jahrhunderten ab 1900,0)	
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$299\,792{,}5 \pm 1\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$
1 Astronomische Einheit (AE)	$149{,}6 \cdot 10^6$ km
1 Parsec (pc)	$30{,}86 \cdot 10^{12}$ km $= 206\,265$ AE
1 Lichtjahr	$9{,}461 \cdot 10^{12}$ km $= 0{,}3067$ pc

2. Die Sonne

Mittlere Sonnenparallaxe	$8,''794$	
Mittlere Entfernung von der Erde	$149{,}598 \cdot 10^6$ km	
Scheinbarer Halbmesser (Mittelwert)	$16'1,''2$	
Radius	$6{,}958 \cdot 10^5$ km	(109 ♁)
Volumen	$1{,}410 \cdot 10^{18}\ \mathrm{km^3}$	($1{,}3 \cdot 10^6$ ♁)
Masse	$1{,}985 \cdot 10^{30}$ kg	($332 \cdot 10^3$ ♁)
Dichte	$1{,}41\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$	(0,26 ♁)
(♁ sind die entsprechenden Werte für die Erde)		
Solarkonstante	$1{,}97\ \mathrm{cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}} = 1{,}374\ \mathrm{kW \cdot m^{-2}}$	
Gesamte Energiestrahlung	$3{,}861 \cdot 10^{23}$ kW	
Oberflächentemperatur	≈ 6000 °K (Verteilungstemperatur im langwelligen Bereich)	

3. Die Erde

Radius (Äquator)	$a = 6{,}3784 \cdot 10^3$ km
(Pol)	$b = 6{,}3569 \cdot 10^3$ km
Abplattung	$^1/_{298}$
Radius der volumengleichen Kugel	$6{,}371 \cdot 10^3$ km
Volumen	$1{,}083 \cdot 10^{12}\ \mathrm{km^3}$

Masse	$5{,}979 \cdot 10^{24}$ kg
Dichte	$5{,}520$ g · cm^{-3}
Beschleunigung a. d. Oberfläche	$(980{,}618 - 2{,}5865 \cdot \cos 2\varphi + 0{,}0058 \cdot \cos^2 2\varphi)$ cm · s^{-2}; φ = geogr. Br.
Mittl. Geschwindigkeit i. d. Bahn	$29{,}765$ km · s^{-1}

4. Der Mond

Mittlere Parallaxe	$3422{,}''7$	
Mittlere Entfernung von der Erde	$384{,}4 \cdot 10^3$ km	
Mittlerer scheinbarer Halbmesser	$15'\,32{,}''6$	
Radius	$1{,}738 \cdot 10^3$ km	(0,2725 ♁)
Volumen	$2{,}199 \cdot 10^{10}$ km^3	(0,0203 ♁)
Masse	$7{,}347 \cdot 10^{22}$ kg	(0,0123 ♁)
Dichte	$3{,}341$ g · cm^{-3}	(0,61 ♁)
Mittlere Bahnneigung gegen die Erdbahn	$5^\circ\,8'\,43''$	
Umlaufszeit des Knotens	18,60 Jahre	

5. Die Planeten

Planet	a	U	S	e	i	☊	$\tilde{\omega}$	R_0	log M	P	A	ε
Merkur	58	88	116	0,206	7,0	47,1	75,9	2420	26,501	?	0,0000	?
Venus	108	225	584	0,007	3,6	75,8	130,2	6200	27,688	225 d ?	0,0000	?
Erde	150	365	–	0,017	–	–	101,2	6378	27,776	23,935	0,0034	23,45
Mars	228	687	780	0,093	1,8	48,8	334,2	3400	26,807	24,623	0,0052	25,20
Jupiter	778	4330	399	0,048	1,3	99,4	12,7	71400	30,278	9,841	0,0620	3,10
Saturn	1428	10760	378	0,056	2,5	112,8	91,1	60400	29,756	10,234	0,0960	26,75
Uranus	2872	30690	370	0,047	0,8	73,5	169,0	23800	28,939	10,816	0,0560	98,00
Neptun	4498	60180	368	0,009	1,8	130,7	43,8	22300	29,013	15,666	0,0200	29,00
Pluto	5910	90700	367	0,247	17,1	109,0	222,8	7200	27,730	16,000	?	?

a große Halbachse der Bahn in Millionen Kilometer
U siderische Umlaufszeit } in Tagen
S synodische Umlaufszeit }
e Exzentrizität
i Neigung der Bahnebene gegen die Ekliptik } in Grad
☊ Länge des aufsteigenden Knotens }
$\tilde{\omega}$ Länge des Perihels }
R_0 Äquatorradius des Planeten in Kilometern
M Masse des Planeten in Gramm
P Rotationsperiode in Stunden
A Abplattung
ε Neigung der Rotationsachse gegen die Normale zur Bahnebene in Grad

6. Künstliche Raumflugkörper (Auswahl)

Startdatum	Land	Bezeichnung	Bahn-neigung	Bemerkung
			1957	
4. Oktober	UdSSR	Sputnik 1	65°	erster künstlicher Erdsatellit
3. November	UdSSR	Sputnik 2	65°	erster Biosatellit (Hündin Laika)
			1958	
31. Januar	USA	Explorer 1	33°	erster amerikanischer Erdsatellit
17. März	USA	Vanguard 1	34°	wissensch. Erdsatellit
26. März	USA	Explorer 3	33°	wissensch. Erdsatellit
15. Mai	UdSSR	Sputnik 3	65°	wissensch. Erdsatellit
			1959	
2. Januar	UdSSR	Lunik 1	–	erster künstlicher Planetoid
3. März	USA	Pioneer 4	–	erster amerikanischer Planetoid
12. September	UdSSR	Lunik 2	–	Aufschlag auf der Mondoberfläche
4. Oktober	UdSSR	Lunik 3	76°	photogr. Aufn. d. Mondrückseite
			1960	
1. April	USA	Tiros 1	48°	erster Wetterbeobachtungssatellit
15. Mai	UdSSR	Sputnikschiff 1	65°	unbemanntes Sputnikschiff; bei Rückkehrversuch auf unvorhergesehene Bahn gelangt
12. August	USA	Echo 1	47°	Ballonsatellit, 30 m Durchmesser
19. August	UdSSR	Sputnikschiff 2	65°	erster erfolgreicher Rückkehrversuch mit Tieren an Bord
1. Dezember	UdSSR	Sputnikschiff 3	65°	mit Tieren besetztes Sputnikschiff; bei Rückkehrversuch verglüht
			1961	
4. Februar	UdSSR	Sputnik 4	65°	Parkbahnsatellit (Vorversuch)
12. Februar	UdSSR	Sputnik 5	65°	Parkbahnsatellit für Venussonde
12. Februar	UdSSR	Venussonde	–	Raumsonde zum Planeten Venus
9. März	UdSSR	Sputnikschiff 4	65°	erfolgr. Rückkehrversuch mit Tieren
25. März	UdSSR	Sputnikschiff 5	65°	erfolgr. Rückkehrversuch mit Tieren
12. April	UdSSR	Wostok 1	65°	erstes bemanntes Sputnikschiff, Kosmonaut J. A. Gagarin
6. August	UdSSR	Wostok 2	65°	bemanntes Sputnikschiff, Kosmonaut G. S. Titow
23. August	USA	Ranger 1	33°	Versuch einer Mondsonde
13. September	USA	Mercury 4	33°	erfolgreicher Rückkehrversuch eines unbemannten Sputnikschiffes
29. November	USA	Mercury 5	33°	erfolgreicher Rückkehrversuch mit einem Affen an Bord

Startdatum	Land	Bezeichnung	Bahn-neigung	Bemerkung
			1962	
20. Februar	USA	Friendship 7	32°	erstes amerikanisches bemanntes Sputnikschiff, Kosmonaut J. H. Glenn
7. März	USA	Oso	33°	Sonnenbeobachtungssatellit
16. März	UdSSR	Kosmos 1	49°	wissensch. Erdsatellit. Beginn der Kosmos-Serie I (49°)
23. April	USA	Ranger 4	–	Aufschlag auf Mondrückseite
26. April	GB	Ariel	54°	erster britischer Erdsatellit, mit US-Rakete in die Bahn gebracht
24. Mai	USA	Aurora 7	32°	bemanntes Sputnikschiff, Kosmonaut M. S. Carpenter
10. Juli	USA	Telstar 1	44°	erster Fernseh- und Nachrichten-satellit
11. August	UdSSR	Wostok 3	65°	bemanntes Sputnikschiff; Kosmonaut A. G. Nikolajew
12. August	UdSSR	Wostok 4	65°	bemanntes Sputnikschiff; Kosmonaut P. R. Popowitsch
27 August	USA	Mariner 2	–	Raumsonde zum Planeten Venus
29. September	Kanada	Alouette	80°	erster kanadischer Erdsatellit; von US-Rakete in die Bahn gebracht
3. Oktober	USA	Sigma 7	33°	bemanntes Sputnikschiff; Kosmonaut W. M. Schirra
31. Oktober	USA	Anna 1 B	50°	geodätischer Blinkfeuersatellit
1. November	UdSSR	Sputnik 6	65°	Parkbahnsatellit für Mars 1
1. November	UdSSR	Mars 1	–	Raumsonde zum Planeten Mars
			1963	
2. April	UdSSR	Sputnik 7	65°	Parkbahnsatellit für Lunik 4
2. April	UdSSR	Lunik (Luna) 4	–	Raumsonde zum Mond
15. Mai	USA	Faith 7	33°	bemanntes Sputnikschiff; Kosmonaut L. G. Cooper
14. Juni	UdSSR	Wostok 5	65°	bemanntes Sputnikschiff; Kosmonaut V. F. Bykowski
16. Juni	UdSSR	Wostok 6	65°	bemanntes Sputnikschiff; Kosmonautin V. W. Tereschkowa
1. November	UdSSR	Poljot 1	59°	erster manövrierfähiger Raumschiff-satellit; änderte Bahnhöhe und Bahn-neigung

7. Die hellsten Sterne nördlich von −30° Deklination

Name	α (1950,0)	δ (1950,0)	Visuelle Helligkeit	Spektrum	Jährliche Eigenbewegung	Radialgeschwindigkeit	Parallaxe	Entfernung	Visuelle Leuchtkraft
		°	m		″	km · s⁻¹	″	Lichtj.	$L_*/L_\odot$
α Aquilae (Atair)	19^h48^{min}	+ 8,7	0,80	A 5	0,66	−27	0,208	16	9
α Arietis	2 4	+23,2	2,00	K 2	0,25	−14	0,044	75	70
α Aurigae (Capella)	5 13	+46,0	0,09	G 0	0,44	+30	0,071	46	160
β Aurigae	5 56	+45,0	1,90	A 0	0,05	−18	0,039	85	110
α Bootis (Arktur)	14 13	+19,5	−0,06	K 0	2,29	− 4	0,087	38	55
α Canis Maioris (Sirius)	6 43	−16,7	−1,43	A 0	1,32	− 8	0,373	8,7	24
β Canis Maioris	6 20	−17,9	1,97	B 1	0,00	+33	0,011	300	1140
δ Canis Maioris	7 6	−26,3	1,84	F 8	0,01	+34	0,005	650	6550
ε Canis Maioris	6 57	−28,9	1,78	B 1	0,00	+27	0,010	330	1650
α Canis Minoris (Prokyon)	7 37	+ 5,4	0,37	F 5	1,25	− 3	0,291	11	7
α Cygni (Deneb)	20 40	+45,1	1,26	A 2	0,00	var.	0,005	650	10400
α Geminorum (Castor)	7 31	+32,0	1,59	A3 + A8	0,20	+ 3	0,070	46	41
β Geminorum (Pollux)	7 42	+28,2	1,16	K 0	0,63	+ 4	0,100	33	29
γ Geminorum	6 35	+16,5	1,93	A 0	0,07	var.	0,042	80	86
α Hydrae (Alphard)	9 25	− 8,4	1,98	K 2	0,03	− 4	0,016	200	550
α Leonis (Regulus)	10 6	+12,2	1,36	B 8	0,25	+ 2	0,042	80	135

α Lyrae (Wega)	18 35	+38,7	0,04	A 0	0,34	−14	0,121	27	60
α Orionis (Beteigeuze)	5 53	+ 7,4	0,1 . . . 1,2	M 2	0,03	+21	0,011	300	3100 (var.)
β Orionis (Rigel)	5 12	− 8,3	0,15	B 8	0,00	+24	0,006	550	21000
ε Orionis	5 34	− 1,2	1,70	B 0	0,00	+26	0,007	460	3770
ζ Orionis	5 38	− 2,0	1,78	B 0	0,00	+16	0,008	400	2610
α Persei	3 21	+49,7	1,80	F 5	0,03	− 2	0,012	270	1140
α Piscis Austr. (Formalhaut)	22 55	−29,9	1,16	A 3	0,37	+ 6	0,135	24	16
α Scorpii (Antares)	16 26	−26,3	0,98	Ma + A 3	0,03	− 3	0,014	230	1800
α Tauri (Aldebaran)	4 33	+16,4	0,85	K 5	0,20	+54	0,051	65	150
β Tauri	5 23	+28,6	1,65	B 8	0,18	+ 8	0,025	130	315
α Ursae Maioris	11 1	+62,0	1,80	K 0	0,14	− 9	0,031	110	160
ε Ursae Maioris	12 52	+56,2	1,78	A 0	0,11	−12	0,067	48	38
η Ursae Maioris	13 46	+49,6	1,87	B 3	0,12	−11	0,017	190	545
α Ursae Minoris (Polarstern)	1 49	+89,0	2,01	F 7	0,05	−13	0,009	360	1650
α Virginis (Spica)	13 23	−10,9	1,00	B 2	0,05	+ 2	0,017	190	1140

8. Verzeichnis der Sternbilder

Internat. Abkürzung	Lateinischer Name Nominativ	Genitiv	Deutscher Name
And	Andromeda	Andromedae	Andromeda
Ant	Antlia	Antliae	Luftpumpe
Aps	Apus	Apodis	Paradiesvogel
Aql	Aquila	Aquilae	Adler
Aqr	Aquarius	Aquarii	Wassermann
Ara	Ara	Arae	Altar
Ari	Aries	Arietis	Widder
Aur	Auriga	Aurigae	Fuhrmann
Boo	Bootes	Bootis	Bootes (Rinderhirt)
Cae	Caelum	Caeli	Grabstichel
Cam	Camelopardalis	Camelopardalis	Giraffe
Cap	Capricornus	Capricorni	Steinbock
Car	Carina	Carinae	Kiel (Teil von Argo)
Cas	Cassiopeia	Cassiopeiae	Cassiopeia
Cen	Centaurus	Centauri	Centaur
Cep	Cepheus	Cephei	Cepheus
Cet	Cetus	Ceti	Walfisch
Cha	Chamaeleon	Chamaeleontis	Chamäleon
Cir	Circinus	Circini	Zirkel
CMa	Canis Maior	Canis Maioris	Großer Hund
CMi	Canis Minor	Canis Minoris	Kleiner Hund
Cnc	Cancer	Cancri	Krebs
Col	Columba	Columbae	Taube
Com	Coma (Berenices)	Comae (Berenices)	Haupthaar (der Berenike)
CrA	Corona Austrina	Coronae Austrinae	Südliche Krone
CrB	Corona Borealis	Coronae Borealis	Nördliche Krone
Crt	Crater	Crateris	Becher
Cru	Crux	Crucis	Kreuz
Crv	Corvus	Corvi	Rabe
CVn	Canes Venatici	Canum Venaticorum	Jagdhunde
Cyg	Cygnus	Cygni	Schwan
Del	Delphinus	Delphini	Delphin
Dor	Dorado	Doradus	Schwertfisch
Dra	Draco	Draconis	Drache
Equ	Equuleus	Equulei	Pferdchen
Eri	Eridanus	Eridani	(Fluß) Eridanus
For	Fornax	Fornacis	Chemischer Ofen

Intern. Abkürzung	Lateinischer Name Nominativ	Genitiv	Deutscher Name
Gem	Gemini	Geminorum	Zwillinge
Gru	Grus	Gruis	Kranich
Her	Hercules	Herculis	Herkules
Hor	Horologium	Horologii	Pendeluhr
Hya	Hydra	Hydrae	(weibl.) Wasserschlange
Hyi	Hydrus	Hydri	(männl.) Wasserschlange
Ind	Indus	Indi	Inder
Lac	Lacerta	Lacertae	Eidechse
Leo	Leo	Leonis	Löwe
Lep	Lepus	Leporis	Hase
Lib	Libra	Librae	Waage
LMi	Leo Minor	Leonis Minoris	Kleiner Löwe
Lup	Lupus	Lupi	Wolf
Lyn	Lynx	Lyncis	Luchs
Lyr	Lyra	Lyrae	Leier
Men	Mensa	Mensae	Tafelberg
Mic	Microscopium	Microscopii	Mikroskop
Mon	Monoceros	Monocerotis	Einhorn
Mus	Musca	Muscae	Fliege
Nor	Norma	Normae	Winkelmaß
Oct	Octans	Octantis	Oktant
Oph	Ophiuchus	Ophiuchi	Schlangenträger
Ori	Orion	Oriònis	Orion
Pav	Pavo	Pavonis	Pfau
Peg	Pegasus	Pegasi	Pegasus
Per	Perseus	Persei	Perseus
Phe	Phoenix	Phoenicis	Phönix
Pic	Pictor	Pictoris	Maler
PsA	Piscis Austrinus	Piscis Austrini	Südlicher Fisch
Psc	Pisces	Piscium	Fische
Pup	Puppis	Puppis	Achterdeck } Teil von Argo
Pyx	Pyxis	Pyxidis	Kompaß } Teil von Argo
Ret	Reticulum	Reticuli	Netz
Scl	Sculptor	Sculptoris	Bildhauer
Sco	Scorpius	Scorpii	Skorpion
Sct	Scutum	Scuti	Schild

Intern. Abkürzung	Lateinischer Name Nominativ	Genitiv	Deutscher Name
Ser	Serpens	Serpentis	Schlange
Sex	Sextans	Sextantis	Sextant
Sge	Sagitta	Sagittae	Pfeil
Sgr	Sagittarius	Sagittarii	Schütze
Tau	Taurus	Tauri	Stier
Tel	Telescopium	Telescopii	Fernrohr
TrA	Triangulum Australe	Trianguli Australis	Südliches Dreieck
Tri	Triangulum	Trianguli	Dreieck
Tuc	Tucana	Tucanae	Tukan
UMa	Ursa Maior	Ursae Maioris	Großer Bär
UMi	Ursa Minor	Ursae Minoris	Kleiner Bär
Vel	Vela	Velorum	Segel (Teil von Argo)
Vir	Virgo	Virginis	Jungfrau
Vol	Volans	Volantis	Fliegender Fisch
Vul	Vulpecula	Vulpeculae	Füchschen

In Verbindung mit einer Sternbezeichnung wird der Genitiv gebraucht, zum Beispiel γ im Löwen = γ Leonis, β in den Zwillingen = β Geminorum, Stern 51 in der Andromeda = 51 Andromedae.

9. Beobachtungsobjekte für Schulfernrohre

a) *Doppelsterne*

Stern	Sternbild	α	δ (1950,0) °	Helligkeit m m	Abstand ″	Positionswinkel
γ	Widder (Aries)	1^h 51^{min}	+19,0	4,8, 4,9	7,9	0°
γ	Andromeda	2 1	+42,1	2,4, 5,1	10,0	64
λ	Orion	5 32	+ 9,9	3,7, 5,7	4,4	44
ϑ	Orion	5 33	− 5,4	5,4, 6,9, 7,0, 8,0	sog. Trapez, vierfach	
σ	Orion	5 36	− 2,6	3,8, 6,7, 6,9	dreifach	
β	Einhorn (Monoceros)	6 26	− 7,0	4,7, 5,2, 5,6	dreifach	
α	Zwillinge (Gemini)	7 31	+32,0	2,0, 3,0	2,4	175
γ	Löwe (Leo)	9 17	+20,1	2,6, 3,8	4,3	122
γ	Jungfrau (Virgo)	12 39	− 1,2	3,7, 3,7	5,2	310
α	Jagdhunde (Can. Ven.)	12 54	+38,6	2,9, 5,5	19,6	228
ζ	Großer Bär (Ursa Maior)	13 22	+55,2	2,4, 4,1	14,5	151
ε	Bootes	14 43	+27,3	2,7, 5,3	3,0	336
α	Herkules	17 12	+14,5	3,5, 5,7	4,7	108

Stern	Sternbild	α	δ (1950,0) °	Helligkeit m m	Abstand ″	Positions-winkel
ε^1	Lyra } weiter Doppelst.	18 43	+39,6	5,1, 6,2	2,8	1
ε^2	Lyra }	18 43	+39,6	5,1, 5,3	2,2	103
β	Lyra	18 48	+33,3	3,4, 6,7	45,8	149
ϑ	Schlange (Serpens)	18 54	+ 4,1	4,5, 4,9	22,2	104
β	Schwan (Cygnus)	19 29	+27,9	3,2, 5,3	34,3	54
γ	Delphin	20 44	+16,0	4,5, 5,4	10,0	268
61	Schwan (Cygnus)	21 5	+38,5	5,6, 6,4	27,3	141

b) *Offene (galaktische) Sternhaufen*

Bezeichnung	α	δ (1950,0) °	Helligkeit m	Durchmesser ′	Entfernung (Lichtjahre)	
h, χ Persei	$2^h\ 17^{min}$	+56,9	3,8	35/70	8000	sehr junger Doppelsternhaufen
Plejaden	3 44	+24,0	1,4	100	450	
M 35	6 6	+24,3	5,3	40	2700	
M 41	6 45	−20,7	4,6	30	<2500	4° südl. Sirius
M 50	7 0	− 8,3	6,3	10	2600	
M 47	7 34	−14,4	7,0	25	3700	
M 46	7 40	−14,7	9,2	25	6000	
Praesepe	8 38	+19,9	3,7	90	550	
M 67	8 48	+12,0	6,1	15	6000	sehr alter Sternhaufen
M 16	18 16	−13,8	6,4	25	5500	
M 11	18 48	− 6,3	6,3	10	4000	
M 39	21 30	+48,2	5,2	30	800	

c) *Kugelförmige Sternhaufen*

Bezeichnung	α	δ (1950,0) °	Helligkeit m	Durchmesser ′	Entfernung (Lichtjahre)	
M 3	$13^h\ 40^{min}$	+28,6	6,4	9,8	40000	
M 5	15 16	+ 2,3	6,2	12,7	35000	
M 4	16 21	−26,4	6,3	14,0	24000	1,5 westl. v. Antares
M 13	16 40	−36,6	5,8	10,0	34000	
M 92	17 16	−43,2	6,2	8,3	37000	
M 22	18 33	−24,0	5,8	17,3	22000	
M 15	21 28	+12,0	6,2	7,4	43000	
M 2	21 31	− 1,1	6,4	8,2	45000	

d) *Gasnebel*

Bezeichnung	α (1950,0)	δ (1950,0) °	Helligkeit m	Durchmesser	Entfernung (Lichtjahre)	
M 1	$5^h\ 32^{min}$	+22,0	8,4	4′/6′	900	Krabbennebel
M 42	5 33	− 5,4	2,9	60′/66′	1000	Orionnebel
M 20	17 59	−23,0	6,4	27′/29′	2200	Trifidnebel
M 8	18 2	−24,3	5,5	35′/60′	2500	Sagittariusnebel
M 16	18 16	−13,8	6,1	28′/35′	4500	
M 17	18 18	−16,2	6,3	37′/46′	3300	Omeganebel
M 57	18 52	+33,0	9,3	1′/1′4	2200	Ringnebel in der Leier
M 27	19 57	+22,6	7,6	4′/8′	1000	Hantelnebel
NGC 7000	20 57	+44,1	-	100′/120′	3000	Nordamerikanebel

e) *Extragalaktische Sternsysteme*

Bezeichnung NGC	α (1950,0)	δ (1950,0) °	Galakt. Breite	Helligkeit m	Durchmesser	Radialgeschwindigkeit km · s⁻¹	
224 M 31	$0^h\ 40^{min}$	+41,0	−21°	3,5	90′/200′	− 35	Großer Andromedanebel
205	0 38	+41,4	−21	8,2	16′/ 26′	− 8	Begleiter v. M 31
221 M 32	0 40	+40,6	−22	8,2	8′/ 12′	+ 17	
598 M 33	1 31	+30,4	−31	5,8	53′/ 83′	− 12	Triangelnebel
2403	7 32	+65,7	+30	8,5	15′/ 28′	+ 187	
3031 M 81	9 52	+69,3	+42	7,0	14′/ 35′	+ 77	
3034 M 82	9 52	+69,9	+41	8,4	8′/ 13′	+ 400	
4258	12 16	+47,6	+70	8,4	10′/ 24′	+ 494	
4472 M 49	12 27	+ 8,3	+70	8,5	11′/ 12′	+ 918	
4486 M 87	12 28	+12,7	+75	8,7	11′/ 11′	+1218	
4594 M 104	12 37	−11,4	+51	8,3	11′/ 12′	+1048	
4736 M 94	12 49	+41,4	+76	8,3	13′/ 15′	+ 345	
4826 M 64	12 54	+21,8	+84	8,5	8′/ 12′	+ 364	
5055 M 63	13 14	+42,3	+74	8,6	10′/ 16′	+ 575	
5194/95 M 51	13 28	+47,5	+68	8,0	10′/ 15′	+ 600	Jagdhundenebel
5457 M 101	14 1	+54,6	+60	7,9	28′/ 28′	+ 394	

Aberration 78
ADAMS, J. C. 59; 59
Altersbestimmung im Universum 99
Andromedanebel 97
Antapex 94
Apex 94
Aphel 36
Apogäum 64
Äquator 16
Äquatorsystem
– rotierendes 19
– ruhendes 16
Äquinoktium siehe Tagundnachtgleiche
ARISTARCH 72
Astronautik 64
Astronomische Einheit 33
Ausstrahlungspunkt siehe Radiant
Azimut 15

Bahnelemente 36
BARNARD, E. E. 79
Bedeckungsveränderlicher 90
BESSEL, F. W. 79
Bewegung der Sterne 94
BRADLEY, J. 79
BRAHE siehe TYCHO BRAHE
Breite, geographische und Polhöhe 19
BRUNO, G. 75
BUNSEN, R. 79

CASSINI, G. D. 77
Chromosphäre 40

Dämmerung
– astronomische 16
– bürgerliche 16
Deklination 17
δ-Cephei-Sterne 91
DOLLOND, J. 78
Doppelsterne 89
Dunkelnebel 92

Eigenbewegung 94
Ekliptik 25
Elongation 29
Emissionsnebel 92
Energiehaushalt der Sonne 44
ENGELS, F. 75
Entfernungsbestimmung
– Erde–Mond 72
– Erde–Sonne 33
– im Weltall 83; 89
Entfernungsmodul 88
ERATOSTHENES 73
Erdatmosphäre 47
Erde 46
Erdhydrosphäre 47
Erdrotation, Beweise für die 9
Erdsatellit, künstlicher 64
Exzentrizität 36

Farbenindex 84
Fernrohr 17
FESSENKOW, W. G. 103
Feuerkugel 62
Finsternis 50
Fixstern siehe Stern
FOUCAULT, L. 10
FRAUNHOFER, J. v. 78
Frühlingspunkt 19; 26

GAGARIN, J. 69
Galaxis siehe Milchstraßensystem
GALILEI, G. 75
GALLE, J. G. 79
Geozentrisches Weltsystem 72
Gnomon 12
Granulation 40
Gravitationsgesetz 35
GREGOR 75
Größenklasse 81

Halbschatten 51
HALL, A. 79
Heliozentrisches Weltsystem 74
Helligkeit
– absolute 86
– scheinbare 81
HERSCHEL, J. 79
HERSCHEL, W. 39; 78
Hertzsprung-Russell-Diagramm 87
HEVEL, J. 77
Himmelskugel 10
Himmelspol 16
HIPPARCH 73
Höhe 15
Horizont
– mathematischer 11
– natürlicher 11
Horizontalparallaxe siehe Parallaxe, tägliche
Horizontsystem 15
HUYGENS, Ch. 77

Internationales Geophysikalisches Jahr (IGJ) 48
Interplanetare Materie 63
Interstellare Materie 92

Jahr
– siderisches 27; 47
– tropisches 27; 47
JEANS, J. H. 103
JULIUS CAESAR 71
Jupiter 57

Kalender 27
KANT, I. 103
KEPLER, J. 76
Keplersche Gesetze 35
Kernschatten 51
KIRCHHOFF, G. 79
Knoten 28; 49
Komet 61
Konjunktion (obere und untere) 29
Konstellationen 29
KOPERNIKUS, N. 74
Kosmogonie
– der Planetensysteme 101
– der Sterne 100
– Geschichte der K. 103
Kosmonautik siehe Astronautik
Kreisbahngeschwindigkeit 64
KUIPER, G. P. 103
Kugelsternhaufen 95
Kulmination der Gestirne 19

LAPLACE, P. S. 103
Leuchtkraft
– der Sonne 43
– der Sterne 87
Leuchtkraftklasse 87
LEVERRIER, U. 39; 79
Lichtjahr 84

Magellansche Wolken 97
Mars 55
Masse-Leuchtkraft-Diagramm 88
Mehrfachsterne 89
Meridian 11
Merkur 54
Metagalaxis 97
Meteor 62
Meteorit 62
Meteorstrom 62
Milchstraße, Milchstraßensystem 96
Mitteleuropäische Zeit 23
Monat
– siderischer 49
– synodischer 50
Mond (Erdmond) 49

Nadir 11
Neptun 59
NEWCOMB, S. 77
NEWTON, I. 76
Nova 91

Offener Sternhaufen 95
Opposition 29
Orientierung nach Gestirnen 11
Ortszeit 23

Parabolische Geschwindigkeit 65
Parallaxe
– jährliche 84
– photometrische 89
– spektroskopische 33
– tägliche 33
– trigonometrische 84
Parsec 84
Passage-Instrument 30
Pendelquadrant siehe Quadrant
Perigäum 64
Perihel 36
Photosphäre 40
Planetensystem siehe Sonnensystem
Planetoid
– künstlicher 67
– natürlicher 60
Platonisches Weltjahr 27
Pluto 60
Pol siehe Himmelspol
Präzession 26
Protostern 100
Protuberanz 42
PTOLEMÄUS 73
PYTHAGORAS 72

Quadrant 30

Radialgeschwindigkeit 94
Radiant (Radiationspunkt) 63
Radiofrequenzstrahlung der Sonne 44
Rakete 65
Randverdunkelung der Sonne 40
Rechtläufigkeit 28
Reflexionsnebel 92
Rektaszension 19
RÖMER, O. 77
Rotverschiebung 97
Rückläufigkeit 28

Saturn 57
SCHEINER, Ch. 77
SCHIAPARELLI, G. V. 79
Schiefe der Ekliptik 25
SCHMIDT, O. J. 103
SCHWARZSCHILD, K. 79
Sextant 29
Solarkonstante 43
Solstitium siehe Sonnenwende
Sonne 39
Sonnenaktivität 41
Sonnenatmosphäre 40
Sonnenenergie, technische Anwendung 45
Sonneneruption 42
Sonnenfackeln 42
Sonnenfleck 41
Sonnenkorona 40
Sonnenspektrum 43
Sonnensystem 34
Sonnentag 25
Sonnenuhr 23
Sonnenwende 25
Sonnenzeit
– mittlere 22
Sonnenzeit
– wahre 22
Spektralklasse 85
Spektrograph 85
Spektrum der Sterne 85
Stern (Fixstern) 81
Sternbild 7
Sternentstehung 100
Sternentwicklung 100
Sternkarte, drehbare 13
Sternkatalog 82
Sternschnuppe siehe Meteor
Sternsystem 95
Sterntag 25
Stillstand, scheinbarer 28
Strahlung
– der Sonne 42
– der Sterne 85
Strahlungsgürtel der Erde 47
STRUVE, O. 79
STRUVE, W. 79
Stundenkreis 16
Stundenwinkel 17
Supergalaxis 97
Supernova 91

Tagundnachtgleiche 25
TERESCHKOWA, V. 69
Theodolit 15
Tierkreis 25
Tierkreislicht 63
Titius-Bode-Reihe 37
TYCHO BRAHE 76

Umlaufszeit 37
Uranus 59

Venus 54
Veränderlicher Stern 90
Vertikalkreis 11

WEIZSÄCKER, C. F. v. 103
Weltraumfahrt siehe Astronautik
Weltzeit 23
Widderpunkt siehe Frühlingspunkt

Zeitgleichung 23
Zenit 11
Zenitdistanz 15
Zirkumpolarsterne 14
Zodiakallicht siehe Tierkreislicht
Zonenzeit 23

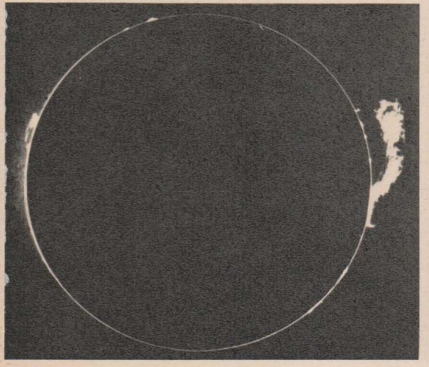
TAFEL I

1 Photographische Aufnahme der Sonne mit großer Fleckengruppe (17. 5. 1951)

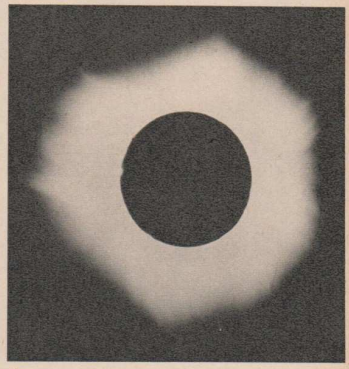
2 Große Sonnenprotuberanz

3 Die Sonnenkorona (bei totaler Sonnenfinsternis)

1



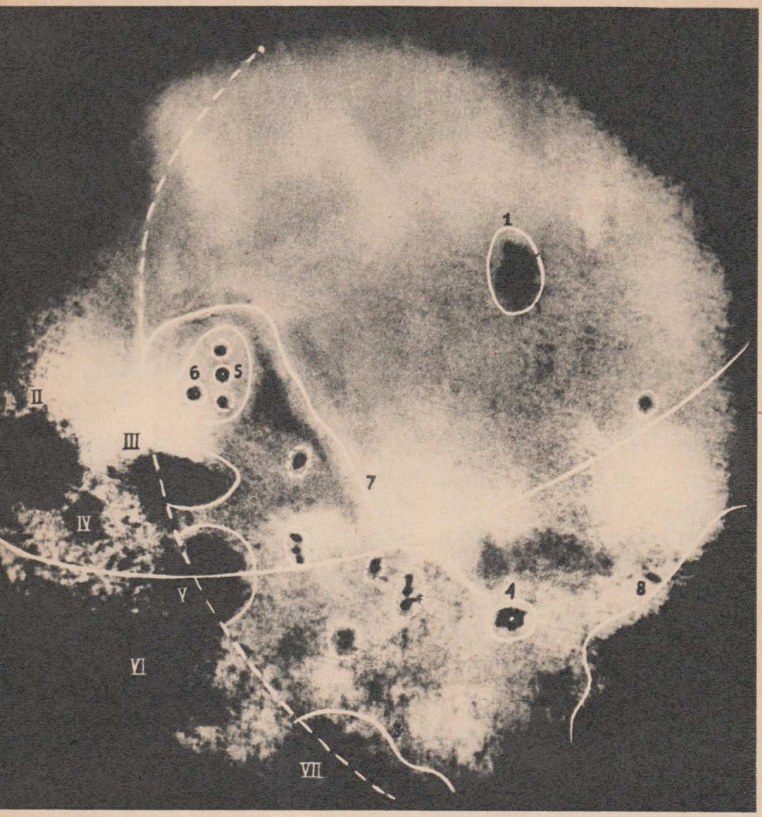
2



3

Der Mond 1 Tag nach dem ersten Viertel (im umkehrenden Fernrohr)

TAFEL II

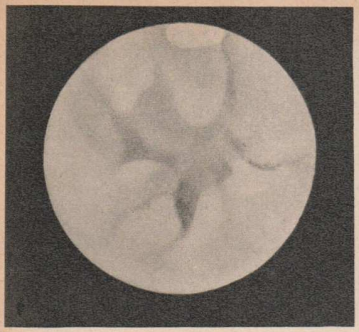


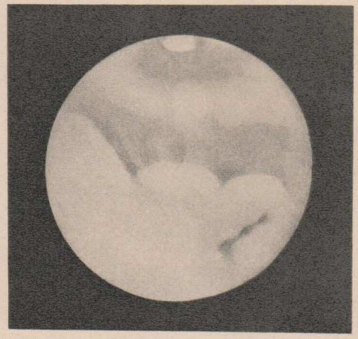
Photographische Aufnahme der Mondrückseite durch Lunik 3

TAFEL III

I Mare humboldtianum
II Mare crisium
III Mare marginis
IV Mare undarum
V Mare smythii
VI Mare foecunditatis
VII Mare australe

1 Mare Moskwa
2 Astronautenbucht
3 Mare australe
4 Krater Ziolkowski
5 Krater Lomonossow
6 Krater Joliot-Curie
7 Sowjetgebirge
8 Mare Metschta



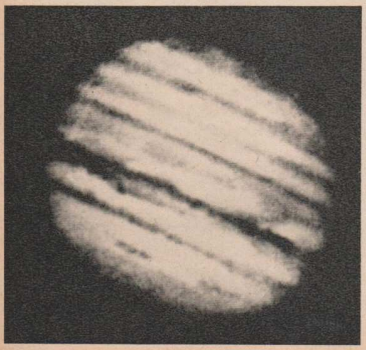


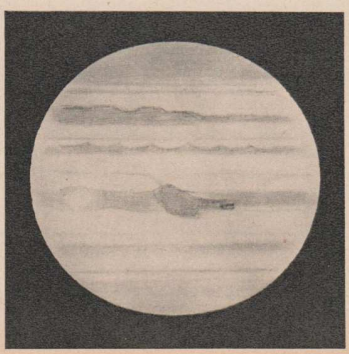
Mars mit südlicher Polkappe zu vier verschiedenen Zeitpunkten (nach einer Zeichnung von Graff)

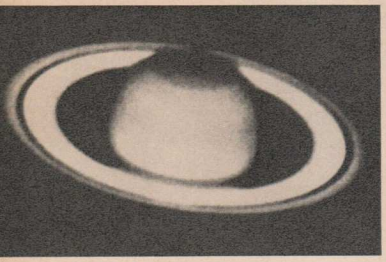
Photographische Aufnahme des Jupiter

Jupiter im Fernrohr (Zeichnung)

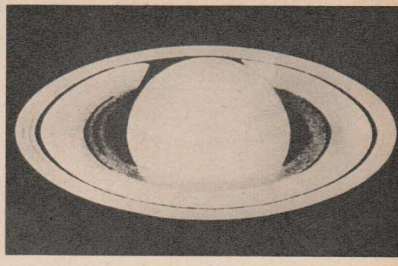
TAFEL IV







Photographische Aufnahme des Saturn



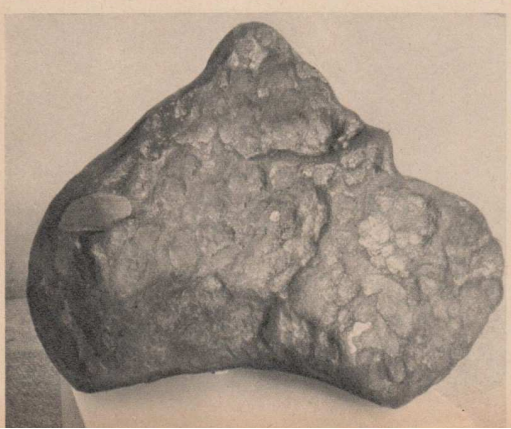
Saturn im Fernrohr (Zeichnung)

Photographische Aufnahme eines Kometen

TAFEL V

1

2



3

TAFEL VI

1 Spur eines hellen Meteors (Feuerkugel)

2 Der große Meteorkrater in Arizona

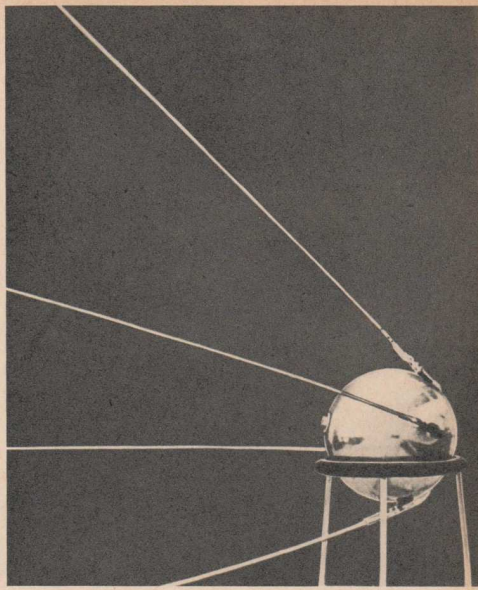
3 Steinmeteorit

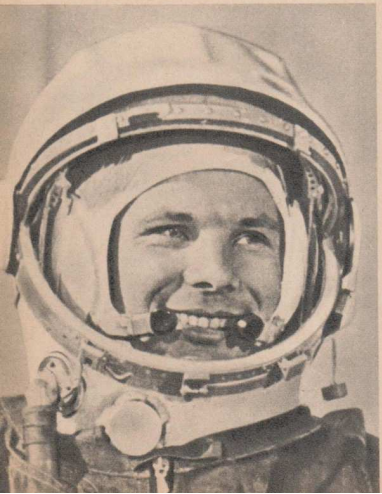
TAFEL VII

1 Der erste künstliche Erdsatellit Sputnik 1 (UdSSR)

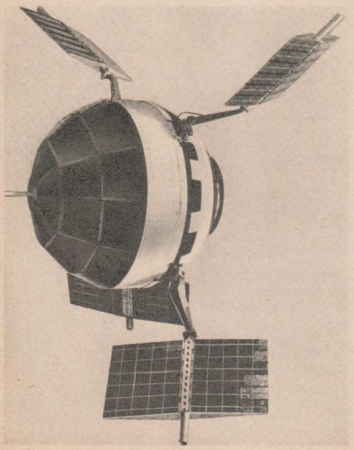
2 Juri Gagarin

3 Valentina Nikolajewa-Tereschkowa

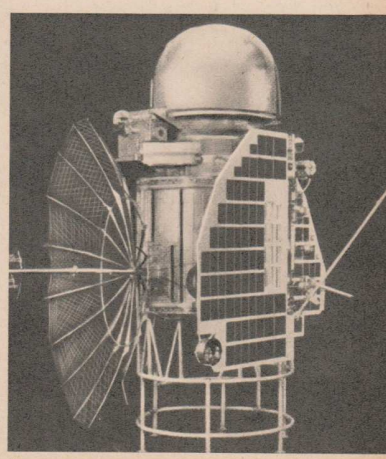




1



2



3

TAFEL VIII

1 Spur der Trägerrakete von Sputnik 3

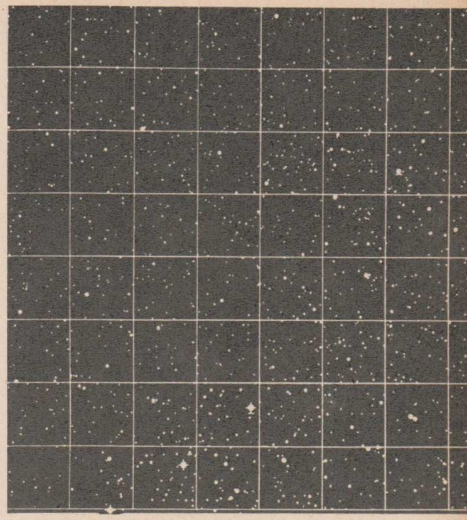
2 Der künstliche Planetoid Pioneer V (USA)

3 Die Venussonde (UdSSR)

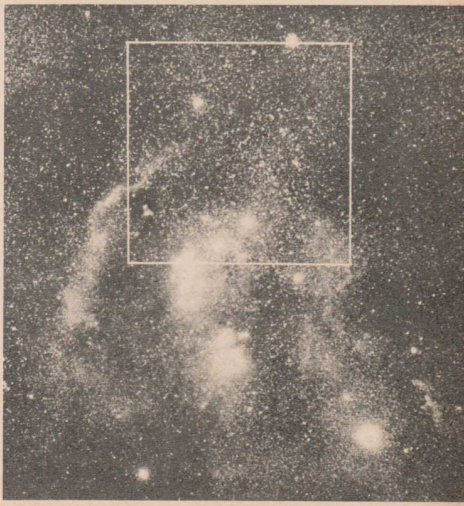
TAFEL IX

1 Sternkarte der Bonner Durchmusterung (1875) mit einem Teil des Sternbilds Orion

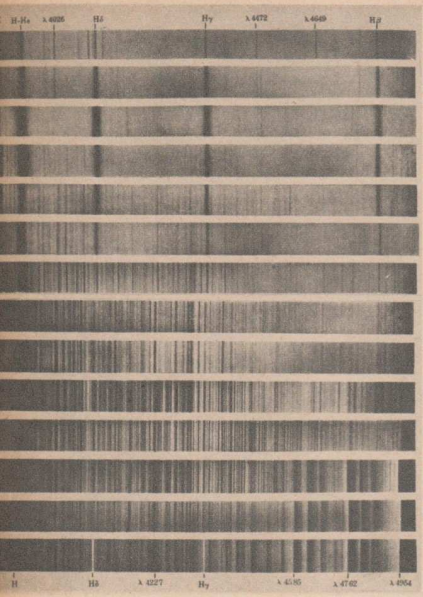
2 Himmelsaufnahme mit einem Objektiv von 8 cm Öffnung und 55 cm Brennweite. Das eingezeichnete Quadrat umgrenzt das Gebiet der Sternkarte von Bild 1. Unterhalb des Quadrats ist der Orionnebel zu erkennen (siehe Tafel XI)



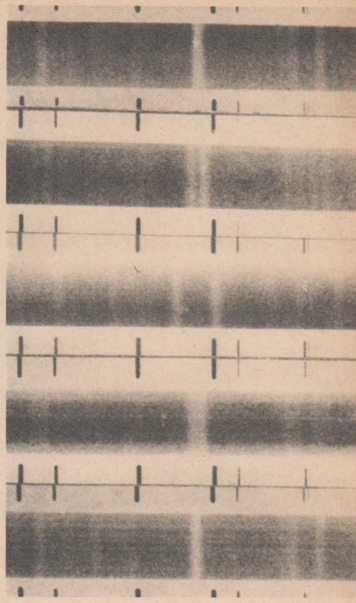
1



2



1



2

1 Die Folge der wichtigsten Spektralklassen (typische Vertreter) *TAFEL X*

B0	ε	Orionis	G5	α	Geminorum (Castor)
B5	φ	Tauri	K0	α	Bootis (Arktur)
A0	α	Canis Maioris (Sirius)	K5	α	Tauri (Aldebaran)
A5	β	Trianguli	Ma	α	Orionis (Beteigeuze)
F0	δ	Geminorum	Mb	ϱ	Persei
F5	α	Canis Minoris (Prokyon)	Mc	W	Cygni
G0	α	Aurigae (Capella)	Md	o	Ceti

2 Ausschnitte aus Spektrogrammen eines spektroskopischen Doppelsterns. Die Verdopplung der Spektrallinien wiederholt sich periodisch bei jedem Umlauf des Sternpaars. Die kurzen schwarzen Linien von einer irdischen Vergleichslichtquelle dienen als Meßmarken

TAFEL XI ▶

Der Orionnebel (nach einer Aufnahme mit dem 2-m-Spiegelteleskop der Sternwarte Tautenburg)

1

TAFEL XII

1 Offener Sternhaufen M 67 im Sternbild Krebs (Krippe)

2 Kugelsternhaufen M 3 im Sternbild Jagdhunde

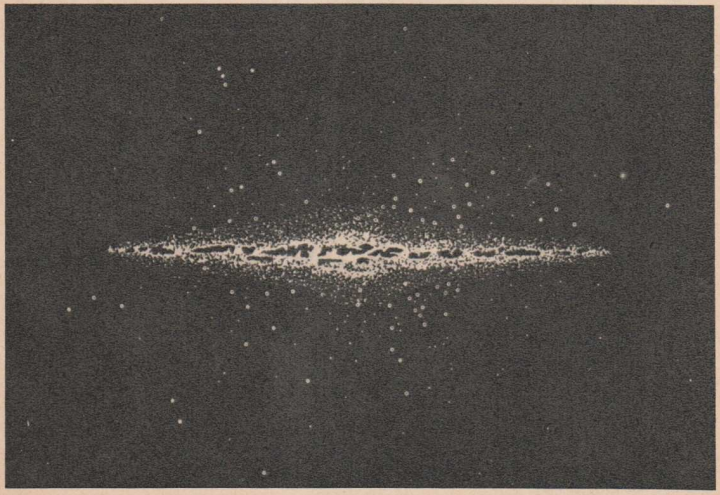
2

TAFEL XIII

1 Milchstraße im Sternbild Schwan mit hellen Sternwolken und dunklen Absorptionsgebieten, vor denen nur einzelne Vordergrundsterne zu sehen sind. Der helle Nebel links oben wird wegen seiner Form als Nordamerikanebel bezeichnet

2 Schematischer Querschnitt durch das Milchstraßensystem. Die meisten Sterne und Wolken der interstellaren Materie sind in dem flachen Hauptkörper enthalten, der von Einzelsternen (Punkte) und den Kugelsternhaufen (Kreise) umgeben ist

1



2

1

2

TAFEL XIV

1 Spiralnebel M 31 (und zwei kleine elliptische Systeme) im Sternbild Andromeda (nach einer Aufnahme mit dem 2-m-Spiegelteleskop der Sternwarte Tautenburg)

2 Spiralnebel M 51 im Sternbild Jagdhunde

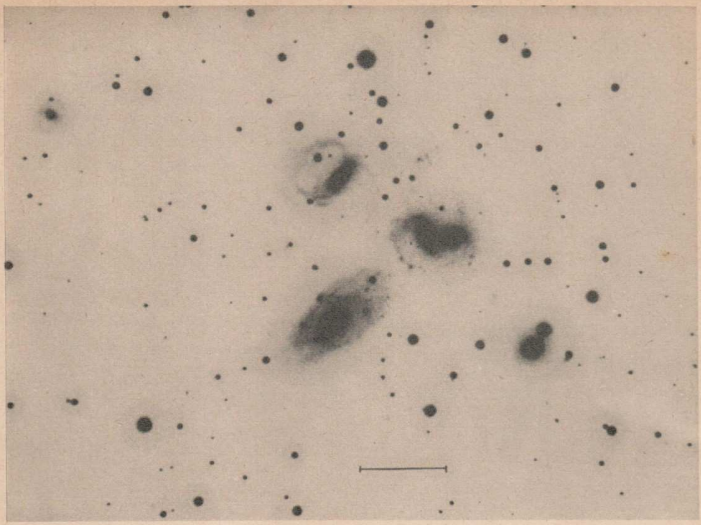
1

2

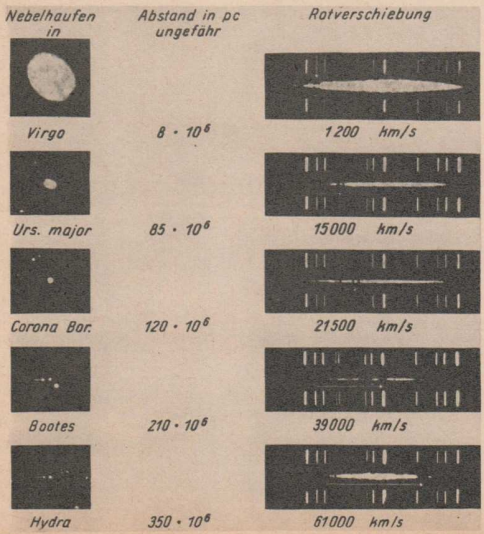
TAFEL XV

1 Spiralnebel im Sternbild Haar der Berenice

2 Große Magellansche Wolke (irreguläres System)



1



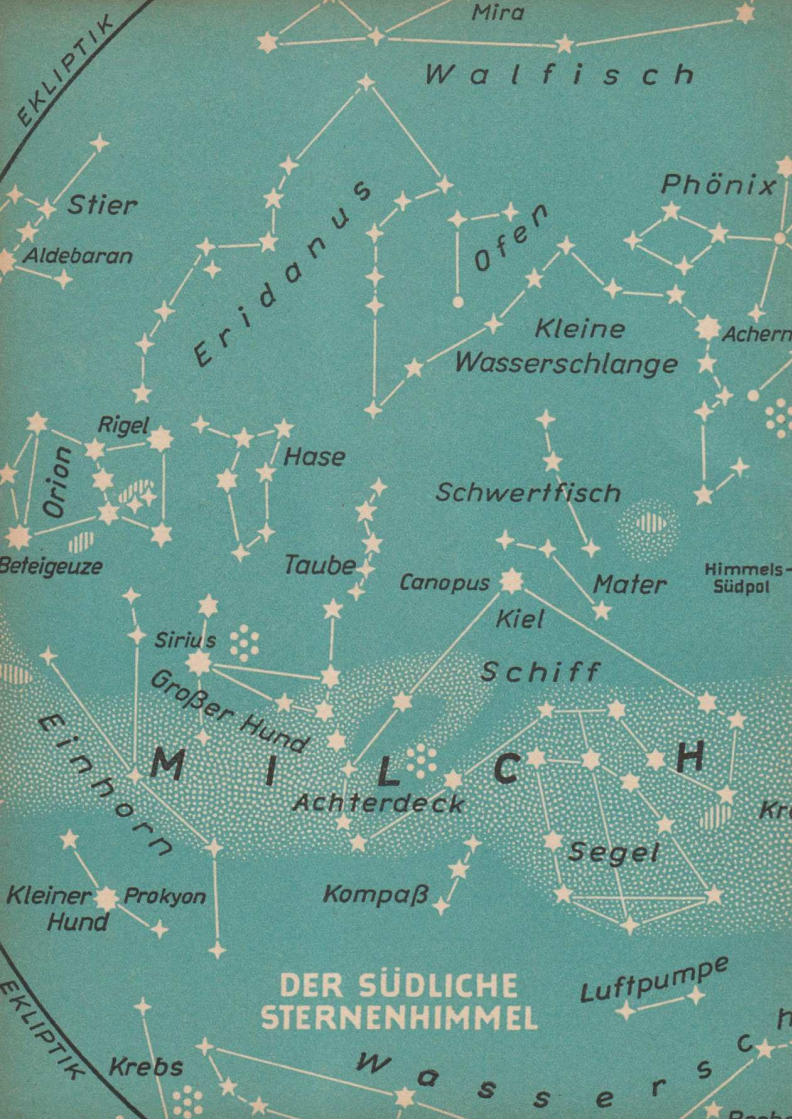
2

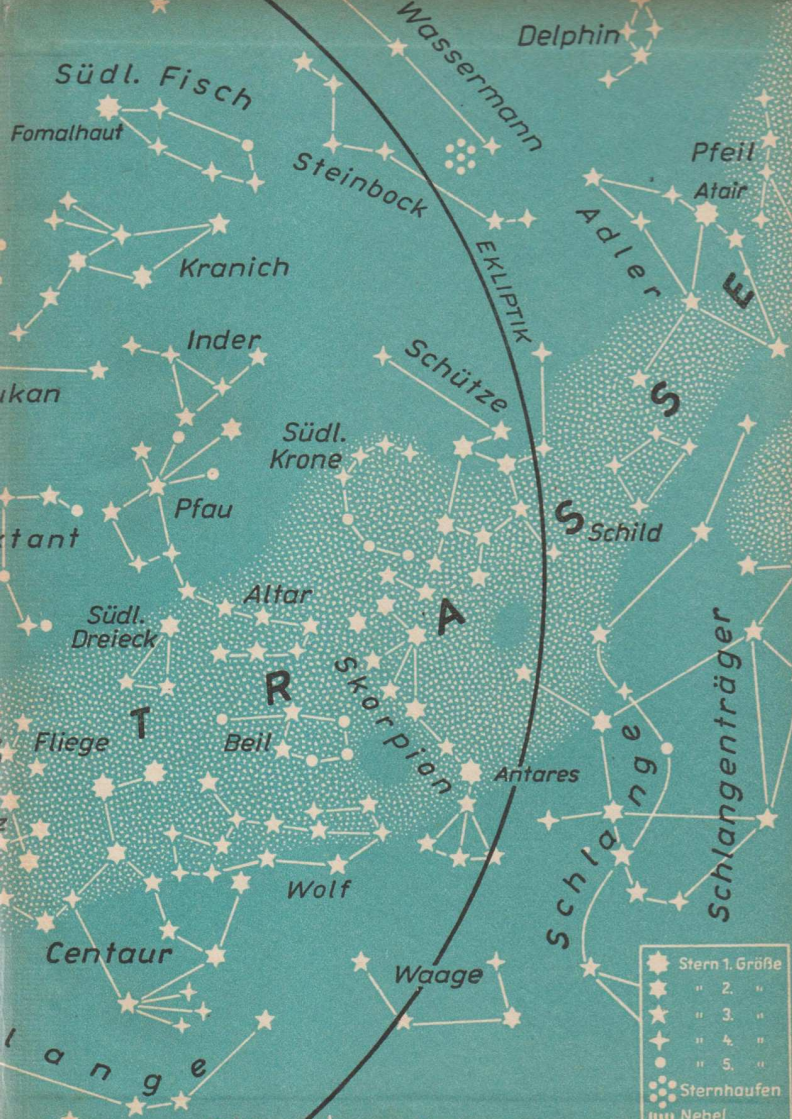
TAFEL XVI

1 Gruppe von Galaxien (Negativ einer Aufnahme mit dem 5-m-Spiegelteleskop von Mount Palomar). Die eingezeichnete Strecke entspricht einer Bogenminute

2 Links direkte Aufnahme von Galaxien aus verschiedenen Nebelhaufen, rechts Spektren dieser Galaxien. Die hellen Linien sind Vergleichsspektren des Heliums. Die Pfeile zeigen die Lage einiger erkennbarer Linien des Kalziums an.

B241


EKLIPTIK
Mira
Walfisch
Stier
Aldebaran
Eridanus
Ofen
Phönix
Kleine
Wasserschlange
Achern
Rigel
Orion
Hase
Schwertfisch
Beteigeuze
Taube
Canopus
Mater
Himmels-
Südpol
Kiel
Sirius
Schiff
Großer Hund
Einhorn
M I L C H
Achterdeck
Segel
Kleiner
Hund
Prokyon
Kompaß
DER SÜDLICHE
STERNENHIMMEL
Luftpumpe
EKLIPTIK
Krebs
Wasserschlange


Wassermann
Delphin
Südl. Fisch
Fomalhaut
Steinbock
Pfeil
Atair
Adler
EKLIPTIK
Kranich
Inder
Schütze
ikan
Südl. Krone
Pfau
tant
Schild
Altar
Südl. Dreieck
Skorpion
Fliege
Beil
Antares
Schlangenträger
Schlange
Wolf
Centaur
Waage
lange
Stern 1. Größe
" 2. "
" 3. "
" 4. "
" 5. "
Sternhaufen
Nebel

08 10 04 - 1